

SCHLUSSBERICHT

I. Ziele

Um flexibel auf Veränderungen der Verfügbarkeit und Preise von Agrardiesel-, Biodiesel- und Agrarpflanzenölkraftstoffen reagieren zu können, soll ein Traktorkonzept entwickelt werden, welches mit verschiedenen Pflanzenölkraftstoffen, Biodiesel und Mischungen von Pflanzenöl, Biodiesel und Dieselkraftstoff betrieben werden kann.

1. Aufgabenstellung

Auf Basis von Serien-Dieseltraktoren soll ein Konzept für Multifuel-Traktoren der Abgasstufe V entwickelt und demonstriert werden, das mit verschiedenen Pflanzenölkraftstoffen, Biodiesel und Dieselkraftstoff, sowie mit Mischungen dieser Kraftstoffe gleichermaßen betrieben werden kann. Der Traktor soll mit einem zuverlässigen, redundanten Kraftstofferkennungssystem und einer Motorsteuerung mit automatischer Anpassung der Motorparameter in Abhängigkeit vom erkannten Kraftstoff beziehungsweise Kraftstoffgemisch ausgestattet sein. Die Motorsteuerung soll auf der Grundlage eines eigens entwickelten, geeigneten Motormodells agieren. Mit dem neu entwickelten Kraftstofferkennungssystem und der Motorsteuerung soll ein sicherer, effizienter und schadstoffarmer Betrieb des Multifuel-Traktors mit verschiedenen Kraftstoffen und Kraftstoffmischungen möglich sein. Landwirten wird damit eine größtmögliche Flexibilität und Betriebssicherheit bei der Wahl des Kraftstoffes geboten und Hemmnisse zum Einsatz von Pflanzenöl als Kraftstoff werden abgebaut.

Die Aufgaben des Projekts verteilen sich auf 19 Arbeitspakete, die in drei Teilvorhaben (TV) gegliedert sind.

TV1: Multifuel-Traktor – Adaption von Motorsteuergeräten und dessen Implementierung in ein Versuchsfahrzeug (JD)

1. Koordination der Projektpartner und der Arbeitspakete
2. Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus
3. Entwicklung des Umschaltalgorithmus
4. Motorenkennfelder: Adaption und Anpassung der Motorleistung
5. Validierung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus des Umschaltalgorithmus und der Kennfeldanpassung
6. Analyse des Einsatzes von neuronalen Netzen, Aufbau der Deep Learning Datenbasis
7. Integration der Multifuel Kraftstofftechnologie in eine Feldtestmaschine, welche die Abgasstufe V entsprechend den aktuell diskutierten Grenzwerten erfüllt
8. Informationsbesuche bei Multiplikatoren und legislativen sowie exekutiven Organen
9. Beiträge zu Konferenzen und Fachveranstaltungen, sowie Fachzeitschriften
10. Öffentlichkeitsarbeit und Durchführung einer Abschlussveranstaltung

TV2: Multifuel-Traktor - Sensortest und Untersuchung des Gesamtsystems auf dem Traktorenprüfstand und im Feldeinsatz (TFZ)

11. Evaluierung von Sensoren und Modellentwicklung zur Kraftstoffidentifikation
12. Emissions- und Leistungsmessung des Traktors im (Multifuel-) Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen und Kraftstoffmischungen am Traktorenprüfstand, um die erfolgreiche Integration der entwickelten Maßnahmen für den Multifuel-Betrieb zu untersuchen und gegebenenfalls Optimierungen vorzunehmen
13. Felderprobung der Traktoren (zunächst Felderprobung im reinen Pflanzenölbetrieb mit installierten Sensoren zur Bewertung von deren Langzeitverhalten und –stabilität, sobald verfügbar, Felderprobung des Multifuel-Traktors.
14. Kraftstoffnormierung

TV3: Multifuel-Traktor - Sensortest und Validierung der Motorkennfeldanpassungen auf dem Motorprüfstand (TUK)

15. Prüfstandaufbau
16. Aufbau (Hard- und Software) einer Deep-Learning Plattform am Prüfstand
17. Unterstützung bei der Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus
18. Umschaltstrategie
19. Motorkennfelder: Entwicklung und Kalibrierung

Meilensteine

- MS1: Motorenkennfelder: Adaption und Anpassung der Motorleistung (M9)
- MS2: Kraftstoffdetektionsalgorithmus ist validiert (M15)
- MS3: Traktor-Feldtest ist abgeschlossen (M29)

Ursprünglicher Ablaufplan:

	1.10.2018	1.2.2019	1.5.2019	1.8.2019	1.11.2020	1.2.2020	1.5.2020	1.8.2020	1.11.2020	1.2.2021
	1Q	2Q	3Q	4Q	5Q	6Q	7Q	8Q	9Q	10Q
JD ETIC	Koordination Teilebeschaffung Parameteridentifikation Modellbildung	Koordination Modellbildung Kraftstoff- erkennung Aufbau Versuchs- fahrzeug	Koordination Modellbildung Kraftstoff- erkennung Aufbau Ver- suchsfahrzeug	Koordination Modellbildung Kraftstofferkennung Integration in die ECU	Koordination Modellbildung Kraftstofferkennung Integration in die ECU Entwicklung der Umschaltstrategie	Koordination Entwicklung der Umschaltstrategie	Koordination Entwicklung der Umschaltstrategie Kennfeld- anpassung	Koordination Entwicklung der Umschaltstrategie Kennfeld- anpassung Integration in das Versuchs- fahrzeug	Koordination Validierung	Koordination Validierung
TFZ	Recherche Sensoren Installation von Messtechnik an Feldtesttraktoren	Aufbau Sensor- prüfstand Test von Sensoren im Traktor Feld- einsatz	Aufbau Sensorprüf- stand Test von Sensoren im Traktor Feld- einsatz	Sensorentest Laboruntersuchun- gen Modellbildung Kraftstoffsensoren Emissionsmessun- gen Traktor Vorbereitung Feldtest Multifuel-Traktor	Sensorentest Laboruntersuchun- gen Modellbildung Kraftstoffsensoren Feldtest Multifuel- Traktor	Sensorentest Laborunter- suchungen, Modellbildung Kraftstoffsensoren Feldtest Multifuel- Traktor	Sensorentest Laborunter- suchungen Modellbildung Kraftstoffsensoren, Feldtest Multifuel- Traktor	Emissions- und Leistungs- messung des Feldtesttraktors am Traktoren- prüfstand Feldtest Multifuel- Traktor ggf. mit PEMS Messung	Evaluierung Kraftstoffsensoren Feldtest Multifuel- Traktor	Bericht- erstellung Feldtest Multifuel- Traktor Motor- befundung
TU KL	Aufbau und Inbetriebnahme Motor Parameteridentifikation Modellbildung Kraftstofferkennung	Prüfstands- betrieb Modellbildung Kraftstoff- erkennung (Unterstützung)	Prüfstands- betrieb Modellbildung Kraftstoff- erkennung (Unterstützung)	Prüfstandsbetrieb Modellbildung Kraftstofferkennung (Unterstützung)	Prüfstandsbetrieb Modellbildung Kraftstofferkennung (Unterstützung) Entwicklung der Umschaltstrategie (Beratung)	Prüfstandsbetrieb Entwicklung der Umschaltstrategie (Beratung)	Prüfstandsbetrieb Entwicklung der Umschaltstrategie (Beratung)	Prüfstandsbetrieb Entwicklung der Umschaltstrategie (Beratung)	Prüfstands- betrieb Validierung	Prüfstands- betrieb Validierung

Angepasster Ablaufplan nach Projektverlängerung:

	Q7	Q8	Q9	Q10
	Nov 2020 - Jan 2021	Feb 2021 - Apr 2021	Mai 2021 - Jul 2021	Aug 2021 - Okt 2021
JD	<ul style="list-style-type: none"> - Koordination - Entwicklung der Umschaltstrategie - Anpassen des Kraftstoffdetektionsalgorithmus - Kennfeldanpassungen 	<ul style="list-style-type: none"> Koordination Entwicklung der Umschaltstrategie Validierung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus Kennfeldanpassungen KI-Modell 	<ul style="list-style-type: none"> - Koordination - Entwicklung der Umschaltstrategie - Validierung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus - KI-Modell 	<ul style="list-style-type: none"> - Koordination - Validierung der Umschaltstrategie - Demonstrator - Berichterstellung
TU KL	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfstandsbetrieb - Entwicklung der Umschaltstrategie (Anpassung Kennfelder) - (Beratung Umschaltung) - Validierung (Kennfeldanpassung) 	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfstandsbetrieb - Entwicklung der Umschaltstrategie (Beratung/ Implementierung Umschaltung) - Validierung (Kennfeldanpassung) - Validierung (Umschaltung) 	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfstandsbetrieb - Entwicklung der Umschaltstrategie (Regeneration) - Validierung (Regeneration) - Validierung (Umschaltung) 	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfstandsbetrieb - Validierung (Regeneration) - Berichterstellung
TFZ	<ul style="list-style-type: none"> - Modellbildung Kraftstoffsensoren - Sensortest - Test von Sensoren im Traktor Feldeinsatz 	<ul style="list-style-type: none"> - Modellbildung Kraftstoffsensoren - Sensortest - Test von Sensoren im Traktor Feldeinsatz - Emissions- und Leistungsmessung am Traktorenprüfstand 	<ul style="list-style-type: none"> - Modellbildung Kraftstoffsensoren - Test von Sensoren im Traktor Feldeinsatz - Emissions- und Leistungsmessung am Traktorenprüfstand - PEMS-Messungen - Feldtest Multifuel-Traktor 	<ul style="list-style-type: none"> - Test von Sensoren im Traktor Feldeinsatz - Emissions- und Leistungsmessung am Traktorenprüfstand - PEMS-Messungen - Feldtest Multifuel-Traktor - Motorbefundung - Berichterstellung

2. Stand der Technik

Zum Zeitraum der Beantragung des Vorhabens waren Pflanzenöltraktoren mit Motoren der Abgasstufe 4 praxistauglich. Dies wurde im Projekt „PraxTrak“, auf dem das durchgeführte Vorhaben aufbaut, erfolgreich nachgewiesen (www.praxtrak.de). Durch verschiedene Verbesserungen, insbesondere der Motorsteuerung, konnte ein Demonstrator hinsichtlich Leistung, Kraftstoffverbrauch und Emissionen für den Betrieb mit verschiedenen Pflanzenölen optimiert werden. Anfang 2015 bot John Deere zeitlich befristet in einer Vorserie Pflanzenöltraktoren mit Motoren der Abgasstufe 3B, ab 2016 auch der Abgasstufe 4 zunächst in Bayern an, um auf die Nachfrage im Rahmen des Förderprogramms RapsTrak200 zu antworten. Inzwischen wurde aber die Produktion eingestellt.

Bislang dürfen die in Kleinserie produzierten Traktoren ausschließlich mit Rapsölkraftstoff betrieben werden, um zu verhindern, dass die Betriebserlaubnis aufgrund möglicher Mehrleistung im Betrieb mit Dieselkraftstoff erlischt. Ein Multifuel-Betrieb mit Dieselkraftstoff, Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff sowie Mischungen daraus ist bisher unter dem Gesichtspunkt eines optimierten Betriebs- und Emissionsverhaltens noch nicht umgesetzt. Das stellt ein Hindernis für eine Markteinführung dar, denn die Attraktivität von pflanzenöltauglichen Traktoren für Landwirte bleibt gering, solange solche Traktoren, zum Beispiel im Fall von Lieferengpässen oder ungünstigen Pflanzenölpreisen, nicht auch mit Dieselkraftstoff oder Biodiesel höchst effizient und schadstoffarm betrieben werden können.

Bereits im Jahre 2003 wurde ein Projekt zur Erkennung des RME-Betriebes mittels eines Biodiesel-Kraftstoffsensors durch die FNR gefördert. Munack und Krahl [1] untersuchten damals verfügbare Kraftstoffsensoren und Messgeräte im Labor und testeten einen ersten Prototyp für den Praxiseinsatz. Durch technischen Fortschritt in der Sensortechnologie ist heute im Gegensatz zu dieser früheren Untersuchung ein wirtschaftlicher Einsatz praxistauglicher Sensoren grundsätzlich denkbar. Der Mischbetrieb mit Pflanzenölkraftstoff und auch eine automatische Anpassung der Motorsteuerung auf Basis von Sensorsignalen waren nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Es wurden jedoch wichtige Hinweise für die Umsetzbarkeit des Multifuel-Konzeptes und für die Weiterentwicklung von Kraftstofferkennungssystemen geliefert. Dieringer entwickelte 2012 im Rahmen ihrer Dissertation [2] ein Konzept für einen Traktor, der mit Pflanzenölen, Pflanzenöl-Dieselmischungen und Dieselkraftstoff betrieben werden kann. Dabei wurden erste grundlegende Voruntersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Pflanzenölen und zur Unterscheidbarkeit von Dieselkraftstoff und Pflanzenöl mittels Sensoren durchgeführt. Bei den Sensortests war festzustellen, dass vor allem in Verbindung mit hohen Pflanzenölgehalten und niedrigen Temperaturen der intensiv getestete Sensor unzuverlässig wurde. Quereinflüsse wie z. B. unterschiedliche Alterungsgrade der Kraftstoffe und der Einfluss von Additiven oder auch das Verhalten der Sensoren im eingebauten Zustand am Fahrzeug wurden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht. Im Ausblick der Arbeit werden zudem Hinweise gegeben, welche weiteren Entwicklungsschritte und Untersuchungen im Bereich der Kraftstoffsensoren und der Weiterentwicklung von Motorsteuergeräten notwendig sind, um einen für mehrere Kraftstoffe geeigneten Traktor zu entwickeln.

Das durchgeführte Vorhaben reiht sich in eine Reihe von Entwicklungsprojekten ein, deren Ziel es war, Traktoren zu entwickeln, die mit Pflanzenöl betankt werden können. Dabei sollen die aktuellen und künftigen Abgasgrenzwerte bis hin zur Abgasstufe V eingehalten werden und der Betrieb der Traktoren benutzerfreundlich sein. Dies beinhaltet (1) eine automatische Kraftstofferkennung und Adaption der Motorparameter in Abhängigkeit von dem verwendeten Treibstoff, (2) gleiche oder geringere Aufwendungen für Wartung und Ersatzteilbeschaffung und (3) gleiche Garantie- und Servicebedingungen wie für rein dieselbetriebene Traktoren.

Neben den oben genannten Vorarbeiten von Dieringer [2] bzw. John Deere zu Kraftstoffsensoren wurden vom TFZ [3] Untersuchungen zu Motorölsensoren durchgeführt. In dem von der DBU geförderten Vorhaben wurden Online-Ölsensoren in einem modellhaften Ölkreislauf und in einem Versuchsmotor getestet, mit denen der Zustand gebrauchter Motoröl-Rapsöl-Mischungen kontinuierlich im Betrieb beurteilt werden konnte. Dabei gaben die Signale der Ölsensoren den Verlauf der Ölalterung anhand der Messgrößen Viskosität, Permittivität und elektrische Leitfähigkeit plausibel wieder.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Feldtest der Traktoren wurde in Zusammenarbeit mit den Bayerischen Staatsgütern (BaySG) durchgeführt, die auf ihren landwirtschaftlichen Flächen die Maschinen betrieben haben. Im Rahmen der Evaluierung von möglichen Sensoren zur Detektion von Kraftstoffen unterstützten die Hersteller TrueDyne AG, TE Connectivity und Hydac mit Informationen und zum Teil mit Versuchsmustern. Weiterhin wurde im Zuge des Projekts eine Dissertation von Hinrichs an der Technischen Universität Darmstadt angefertigt [7]. Bei der Präsentation des Vorhabens auf der Internationalen Grünen Woche gab es zudem eine Zusammenarbeit mit der Ufop und dem BBE.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zunächst auf die verwendeten Kraftstoffe und Kraftstoffmischungen eingegangen und anschließend werden die Versuchsträger und Herangehensweisen erläutert, welche zu den dargestellten Ergebnissen führen.

1.1 Kraftstoffe und Kraftstoffmischungen

Die Multifuel-Tauglichkeit wird mit Diesel nach DIN EN 590, Fettsäure-Methylester „Biodiesel“ nach DIN EN 14214 und Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 sowie Mischungen daraus untersucht. Laboranalysen bei der Analytik-Service AG und am TFZ stellen sicher, dass alle verwendeten Reinkraftstoffe der jeweils gültigen Anforderungsnorm entsprechen. Daneben werden weitere Parameter untersucht, die später auch mit Hilfe der Kraftstoffsensoren bestimmt werden sollen. In Tabelle 1 sind ausgewählte Eigenschaften der Reinkraftstoffe aufgeführt.

Tabelle 1: Ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Reinkraftstoffe

Parameter	Prüfmethode	Diesel	Biodiesel	Rapsölkraftstoff
Dichte bei 15 °C in kg/m ³	DIN EN ISO 12185	834,8	882,3	919,4
Kin. Viskosität bei 40 °C in mm ² /s	ASTM D 7042	2,88	4,48	35,00
Dyn. Viskosität bei 40 °C in mPa s	Berechnet	2,40	3,96	32,18
Elektrische Leitfähigkeit in pS/m	DIN 51412-1	85	204	<50
Wassergehalt in mg/kg	DIN EN ISO 12937	50	280	591

Abbildung 1 gibt einen Überblick zu den verwendeten Reinkraftstoffen und Kraftstoffmischungen und ordnet sie den Untersuchungen der drei Projektpartner zu. Alle Mischungsverhältnisse sind massebezogen. Die Bezeichnung der Kraftstoffmischungen erfolgt mithilfe von Proben-codes, anhand derer die Zusammensetzung erkennbar ist. So enthält beispielsweise der Kraftstoff mit der Bezeichnung **D020B000P080** 20 % (m/m) Diesel, 0 % (m/m) Biodiesel und 80 % (m/m) Pflanzenöl (Rapsölkraftstoff).

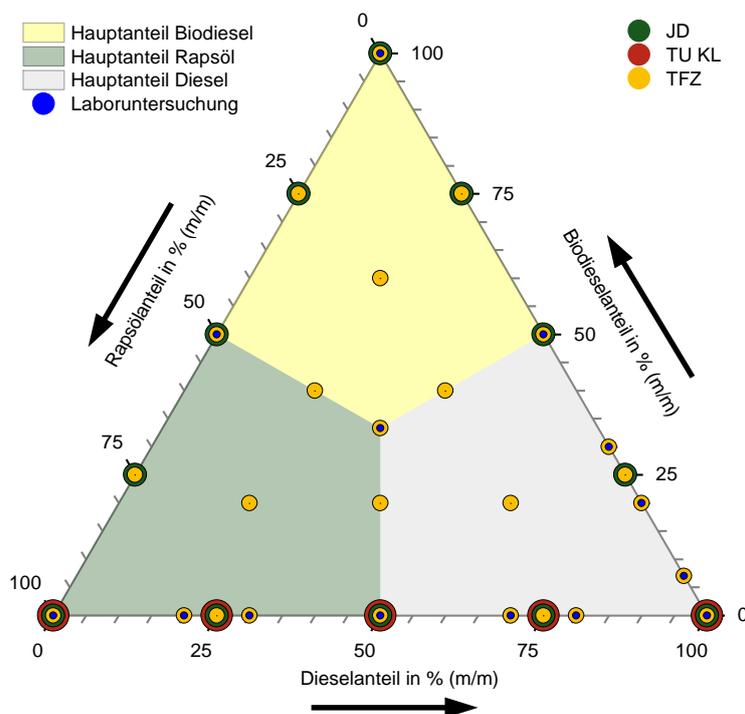


Abbildung 1: Übersicht zu den von den Projektpartnern und im Labor untersuchten Kraftstoffen und Kraftstoffmischungen (JD = John Deere, TU KL = TU Kaiserslautern, TFZ = Technologie- und Förderzentrum)

1.2 Versuchstraktoren

Für die Multifuel-Untersuchungen werden zwei John Deere Traktoren, ein 6135R (im Folgenden JD 6135R) und ein 6250R (im Folgenden JD 6250R) im Feldversuch verwendet (Abbildung 2). Beide Traktoren sind mit Motoren der Abgasstufe V ausgestattet und verfügen über ein Abgasnachbehandlungssystem mit SCR- und Oxidationskatalysator sowie einem Dieselpartikelfilter. Die Traktoren werden vom Hersteller zu Projektbeginn auf den Rapsölbetrieb umgerüstet. Die zur Kraftstoffdetektion ausgewählten externen Sensoren werden auf den Maschinen installiert und unter praxisnahen Bedingungen geprüft. Die Multifuel-Tauglichkeit wird primär am JD 6135R getestet.

Während des Feldtests wird das Betriebsverhalten der Traktoren mittels elektronischer Datenloggersysteme sowie Betriebstagebüchern dokumentiert und die Qualität der eingesetzten Kraftstoffe sowie der Motorenöle analysiert. Zudem wird das Emissionsverhalten der Traktoren mit Rapsöl- und Dieselpartikelfilter sowohl auf dem Traktorenprüfstand als auch im realen Betrieb mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS) Ecostar+ von Sensors Inc. untersucht.



Abbildung 2: MuSt5-Trak-Versuchstraktoren, JD 6135R mit portablen Emissionsmesssystem im Heckanbau (links) und JD 6250R (rechts)

	JD 6135R	JD 6250R
Abgasstufe	EU-V	EU-V
Zylinder	4	6
Hubraum	4,5 l	6,8 l
Nennleistung	99 kW	183 kW

1.3 Untersuchungen am Motorenprüfstand

In diesem Unterkapitel werden die Untersuchungen am Motorenprüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern erläutert sowie die erzielten Ergebnisse dargestellt.

1.3.1 Versuchsträger

An der Technischen Universität Kaiserslautern wurde ein 4,5 l 4-Zylinder-Motor von John Deere im aktuellen Serienstand angeliefert. Das Aggregat wird serienmäßig im Traktor mit der Typenbezeichnung John Deere 6135R verbaut. Der Motor verfügt über zweistufige Turboaufladung, eine gekühlte Hochdruck-Abgasrückführung (HD-AGR) sowie ein vollständiges, dem Serienstand entsprechendes System zur Abgasnachbehandlung, bestehend aus Diesel-Oxidationskatalysator (DOC), Diesel-Partikelfilter (DPF) sowie einem System zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) der Stickoxid-Emissionen. Die Funktionsfähigkeit dieser Komponenten soll auch am Motorenprüfstand gewährleistet werden. Tabelle 2 zeigt einige technische Daten des Basismotors.

Tabelle 2: Technische Daten des 4-Zylinder Basismotors

Größe	Wert	Einheit
Hubraum	4,5	dm ³
Bohrung	106,5	mm
Hub	127,0	mm
Ventile pro Zylinder	4	-
Verdichtungsverhältnis	17,3 : 1	-
Maximale effektive Leistung*	99 (122)	kW
Maximales Drehmoment (bei 1600 min ⁻¹)	632	Nm
Nenn Drehzahl	2100	min ⁻¹

(* Wert in Klammern: mit aktiviertem „Intelligent Power Management“ IPM)

1.3.2 Versuchsaufbau „seriennaher Stand“

Der gewählte Motor wurde zur Grundvermessung zunächst mit der motorfesten Messtechnik versehen. Diese umfasst diverse stationäre Messaufnehmer für Druck und Temperatur im Luft- und Abgaspfad sowie im Kühlsystem und im Ölkreislauf. Prüfstandsseitig erfassen weitere Sensoren die aktuellen Umgebungsbedingungen. Zur Erfassung der aktuellen Gemischzusammensetzung kommen Breitband-Lambdasonden im Abgas zum Einsatz und eine Druckindizierung ermittelt innermotorische Vorgänge der Verbrennung. Dabei sind eine Hochdruckindizierung in Zylinder 3 und 4, sowie Niederdruckquarze im Ein- und Auslasssammler vorgesehen. Im Abgassystem wurden verschiedene Zugänge zur Probenentnahme integriert, die im Versuchsbetrieb die Erfassung der Abgaszusammensetzung mit verschiedenen Messsystemen erlauben. Als Abgasmessstechnik ist ein Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer (FTIR) vorgesehen (AVL i60 SESAM). Des Weiteren kommt ein separates Messgerät zur Partikelmessung (AVL MicroSoot) zum Einsatz. Abbildung 3 zeigt den Messstellenplan der motorfesten Messstellen, Abbildung 4 die Messstellen an der Abgasmachbehandlungsanlage.

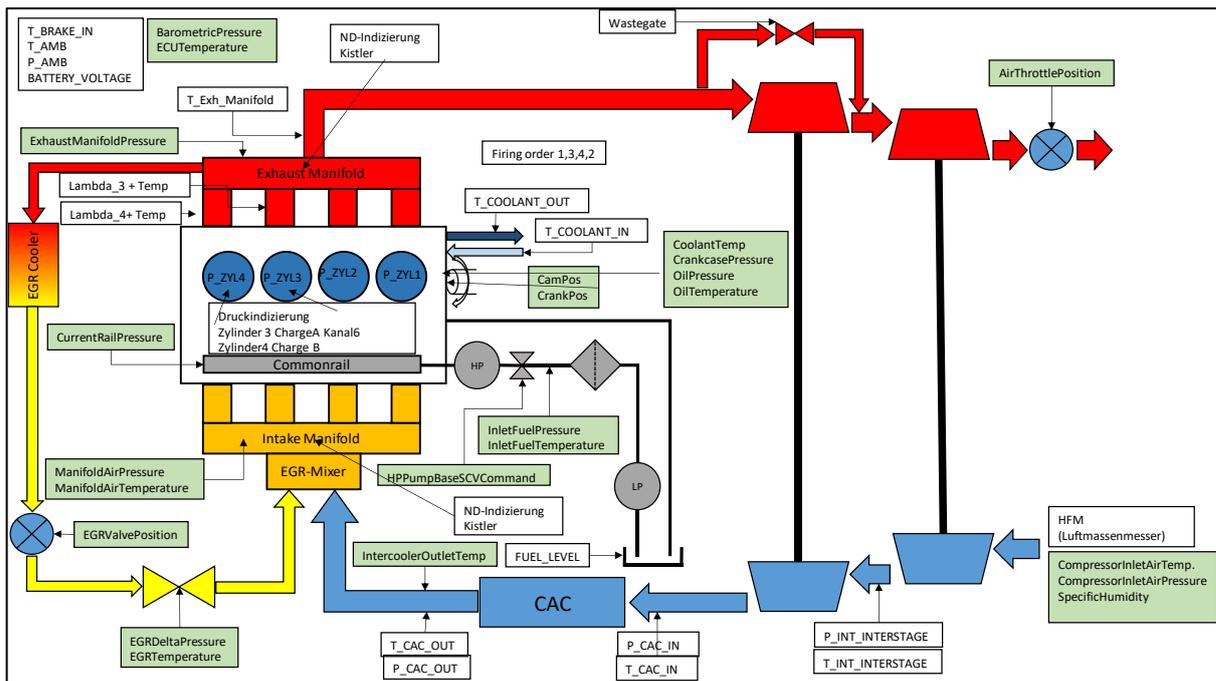


Abbildung 3: Messstellenplan der motorseitigen Messstellen im seriennahen Prüfstands Aufbau

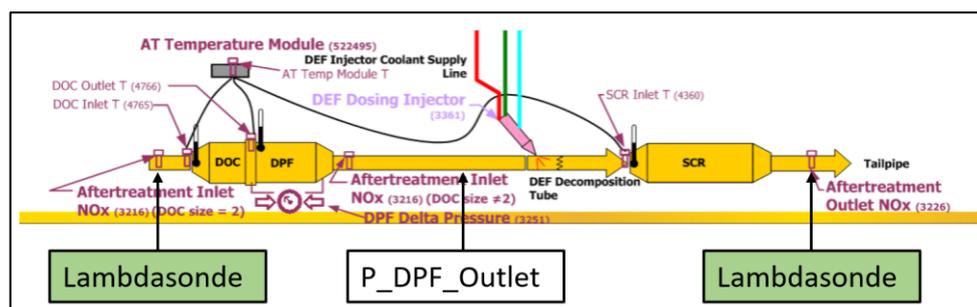


Abbildung 4: Messstellenplan der abgasmachbehandlungsseitigen Messstellen

1.3.3 Erweiterter Versuchsaufbau für bauteilkritische Untersuchungen und zur Ermittlung kraftstoffspezifischer Eigenschaften hinsichtlich Motorsteuerung und Verbrennung

Für die Messungen zum Kraftstofferkennungsalgorithmus wurde auf einen Teil der Prüfstands-Sensorik verzichtet, um den Eingriff in die Motormechanik zu reduzieren. Für die Regenerations-, Verbrennungs- und Emissionsuntersuchungen wurden diese Sensoren nachgerüstet. Den erweiterten Stand des Versuchsaufbaus zeigt der MuSt5-Trak Messstellenplan in Abbildung 5.

verwendeten physischen Sensoren (Hallgeber bzw. Induktivgeber) lassen einen direkten Rückschluss auf die Drehzahl zu. Diese Sensoren erfassen die Winkeländerung der Kurbelwelle mit Hilfe von Zahnprofilen. Durch die Normierung der Winkeländerung auf die Zeit ergibt sich dann die Motordrehzahl. Diese Messung erfolgt kontakt- und verschleißfrei. Zur Erfassung des Drehmoments ist hingegen eine Messung der Kraft notwendig, welche durch das Drehmoment verursacht wird. Hierzu könnte die Abstützkraft des Motors oder die Übertragung der Kraft innerhalb der Antriebswelle gemessen werden. Die Messmittel für die Umsetzung solcher Systeme sind jedoch zu komplex, um diese im Serieneinsatz zur Verwendung zu bringen. Daher werden in Motorsteuergeräten Drehmomentmodelle verwendet. Diese sind in erster Linie von der Energiemenge des eingespritzten Kraftstoffs und vom Einspritzzeitpunkt abhängig. Die Bestimmung der eingespritzten Kraftstoffmasse erfolgt ebenfalls modellbasiert. Dazu werden Systemeigenschaften wie der Einspritzdruck und die Injektorbestromungsdauer genutzt, sodass sich für zuvor festgelegte Kraftstoffe Vorhersagen mit ausreichender Reproduzierbarkeit treffen lassen. Ändern sich jedoch Kraftstoffeigenschaften wie die Dichte oder die Viskosität, so wird die eingespritzte Kraftstoffmasse nicht mehr korrekt vorhergesagt. Hierfür müssen die Werte angepasst werden, auf die das Modell referenziert. Die Kraftstoffeigenschaften können sich zudem auf dynamische Vorgänge, wie z. B. kurz aufeinander folgende (Teil-)Einspritzungen, stärker auswirken, sodass der Umfang der erforderlichen Modellanpassungen ansteigt. Zusätzlich zur Anpassung der eingespritzten Kraftstoffmasse sorgen geänderte physikalische Eigenschaften, wie z. B. die Energiedichte oder der Zündverzug, zu einer Vergrößerung des Fehlers des modellierten Drehmoments. Den Fehler zwischen der gemessenen effektiven Leistung und der modellierten Leistung bei der Verwendung von D100 zeigt Abbildung 7.

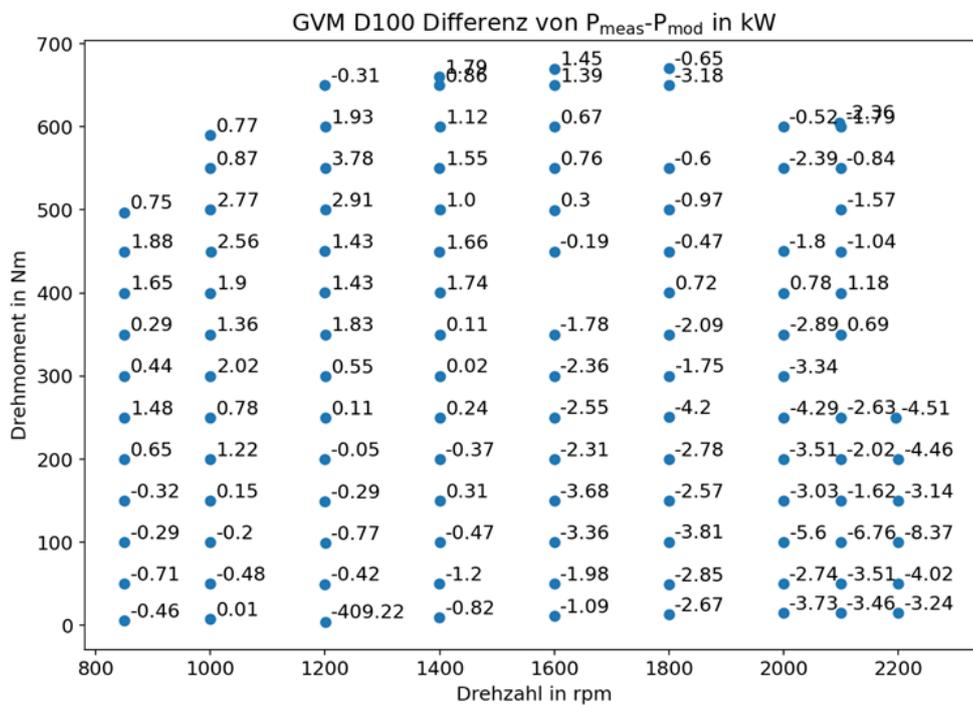


Abbildung 7: Fehler zwischen der effektiven Leistung und der modellierten Leistung für D100; Angabe in kW

Es ist zu sehen, dass mit Ausnahme des Bereichs der Drehzahlen größer 1800 rpm und Lasten unterhalb von ca. 250 – 300 Nm die Leistungsabweichung unter 2 kW liegt. In weiten Teilen des Kennfelds liegt die Abweichung unter 1 kW. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 8 die Abweichung der effektiven Leistung und modellierten Leistung bei der Verwendung mit R100 zu sehen.

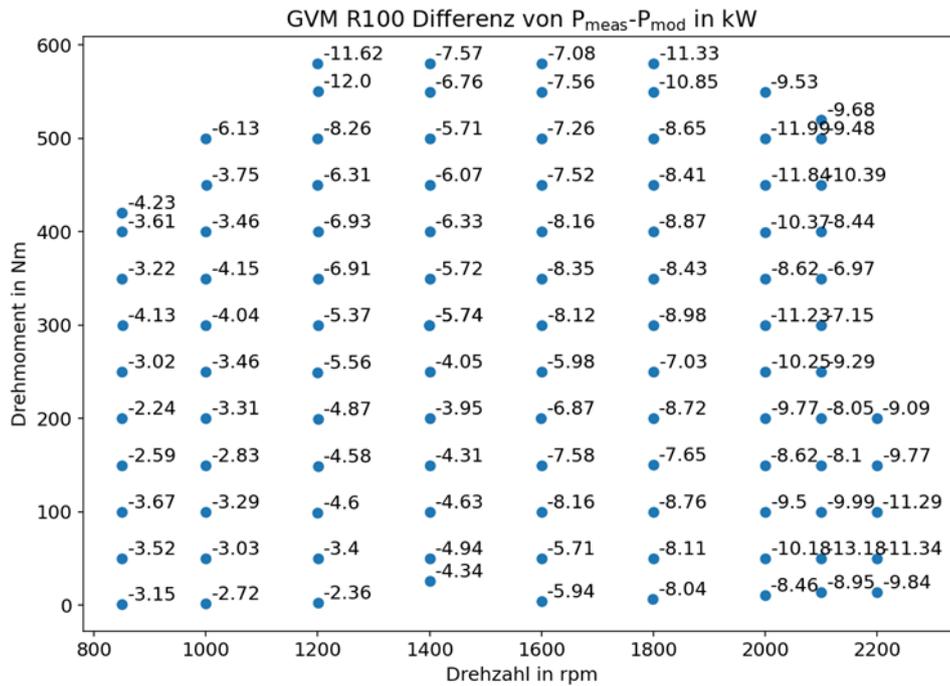


Abbildung 8: Fehler zwischen der effektiven Leistung und der modellierten Leistung für R100; Angabe in kW

Im Vergleich zu D100 übersteigt die modellierte Leistung bei Verwendung von R100 die effektive Leistung. Hierbei ergeben sich Abweichungen von 2 – 12 kW. Die Abweichungen im unteren rechten Kennfeldbereich sind noch stärker als bei der Verwendung von D100.

Bei der Verwendung von Rapsöl oder Rapsölmischungen ändern sich sowohl das Einspritzverhalten als auch die eingebrachte Energiemenge gegenüber Diesel. Durch die modellierte Betriebspunktänderung ändern sich auch emissionsrelevante Betriebsparameter. Insbesondere der Vergleich der AGR-Rate verdeutlicht diesen Zusammenhang. Abbildung 9 zeigt die AGR-Rate der Grundvermessung mit D100 und R100.

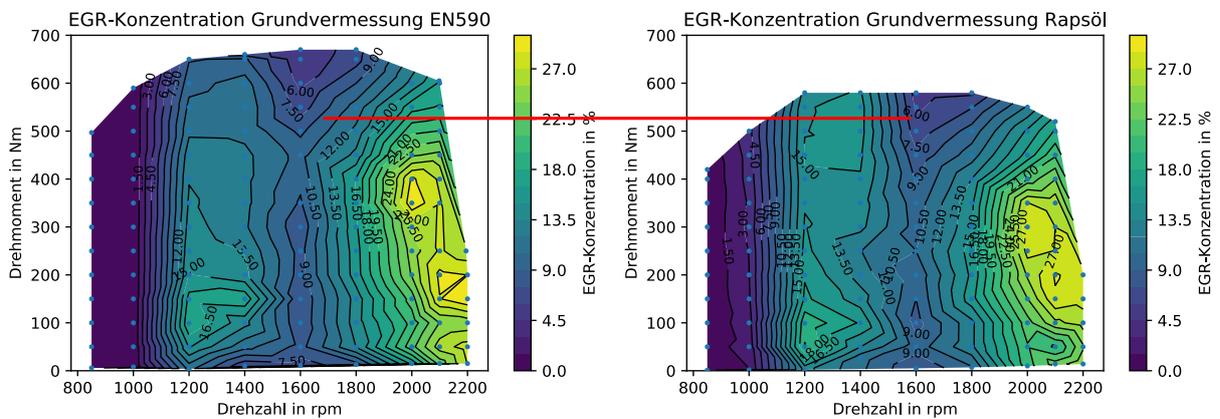


Abbildung 9: Vergleich der AGR-Konzentration zwischen der Grundvermessung mit D100 und R100

Die rote Linie zeigt das gleiche Lastniveau in beiden Diagrammen. Mit steigender Last sinkt die AGR-Rate. Am Beispiel von 1600 rpm sieht man, dass bei Verwendung von R100 die gleiche Absenkung der AGR-Rate wie mit D100 bereits 50 Nm früher erreicht wird. Dies entspricht etwa dem Fehler der Leistungsbestimmung im Motorsteuergerät in diesem Betriebsbereich. Der in Abbildung 10 dargestellte Vergleich der Stickoxidemissionen zeigt die Auswirkung der mit steigender Last sinkenden AGR-Rate.

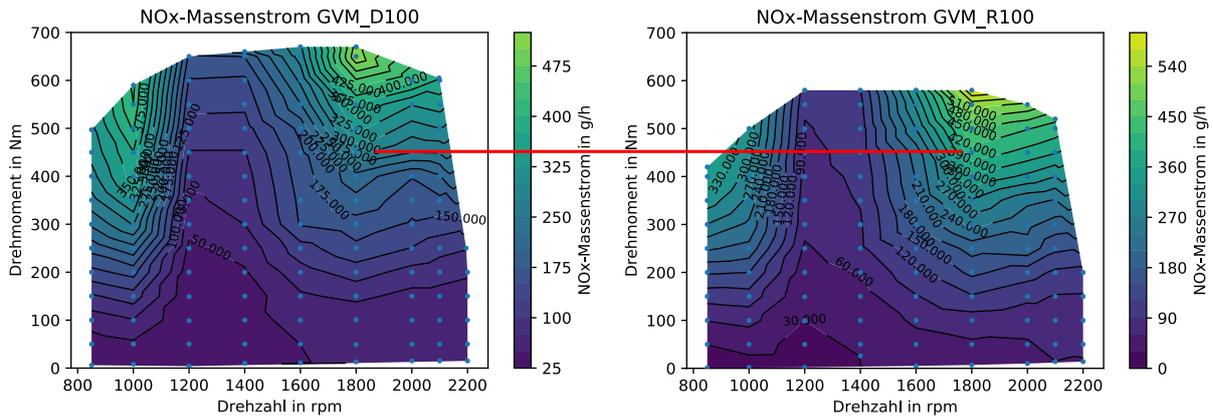


Abbildung 10: Vergleich der NO_x-Emission zwischen der Grundvermessung mit D100 und R100

Es ist zu sehen, dass mit steigender Last als Folge der absinkenden AGR-Rate auch die Stickoxidemission mit R100 im Vergleich zu D100 früher ansteigt. Erschwerend kommt hier hinzu, dass Rapsöl durch einen gesteigerten Zündverzug ohnehin zu einer stärkeren Stickoxidbildung neigt.

Um das Leistungsmodell an die Kraftstoffmischungen anzupassen, wären eine Funktionsbeschreibung (Funktionsrahmen) des Leistungsmodells und der Steuergerätezugriff auf die entsprechenden Größen notwendig. Da beides nicht verfügbar war, wurde eine Möglichkeit zur Korrektur erarbeitet und untersucht.

Wie zuvor beschrieben, ist das Leistungsmodell mit dem Einspritzmengenmodell insofern verknüpft, dass die eingespritzte Masse den größten Einfluss auf den Druckanstieg während der Verbrennung und damit auf das Drehmoment hat. Die Messgröße, auf die das Einspritzmengenmodell referenziert, ist die Bestromungsdauer des Injektors. Das Einspritzmengenkennfeld setzt sich wie in Abbildung 11 dargestellt zusammen.

		Raildruck in MPa ->						
		20.0	30.0	40.0	...	220.0		
Zelleposition entspricht realer Leistung z.B. 20 kW	0	200	220	240	260	280		
	2	250	280	310	340	370		
	4	300	340	380	420	460		
	6	350	400	450	500	550		
	8	400	460	520	580	640		
	10	450	520	590	660	730		
	15	500	580	660	730	800		
	20	550	640	730	800	870		
	25	600	700	760	820	880	1060	1180
	30	650	760	820	880	940	1060	1180
Bestromungsdauer des Injektors → mod. Leistung z.B. 35 kW → reale Leistung z.B. 20 kW	40	750	880	1010	1140	1270		
	45	800	940	1080	1220	1360		
	50	850	1000	1150	1300	1450		
	55	900	1060	1220	1380	1540		
	60	950	1120	1290	1460	1630		
	...	1000	1180	1360	1540	1720		
	180	1050	1240	1430	1620	1810		

Abbildung 11: Schematische Darstellung des Einspritzmengenkennfelds

Auf der x-Achse der Abbildung ist der Einspritzdruck in MPa aufgetragen, entlang der y-Achse die gewünschte Einspritzmenge in [mg/str] (stroke = Injektornadelhub). Um die gewünschte Einspritzmenge bei einem vorliegenden Raildruck zu erreichen, muss der Injektor für eine definierte Dauer bestromt werden. Diese Zeit entspricht dem Zellwert des Kennfelds in [µs]. Im Umkehrschluss steht die Zellposition für einen Wert des modellierten Drehmoments. Verschiebt man nun Zeitwerte in darüber liegende Zellpositionen – so dass der Injektor zwar immer noch gleich lang bestromt wird, aber die Bestromungsdauer dann an einer Zellposition für ein geringeres modelliertes Drehmoment steht –, dann erfolgt eine Korrektur der modellierten Leistung. Die Einspritzmenge entspricht dabei nicht mehr der tatsächlichen Einspritzmenge. Anhand des Vergleichs zwischen der modellierten Leistung aus der Grundvermessung mit D100 und R100 wurde ermittelt, dass die Einspritzdauer im Mittel um 14 % verlängert werden muss, um eine Korrektur der modellierten Leistung zu erreichen. In Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15 sind die Ergebnisse für die Leistungsabweichung zwischen der modellierten und effektiven Leistung sowie ein Vergleich von AGR-Rate, Stickoxid- und Partikelemissionen für D100 und „R100 mit 14 %-Zeitkorrektur“ zu sehen.

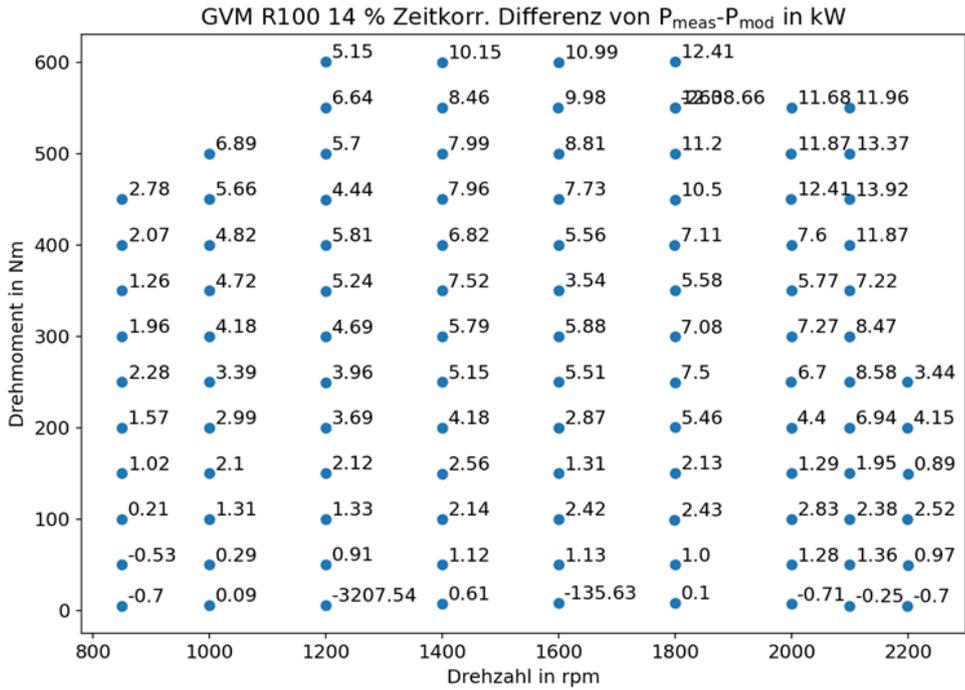


Abbildung 12: Vergleich der effektiven und modellierten Leistung mit R100 und 14 %-Korrektur der Einspritzzeit; Angaben in kW

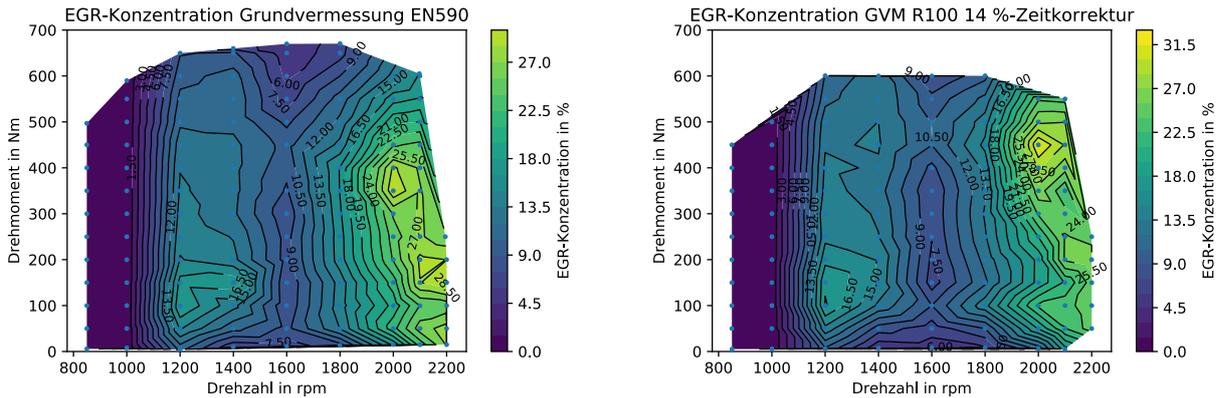


Abbildung 13: Vergleich der AGR-Konzentration zwischen der Grundvermessung von D100 und R100 mit 14 %-Zeitkorrektur

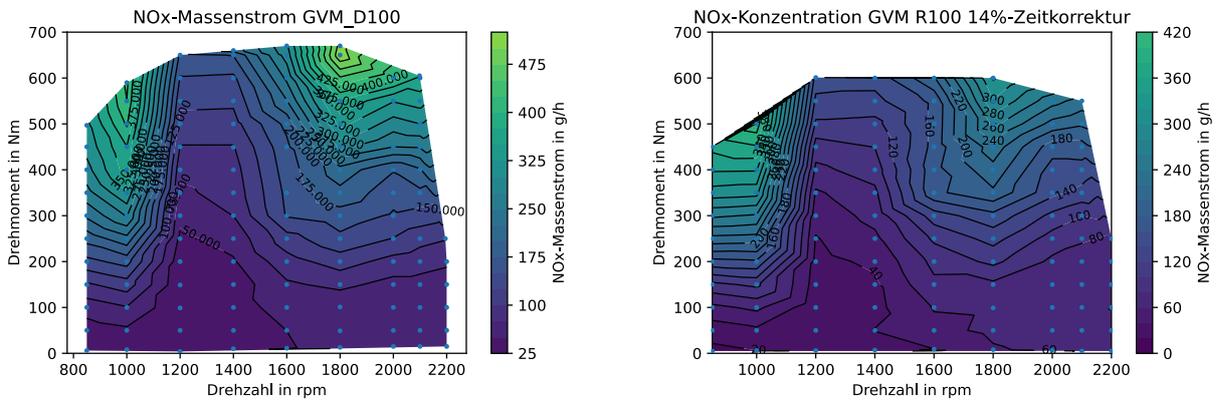


Abbildung 14: Vergleich der NOx-Emission zwischen der Grundvermessung von D100 und R100 mit 14 %-Zeitkorrektur

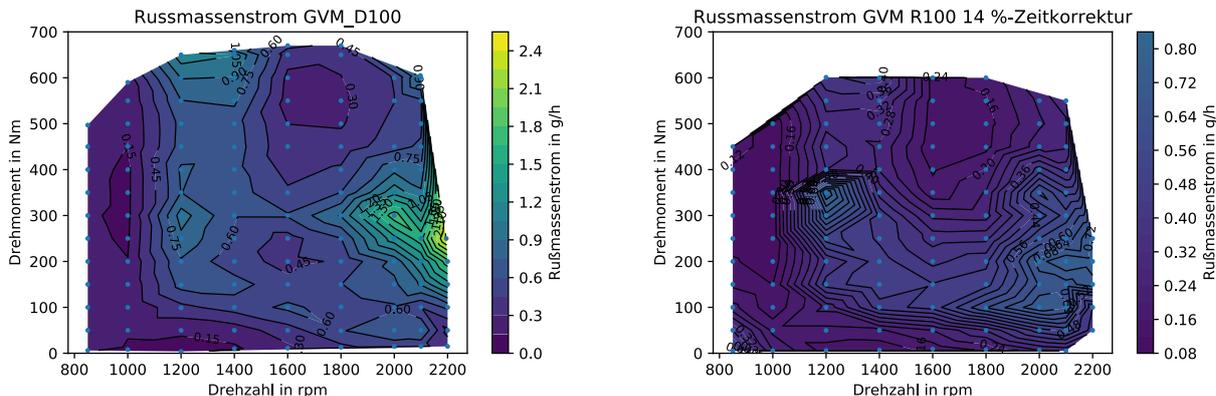


Abbildung 15: Vergleich der PM-Emission zwischen der Grundvermessung von D100 und R100 mit 14 %-Zeitkorrektur

Wie Abbildung 12 zeigt, wird mit dem 14 %-Zeitaufschlag die modellierte Leistung zu stark korrigiert, sodass diese nun zu gering ist im Vergleich zur tatsächlichen effektiven Leistung. Bei der Betrachtung der AGR-Rate wird deutlich, dass diese Überkompensation der Leistungskorrektur zu erhöhten AGR-Raten bei höherer Last führt. Dies begünstigt die Unterdrückung von NO_x-Emissionen, sodass diese im Vergleich zur Verwendung von D100 reduziert sind. Anhand der PM-Emissionen zeigt sich, dass die geringere Neigung zur Rußbildung von R100 dazu führt, dass die Rußemission mit R100 trotz der höheren AGR-Raten geringer ausfällt als die Rußemission bei Verwendung von D100. Der NO_x-Ruß-Trade-Off von R100 ist somit weniger stark ausgeprägt und somit günstiger als der von D100.

Zur Verfeinerung der Leistungskorrektur wurde das gesamte Raildruck-Einspritzmengen-Kennfeld mit R100 nachgemessen und ein neues zeitkorrigiertes Kennfeld erstellt. Im Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld wurde die Leistungskorrektur entlang von Linien konstanten Raildrucks überprüft. Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse für das sich ergebende Einspritzkennfeld.

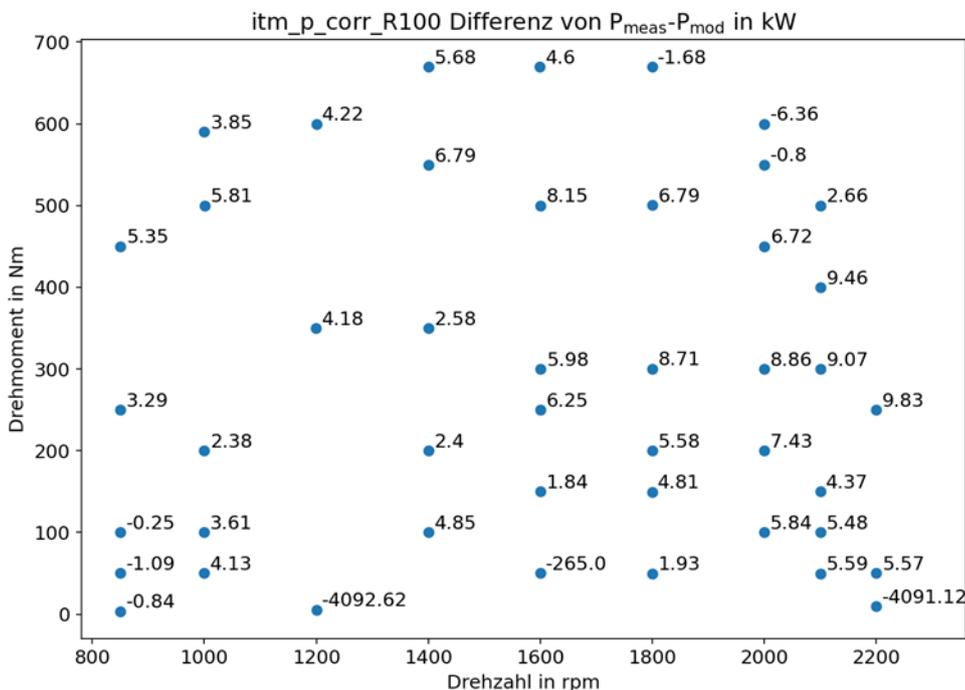


Abbildung 16: Leistungskorrektur nach Vermessung Einspritzkennfeld

Wie der Vergleich mit Abbildung 10 zeigt, kann durch die Vermessung des Einspritzkennfelds der Fehler der Überkompensation in hohen Lasten und besonders im unteren rechten Kennfeldbereich reduziert werden. In den übrigen unteren Lasten bei mittleren Drehzahlbereich findet eine stärkere Überkompensation als mit der 14 %-Zeitkorrektur statt. Ebenfalls auffällig ist die Messung bei 2000 rpm und maximalem Drehmoment. Hier übersteigt die modellierte Leistung nach wie vor die effektive Leistung. Da in diesem Betriebspunkt ein Raildruck zwischen 210 MPa und 220 MPa vorgegeben ist, wird zwischen den betreffenden Spalten im Einspritzkennfeld interpoliert. Der Raildruck von 220 MPa lässt sich am Motor jedoch nicht einstellen, weshalb für diese Spalte keine Korrektur vorgenommen werden konnte. Zur weiteren Verbesserung des Ansatzes zur

Leistungskorrektur über das Motorkennfeld, wurden Polynomregressionen genutzt, um Abweichungen im Raildruck zu korrigieren. Diese bewirkten jedoch keine signifikanten Änderungen der Zellwerte gegenüber der Korrektur entlang des konstanten Raildrucks.

Kraftstoffmischungsspezifische Eigenschaften in der Verbrennung

Um mögliche Emissionsminderungspotentiale oder Verbrennungseigenschaften der Kraftstoffe und Kraftstoffmischungen bewerten zu können, eignet sich die Nutzung der vorbedateten Motorkennfelder des John Deere Steuergeräts nicht. Da in der Serienmotorsteuerung komplexe Modelle oder Kennfelder zur Regelung und Steuerung von Funktionen eingesetzt werden, ist nicht gewährleistet, dass Betriebspunkte und Messungen ausreichend reproduziert werden können, wenn der Motor anhand äußerer Einflüsse eine eigene Bedatung vornimmt. Als Beispiel dient hier die Abweichung der modellierten Leistung wie diese im Kapitel „Kennfeldbasierte Messungen zu Emissionen und Kraftstoffeinflüsse auf Motorsteuerungsmodelle“ beschrieben wird.

Daher wurde die Messungen zur Emission und den Verbrennungseigenschaften der Kraftstoffmischungen an einem Betriebspunkt repräsentativ durchgeführt. Dabei wurden die Regelgrößen des Motors, Einspritzzeitpunkte und -mengen, Drosselklappenposition, AGR-Rate und Einspritzdruck durch manuelle Vorgaben auf Fest- oder Messwerte geregelt. Durch die Variation dieser Parameter, lassen sich grundsätzliche Eigenschaften der Kraftstoffe ermitteln. Am Beispiel von 1600 rpm und 350 Nm wurde die AGR-Verträglichkeit der Kraftstoffmischungen untersucht. Abbildung 17 zeigt den NO_x-Partikel-Trade-Off der Kraftstoffmischungen.

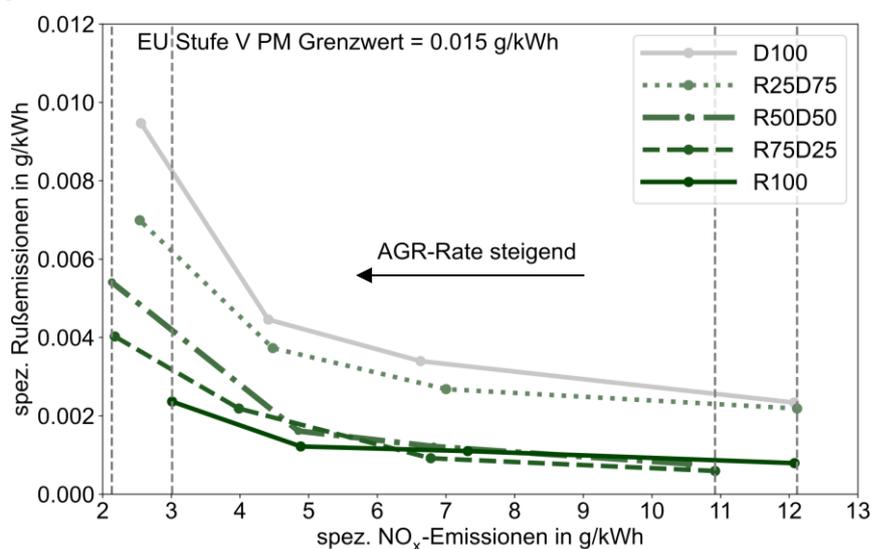


Abbildung 17: NO_x-Partikel-Trade-Off der Kraftstoffmischungen bei AGR-Variation am Betriebspunkt von 1600 rpm und 350 Nm

Die Messpunkte sind in AGR-Raten von 0, 5, 10 und 15 % aufgeteilt. Die AGR-Rate steigt dabei von rechts nach links an. Dadurch sinken die NO_x-Emissionen und die Ruß-Emissionen steigen. Dieses Gefälle beschreibt den NO_x-Ruß-Trade-Off. Mit steigendem Rapsölanteil sinken die Kurven ab, was die geringere Neigung zur Rußbildung von Rapsöl zeigt. Für AGR-Raten von bis zu 10 % lässt sich keine signifikante Änderung der Rußemission bei Kraftstoffmischungen von mindestens 50 % Rapsölanteil erkennen. Erst bei der EGR-Rate von 15 % steigt die Rußemission deutlich an. Da im Bereich zwischen 10 und 15 % AGR-Rate bei allen Kraftstoffen, insbesondere bei D100, eine progressive Zunahme der Rußemissionen stattfindet, liegt die Serienapplikation des Basismotors dazwischen. Mit steigendem Rapsölanteil fällt die Zunahme dem Rapsölanteil entsprechend geringer aus. Aus der Literatur ist bekannt, dass Rapsölkraftstoff zu einer stärkeren Bildung von NO_x-Emissionen neigt, dies wird auf die geringere Cetanzahl und den damit vergrößerten Zündverzug von Rapsöl zurückgeführt. Dadurch steigt der Anteil der vorgemischten Verbrennung, was zu größeren Druckgradienten und damit höheren lokalen Verbrennungsspitzentemperaturen führt. Die Betrachtung von Messungen konstanter AGR-Raten bestätigt dies für R100 im Vergleich zu D100. Durch die Beimischung von Dieselkraftstoff zum Rapsöl kann dieser Zündverzug reduziert werden und durch die geringere Energiedichte wird die Brenndauer mit Rapsöl verlängert. Dadurch lässt sich mit den Mischungen R50D50 und R75D25 nicht nur eine Reduzierung der Stickoxidemissionen im Vergleich zu R100 bewirken, sondern auch eine Reduzierung der Stickoxidemissionen im Vergleich zu D100 und R25D75.

Tabelle 3 zeigt einen numerischen Vergleich unterschiedlicher Messpunkte/ Parametervariationen der R100-AGR-Variation mit der Messung des Ausgangszustands mit D100. Dabei sind der spezifische Verbrauch, der effektive Wirkungsgrad, die spezifische Stickoxidemission, die spezifische Rußemission sowie die SCR-Einlasstemperatur aufgeführt, da diese insbesondere bei niedrigen Temperaturen entscheidend für die möglich NO_x-Konvertierungsrate ist. Für diesen Betriebspunkt konnte keine Parametervariation mit D100 gefunden werden, die eine signifikante Verbesserung in den drei Größen NO_x-Emission, Ruß-Emission und eff. Wirkungsgrad gegenüber dem Ausgangszustand bewirkt.

Tabelle 3: Vgl. der Bestpunkte der AGR-Variation mit R100 in Bezug auf die D100 Basis Applikation

Messpunktname		spez. Verbrauch in g/kWh	eff. Wirkungsgrad in %	NO _x in g/kWh	Ruß in g/kWh	T_SCR_in in °C	
1600_350	D100	221	38,1	6,36	0,0045	247,3	
1600_350_100_15_7-7_166	R100	246	39,55	4,84	0,0024	243,1	bester spezifischer Verbrauch
1600_350_100_10_4-7_166	R100	253	37,8	6,3	0,0014	231,5	NO _x -Niveau von D100
1600_350_55_23_4-7_156	R100	255	37,5	1,29	0,0153	301,6	min. NO _x -Emission
1600_350_55_20_4-7_176	R100	250	38,2	2,29	0,0045	270,2	Ruß-Niveau von D100

Insbesondere der Messpunkt für den besten spezifischen Verbrauch zeigt die Vorteile des Rapsölkraftstoffs gegenüber der Verwendung von Dieselmotorkraftstoff. Dabei wurden ein früherer Einspritzzeitpunkt und ein höherer Einspritzdruck gewählt. Der Brennbeginn, die Brenndauer und die Verbrennungsschwerpunktlage sind fast gleich zu D100. Durch die höhere AGR-Rate sinkt die Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslasskanal, was eine Reduzierung der Ladungswechselerbeit zur Folge hat. Die gesteigerte AGR-Rate bewirkt neben der Entdrosselung eine Reduzierung der Stickoxidemissionen um ca. 25 % bei 50 % Rußemission. Dabei wird die Abgastemperatur nur geringfügig gesenkt. Bei gleichem Niveau der Stickoxidemission wird der effektive Wirkungsgrad gesenkt, da die Vorteile durch die höhere AGR-Rate wegefallen und gleichzeitig die Verbrennungsschwerpunktlage sich verschlechtert. Einziger Vorteil ist eine Rußemission die nur etwa 25 % der Rußemission von D100 entspricht. Eine Minimierung der Stickoxidemissionen führt zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrads aufgrund schlechterer Verbrennungsrandbedingungen, sowie einer späteren Verbrennungsschwerpunktlage. Die Entdrosselung durch 23 % AGR-Rate hat damit keine positiven Auswirkungen auf den effektiven Wirkungsgrad, dahingegen ist jedoch eine 2,5-fache Rußemission die Folge. Im Kontrast dazu steht der Betriebspunkt mit gleicher Rußemission wie D100. Hier kann durch 20 % AGR-Rate die Entdrosselung dazu beitragen, keine Einbußen im effektiven Wirkungsgrad zu erzielen und dabei die Stickoxidemission auf 36,5 % des Ausgangswerts von D100 zu reduzieren. Zusätzlich wird eine Abgastemperatursteigerung am SCR-Katalysator von 30 K bewirkt.

Dieser Vergleich steht exemplarisch für R100. Bei Betrachtung von Abbildung 17 und Tabelle 3 wird deutlich, dass diese Kraftstoffvorteile auch für die Beimischung von Rapsöl zu Dieselmotorkraftstoff gültig sind, insbesondere bei höherem Rapsölanteil. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen dies für alle Kraftstoffmischungen in diesem Betriebspunkt.

1.3.5 Entwicklung kraftstoffspezifischer, motorischer Operationen

1.3.5.1 Dieselpartikelfilterregenerationsstrategie bei Nulllast

Bei einer konventionellen aktiven Dieselpartikelfilterregeneration (DPF) werden Kohlenwasserstoffe (HC) über zusätzliche Einspritzungen ins Abgas eingebracht. Diese werden im Dieseloxydationskatalysator (DOC) in einer exothermen Reaktion oxidiert, sodass die Temperatur des nachgeschalteten DPF die Zündtemperatur des eingelagerten Rußes übersteigt. Da bei einer Nacheinspritzung von Kraftstoff in den Ausschietbetakt des Motors das Temperaturniveau im Brennraum und die vorhandene thermische Energie zu gering sind, um Rapsöl zur Verdampfung zu bringen, benetzt das flüssige Rapsöl die Brennraumwand, und wird weiter über die Kolbenringe in die Ölwanne eingetragen. Daher ist es notwendig, zur DPF-Regeneration mit Rapsöl geeignete motorische Parameter zu finden, um diese Motorölverdünnung zu verhindern. Die folgende Untersuchung befasst sich mit einer geeigneten Strategie zur Regeneration mit Rapsöl. In vorangehenden Untersuchungen konnte diese Problematik nur durch den Verbau zusätzlicher Hardware gelöst werden [4].

In einem ersten Schritt wurden Voruntersuchungen zu einer möglichen Regenerationsstrategie unter Verwendung von Dieselmotorkraftstoff durchgeführt. Diese Untersuchungen dienten dem Systemverständnis und zeigten, dass für eine Abgastemperatursteigerung die Verstellung der Drosselklappe und die Spätverstellung der Verbrennung am vielversprechendsten sind. Daher wurde der Einfluss der Drosselklappenstellung sowie einer späten Verbrennungsschwerpunktlage auf die Abgastemperatur und das Regenerationspotential des DPF untersucht. Tabelle 4 zeigt die Nomenklatur der untersuchten Kraftstoffmischungen:

Tabelle 4: Untersuchte Kraftstoffmischungen

Bezeichnung der Kraftstoffmischung	Beschreibung
D100	100 % (m/m) Dieseldieselkraftstoff; Standard DIN EN590: 93 % (m/m) fossiler Dieseldieselkraftstoff, 7 % (m/m) Biodiesel
R25_D75	25 % (m/m) Rapsöl (DIN 51605) und 75 % (m/m) Dieseldieselkraftstoff (DIN EN 590)
R50_D50	50 % (m/m) Rapsöl (DIN 51605) und 50 % (m/m) Dieseldieselkraftstoff (DIN EN 590)
R75_D25	75 % (m/m) Rapsöl (DIN 51605) und 25 % (m/m) Dieseldieselkraftstoff (DIN EN 590)
R100	100 % (m/m) Rapsöl (DIN 51605)

Mit diesen Kraftstoffen wurden folgende Parametervariationen durchgeführt (Tabelle 5):

Tabelle 5: Nomenklatur der motorischen Maßnahmen zur Abgastemperatursteigerung

Parametervariation	Beschreibung
Basis Applikation	Vermessung der Basisapplikation
AGR deaktiviert	Deaktivierung der externen AGR; zum Ausschluss des Einflusses von AGR wurden alle weiteren Untersuchungen mit geschlossenem AGR-Ventil durchgeführt
Drosselung	Minimierung der Drosselklappenposition; minimale Position wurde über einen signifikanten Anstieg der Rußemission festgelegt
späte Haupteinspr.	Späte Einfacheinspritzung
Voreinspr. + späte Haupteinspr.	Einfache Voreinspritzung mit später Haupteinspritzung
doppelte Voreinspr. + späte Haupteinspr.	Doppelte Voreinspritzung mit später Haupteinspritzung
Drosselung + späte Haupteinspr.	Minimale Drosselklappenposition mit später einfacher Einspritzung
Drosselung + Voreinspr. + späte Haupteinspr.	Minimale Drosselklappenposition mit einfacher Voreinspritzung und später Haupteinspritzung
Drosselung + doppelte Voreinspr. + späte Haupteinspr.	Minimale Drosselklappenposition mit doppelter Voreinspritzung und später Haupteinspritzung

Die Untersuchung zur Regenerationsstrategie wird mit deaktivierter externer AGR durchgeführt. Den Einfluss der externen AGR auf die Abgastemperatur zeigt Abbildung 18.

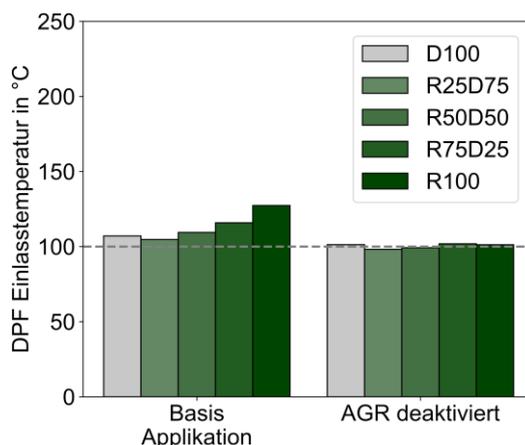


Abbildung 18: Vergleich der Abgastemperatur vor DPF zwischen der Grundparametrierung und deaktivierter AGR für alle untersuchten Kraftstoffmischungen

Wie zu sehen ist, steigt die Abgastemperatur der Grundparametrierung mit steigendem Rapsölanteil an. Durch den steigenden Rapsölanteil ändert sich die Energiedichte der eingebrachten Kraftstoffmasse, was zu einer Änderung des von der Motorsteuerung aufgrund der dort hinterlegten Modelle angenommenen Betriebspunktes und in der Folge zu einer höheren AGR-Rate führt. Wie Abbildung 18 zeigt, wird durch die Deaktivierung der externen AGR ein einheitliches Abgastemperaturniveau erreicht, welches leicht niedriger als das Ausgangsniveau ist. Die externe AGR blieb deshalb für die nachfolgenden systematischen Untersuchungen deaktiviert, um die zusätzliche Beeinflussung der Verbrennung durch AGR auszuschließen.

Mit den eingeführten Maßnahmen ergeben sich Abgastemperaturen von bis zu 500°C für alle Kraftstoffmischungen bei gleichbleibend stabilem Motorbetrieb. Einen Überblick über die Ergebnisse zeigt Abbildung 19.

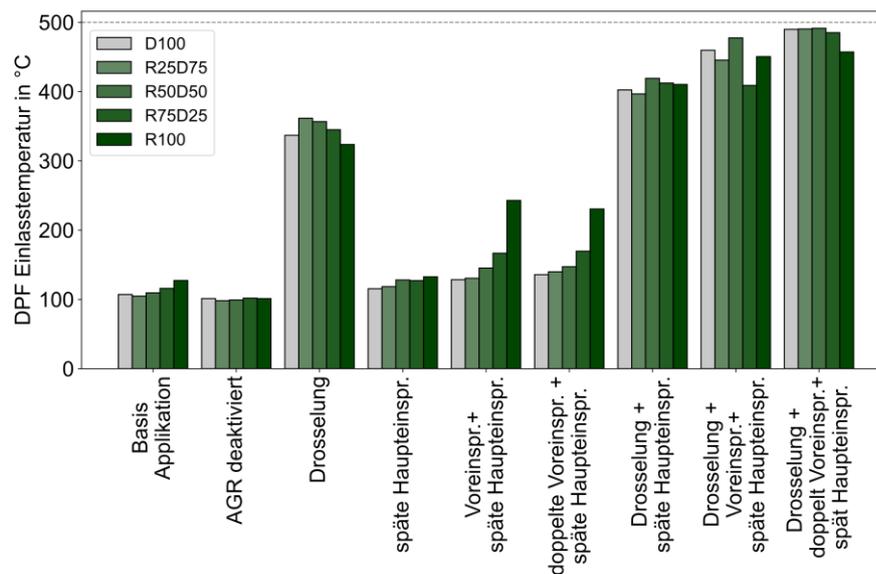


Abbildung 19: Überblick der erreichten Abgastemperaturen vor DPF für alle untersuchten Maßnahmen

Zur Bewertung der Ergebnisse ist eine Einteilung der Maßnahmen in zwei Bereiche sinnvoll. Dabei werden die einzelnen Maßnahmen (Drosselung; späte Haupteinspr.; Voreinspr. + späte Haupteinspr.; doppelte Voreinspr. + späte Haupteinspr.) von den kombinierten Maßnahmen (Drosselung + späte Haupteinspr.; Drosselung + Voreinspr. + späte Haupteinspr.; Drosselung + doppelte Voreinspr. + späte Haupteinspr.) getrennt betrachtet.

Von den einzelnen Maßnahmen führt ein Schließen der Drosselklappe zum größten Temperaturanstieg, da der Luftmassenstrom des Motors begrenzt und dadurch die thermische Masse des Abgases reduziert wird. Beim Spätverstellen der Verbrennung wurde der ursprüngliche Ansatz einer Schwerpunktlagenregelung, welche auf die Abgastemperatur referenziert, verworfen. Bei diesem Leerlaufbetriebspunkt mit erhöhter Drehzahl kann die Abgastemperatur durch eine späte Schwerpunkt Lage nicht beliebig gesteigert werden, ohne dass dies vorher zum Aussetzen der Verbrennung führt. Daher beschränkt sich die Spätverstellung der Verbrennung auf den spätestmöglichen Beginn der Haupteinspritzung.

Die Abgastemperaturen, welche durch die einzelnen Maßnahmen erreicht werden, sind aufgrund zu geringer resultierender Oxidationsraten nicht ausreichend für die Durchführung einer DPF-Regeneration. Durch die Kombination der reduzierten Abgasmasse mit der späten Verbrennung, steigt der Einfluss der späten Verbrennung auf die Abgastemperatur, sodass bis zu 500 °C erreicht werden.

Mit der ermittelten Parametrierung zur Erreichung von 500 °C am DPF-Einlass wurde ein Regenerationstest unternommen. Dazu wurde der Motor zunächst über eine Stunde hinweg bei Nennleistung betrieben, um maximale Abgastemperaturen zu erreichen und hiermit den Partikelfilter vollständig zu regenerieren. Anschließend wurde ein Betriebspunkt bei 1800 rpm und 0 Nm (d. h. Leerlauf bei erhöhter Drehzahl, sog. „High Idle“) bei Standardparametrierung mit R100 als Referenzpunkt genutzt, um die Druckdifferenz über den Partikelfilter zu bestimmen. Diese betrug ca. 7 mbar. Zur Beladung des Partikelfilters mit Ruß wurde ein vertrimmter Datensatz generiert, welcher es ermöglichte, innerhalb von 4 h eine theoretische Filterbeladung von 4-5 g_{Ruß}/l zu erzeugen. Um den Einfluss der kontinuierlichen Regeneration auf die Rußbeladung zu minimieren, wurde die DPF-Einlasstemperatur auf unter 220 °C begrenzt. Für die Filterbeladung von 4-5 g/l ergab sich im Referenzpunkt eine Druckdifferenz über den Partikelfilter von ca. 60 mbar. Mit diesen Anfangsbedingungen wurde der Regenerationstest gestartet. Den Ablauf dieses Tests zeigt Abbildung 20.

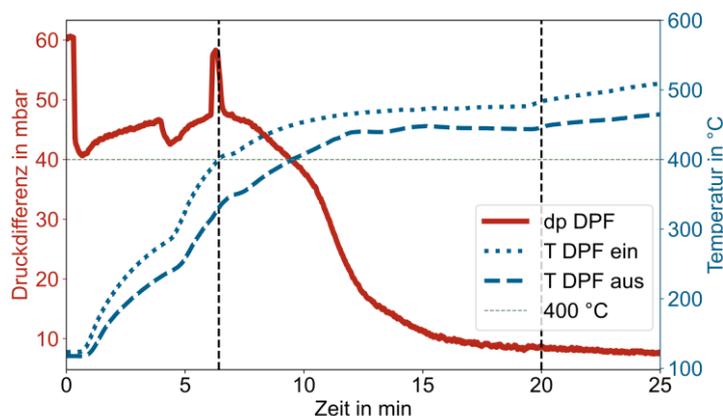


Abbildung 20: Verlauf des Regenerationstests mit R100

Das Diagramm zeigt den Verlauf der Druckdifferenz über den DPF sowie die DPF-Ein- und Auslasstemperatur während des Tests. Der Test startet mit dem Anfahren des Referenzpunktes und einer Druckdifferenz von 60 mbar. Danach wurde die externe AGR geschlossen und die minimale Drosselklappenposition eingestellt, was zu einem Absinken der Druckdifferenz über den DPF und einem Anstieg der Temperatur führte. Mit steigender Abgastemperatur steigt auch die Raumgeschwindigkeit, was die Druckdifferenz wieder vergrößert. Nach ca. 4,5 min wurde die Parametrierung von „doppelte Voreinspr.+ späte Haupteinspr.“ übernommen, sodass eine Steigerung des Temperaturgradienten erfolgte. In der 7. Minute nach Testbeginn führte die Motorsteuerung eine Nachjustierung der Drosselklappenposition durch, weshalb diese nachfolgend wieder manuell korrigiert werden musste. Kurz danach überschreitet die DPF-Einlasstemperatur 420 °C und die Druckdifferenz über den Partikelfilter beginnt zu sinken. Dies belegt die Oxidation des zuvor eingelagerten Rußes. Nach ca. 20 min erreicht die Druckdifferenz nahezu stationäre Bedingungen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass kein weiterer Ruß mehr oxidiert wird. Zu keinem Zeitpunkt überstieg die DPF-Auslasstemperatur die Einlasstemperatur. Damit kann ein Zünden des Rußes ausgeschlossen werden. Das anschließende Ansteuern des Referenzpunktes zeigt eine Druckdifferenz von ca. 6 mbar.

Wie zuvor erläutert, führt die konventionelle Regeneration des DPF bei Verwendung von Rapsöl zu einer signifikanten Verdünnung des Motoröls mit Kraftstoff. Daher wurde bei der zuvor beschriebenen Versuchsreihe in diskreten Zeitintervallen die Motorölqualität bestimmt. In Abbildung 21 ist der hieraus ermittelte Verlauf des Rapsölanteils im Motoröl während der Versuchsreihe zu sehen.

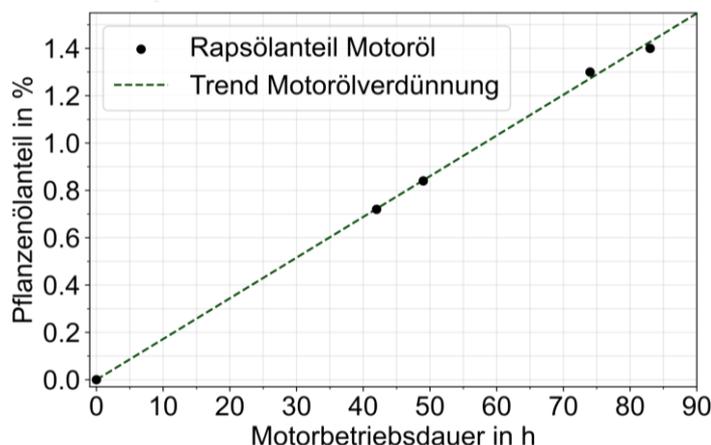


Abbildung 21: Volumetrischer Rapsölanteil im Motoröl über die Versuchsreihe

Die Betriebsstunden in Abbildung 21 beziehen sich ausschließlich auf den Betrieb mit Rapsöl bzw. Rapsölmischungen zwischen dem Motorölwechsel und Abschluss des Regenerationstests. Bei Analysewerten mit einem Rapsölanteil < 1 % im Motoröl wurde dieser Anteil nicht absolut bestimmt, sondern nur mit der Angabe „vorhanden aber < 1 %“ vom externen Dienstleister für die Ölanalyse an uns übermittelt. Der erste Messpunkt bezieht sich deshalb auf den Ausgangszustand vor der ersten Verwendung von Rapsöl, der zweite Messpunkt auf die Grundvermessung mit Rapsöl, und der dritte Punkt beschreibt die Verdünnung während der High-Idle-Applikation mit R100. Die vierte Messung wurde nach der Applikation von R75_D25 durchgeführt. Zusätzlich zur Applikation der High-Idle-Regeneration mit R75_D25 wurden weitere Tests mit Rapsölkraftstoff durchgeführt (deren Ergebnisse werden weiter unten in diesem Dokument erläutert) und weiterhin die Entwicklung der Motorölqualität überwacht. Die folgende Messung war die erste Probe mit einer absoluten Angabe der Motorölverdünnung, in diesem Fall von 1,3 %. Der fünfte und letzte Messpunkt

beschreibt die Motorölverdünnung resultierend aus den Applikationsarbeiten mit R50_D50 und R25_D75 sowie aus dem Regenerationstest. Im Ergebnis erhöht sich die Motorölverdünnung auf 1,4 %.

Bezieht man die durchschnittliche Motorölverdünnung auf die 30 Minuten des Regenerationstests, ist davon auszugehen, dass die Verdünnung während einer konventionellen Regeneration mit Dieselkraftstoff typischerweise 0,02 %/h beträgt. Die konventionelle Regeneration mit Rapsöl wurde in einer zurückliegenden Dissertation untersucht [4]. Die Ergebnisse zeigen eine Motorölverdünnung von 4 %/h. Durch die von der TUK entwickelte Regenerationsstrategie kann die Motorölverdünnung während dieser Zeit um 99,5 % reduziert werden.

1.3.5.2 Untersuchung der DPF-Regenerationsstrategie im Teillastbetrieb

Um den praktischen Nutzen der Regeneration zu steigern, ist das Ziel eine Möglichkeit zur Regeneration während des normalen Fahrzeuggebrauchs zu schaffen. Dazu sollte diese vom Fahrer unbemerkt, während der Fahrzeugnutzung erfolgen. Die gewonnenen Erkenntnisse der High-Idle-Regeneration wurden in Teillastbetriebspunkte übertragen, um zu überprüfen, ob es in beliebigen Betriebspunkten höherer Last, möglich ist, zur Regeneration ausreichende Abgastemperaturen zu erzeugen, ohne auf eine konventionelle Nacheinspritzung zur Regeneration zurückzugreifen.

Dazu wurden die Betriebspunkte bei 1800 rpm mit 50 Nm, 100 Nm und 200 Nm, bei Verwendung von R100, untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Last die Variationsmöglichkeiten innermotorischer Stellgrößen sinkt, da mehr Kraftstoff zur Laststeigerung und damit auch mehr Luft zur Verbrennung benötigt wird. Als Folge sind die Abgastemperaturen im Auslasskrümmer bereits gesteigert. Daher ist eine Spätverstellung der Verbrennung nur in begrenztem Maße sinnvoll, um die Grenztemperatur im Abgaskrümmer nicht zu überschreiten. Durch den größeren Luftbedarf und die höheren Ladedrücke bei größeren Lasten, reagiert die Verbrennung sensitiver auf Änderungen der Drosselklappenposition, so dass mehr Abstand zu bauteilkritischen Grenztemperaturen eingehalten werden muss. Tabelle 6 zeigt die untersuchten innermotorischen Maßnahmen jedes Betriebspunkts für die Teillastregeneration bei 1800 rpm.

Tabelle 6: Untersuchte innermotorische Maßnahmen der Betriebspunkte in der Teillastregeneration

Parametervariation	50 Nm	100 Nm	200 Nm
Basis Applikation	x	x	x
AGR deaktiviert	x	x	x
Drosselung	x	x	x
späte Haupteinspr.	x	x	x
Voreinspr. + späte Haupteinspr.	x	x	x
doppelte Voreinspr. + späte Haupteinspr.	x		
Drosselung + späte Haupteinspr.			
Drosselung + Voreinspr. + späte Haupteinspr.	x		
Drosselung + doppelte Voreinspr. + späte Haupteinspr.			

Insbesondere die Lasten ab 100 Nm eignen sich nicht für eine Kombination von Drosselung und später Verbrennung, da durch die späte Energiefreisetzung, die Zyklusschwankungen der Verbrennung steigen. Weitere Verschlechterungen der Verbrennungsrandbedingungen, wie niedrigere Verdichtungs- endtemperaturen durch Drosseln führen zu einer signifikanten Steigerung des Zündverzugs, sodass die Verbrennung sich verschleppt und die zulässige Auslasstemperatur überschritten wird. Aufgrund der gesteigerten Motorlast kann die Haupteinspritzung nicht so spät nach OT erfolgen, dass eine doppelte Voreinspritzung zur Kompensation der Wandwärmeverlust sinnvoll ist. Daher wurde diese Maßnahme ebenfalls nicht untersucht.

Bei 50 Nm wurde nur die kombinierte Maßnahme aus Drosselung mit einfacher Voreinspritzung und später Haupteinspritzung untersucht, da Voreinspritzung die Verdichtungs- endtemperatur anheben kann, um eine späte Verbrennung zu ermöglichen aber eine späte Verbrennung nicht so spät erfolgen konnte, dass eine doppelte Voreinspritzung möglich war.

Die so erreichten Spitzentemperaturen zeigt Abbildung 22 und stellt diese dem Ausgangszustand gegenüber.

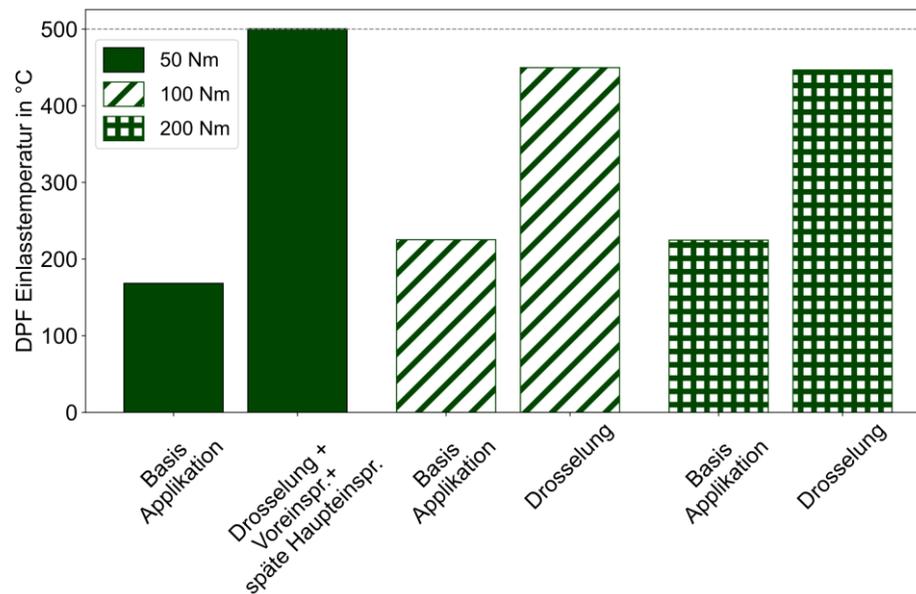


Abbildung 22: Spitzentemperaturen der Untersuchungen zur Regeneration in der Teillast am DPF-Einlass bei Verwendung von R100

Die Ergebnisse aus Abbildung 22 zeigen, dass sich mit den kombinierten Maßnahmen die höchsten Abgastemperaturen erreichen lassen, wobei bei den höheren Lasten bereits das Drosseln des Luftmassenstroms ausreicht, um Temperaturen, die sich zur Regeneration eignen, zu erreichen. Bei den gedrosselten Luftmassenströmen ist der begrenzende Faktor das Luft-Kraftstoff-Verhältnis, da eine ausreichende Sauerstoffmenge im Abgas vorhanden sein muss, damit eine Regeneration stattfinden kann. Mit einem Lambda von ca. 1,8-1,9, entspricht die Sauerstoffkonzentration im Abgas ca. 9-10 % (v/v). Damit ist noch ausreichend Sauerstoff im Abgas enthalten.

Da beim Vergleich zwischen der High-Idle-Regeneration und den Betrachtungen in Teillast unterschiedliche Verhalten in der Auswirkung der AGR-Deaktivierung festgestellt wurden, wurden die Auswirkungen der AGR-Abschaltung näher analysiert. Bei Nulllast führt eine Abschaltung der AGR zu einer Reduzierung der Abgastemperatur am DPF-Einlass. Im Vergleich dazu steigt die Abgastemperatur mit der AGR Abschaltung bei 50 Nm und 100 Nm sowohl im Auslasskrümmer als auch vor dem DPF. Im Betriebspunkt von 200 Nm steigt die Abgastemperatur im Auslasskrümmer ebenfalls, sinkt aber vor dem DPF. Damit lassen sich Betriebspunkte finden, bei denen AGR dazu führen kann, dass die Abgastemperatur gesteigert wird. Gründe hierfür sind die absolute Wärmekapazität der Frischladung auf der Einlassseite und die Enthalpieverluste des Abgases über die Turbolader auf der Auslassseite. Bei Nulllast wird durch heiße AGR ein Teil der kälteren Frischladung substituiert, sodass der Dichteunterschied bewirkt, dass die absolute Wärmekapazität des Gases im Zylinder sinkt. Bei den Lastpunkten von 50 Nm und 100 Nm ist die Arbeit der Turbolader relativ gering, sodass eine Steigerung der AGR-Rate bewirkt, dass die Wärmekapazität der Frischladung steigt und damit AGR zu einer Reduzierung der Abgastemperatur führt. Bei 200 Nm führt eine Steigerung der AGR-Rate zu einer Enddrosselung des Motors, sodass Frischladung durch AGR in einem Maß substituiert wird, dass die absolute Wärmekapazität der Frischladung im Zylinder nur geringfügig steigt, was zu der geringsten Senkung der Abgastemperatur im Auslasskrümmer führt. Gleichzeitig wird die Arbeit der Turbolader verringert, was zu einer Reduzierung der Enthalpieverluste des Gases über die Turbinen führt, sodass die Abgastemperatur am DPF steigt.

Um den Effekt von AGR auf die Abgastemperatur näher zu untersuchen, wurde ein 1D-Simulationmodell unter Verwendung des Programms GT Power erstellt. Abbildung 23 zeigt das Simulationsmodell zum MuSt5-Trak Motor.

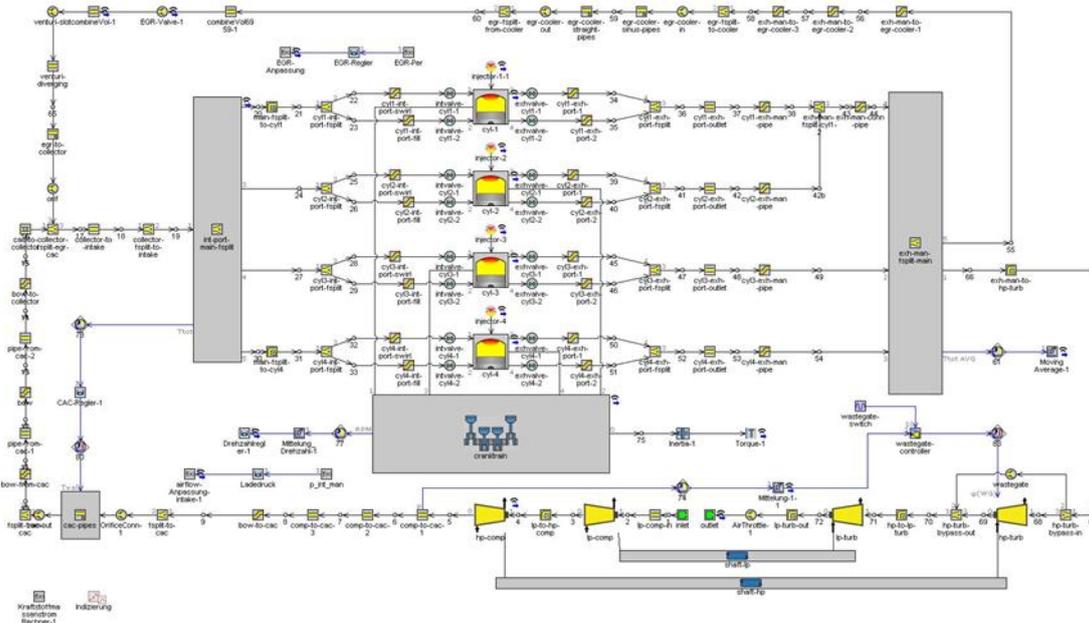


Abbildung 23: 1D-Simulationsmodell MuSt5-Trak Motor (GT Power)

Ziel der Simulation war es, neben der weiteren Optimierung der Abgastemperatur auch Verbrauchsreduzierungen durch eine Enddrosselung mittels AGR zu erzielen. Bei 50 Nm wird durch die Zugabe von AGR die Abgastemperatur an allen Messpunkten der Abgasnachbehandlung gesenkt. Bei 100 Nm sinken die Abgastemperaturen ebenfalls, jedoch wird auch gleichzeitig der Kraftstoffverbrauch reduziert. Insbesondere bei Drosselung verbessert dies den Wirkungsgrad der Temperatursteigerung. Die gleichzeitige Senkung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses bewirkt allerdings auch, dass nicht mehr genug Sauerstoff im Abgas vorhanden ist, sodass nicht davon ausgegangen werden kann, dass noch eine ausreichende Regeneration stattfinden kann. Mit 200 Nm und der Maßnahme Drosselung lässt sich eine Steigerung der Abgastemperatur bewirken, jedoch ist auch hier der resultierende Sauerstoffgehalt im Abgas zu gering für eine Regeneration.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass sich auch in der Teillast Betriebsstrategien finden lassen, die Abgastemperaturen ermöglichen, welche sich zur Regeneration des DPF eignen. Dabei nimmt der Kraftstoff an der Verbrennung teil und wird somit nicht in das Motoröl eingetragen. Da sich die steigende Last auf die Verbrennungsstabilität während der geänderten Verbrennungsrandbedingungen negativ auswirkt, sind zusätzliche Funktionen im Steuergerät unerlässlich, die kritische Größen überwachen und regeln. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn eine transiente Nutzung dieser Regenerationsstrategie gewünscht ist. Zusätzlich muss eine Applikation aller Betriebspunkte des Kennfelds erfolgen. Die 1D-Simulationen konnten somit belegen, dass der Verzicht auf die Nutzung von AGR während der Regeneration eine sinnvolle Maßnahme ist.

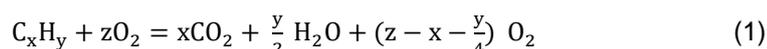
1.4 Kraftstoffdetektion

Im Projektverlauf wurden verschiedene Ansätze untersucht, wie der Kraftstoff im Tank ermittelt werden kann. Nachfolgend werden die Methoden im Einzelnen näher erläutert.

1.4.1 Kraftstoffdetektion auf Basis von Einspritzkennfeldern

Zur Entwicklung des Kraftstofferkennungsalgorithmus wurden am Motorenprüfstand der TUK unterschiedliche Versuchsreihen in Absprache mit John Deere durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Kraftstoffe in Reinform wie auch die Kraftstoffmischungen aus B0, B100 und R100, in 25 % (m/m) Abstufungen, vermessen. Während den Messungen wurde das Motorkennfeld in einem Raster von delta 200 rpm und delta 100 Nm abgefahren. Neben der Erfassung der motoreigenen Signale in Bezug auf die verwendete Kraftstoffmischung, wurden unter anderem Versuchsreihen zur Bestimmung der Vor- und Rücklaufmengen der Injektoren durchgeführt. Insgesamt beläuft sich diese Messreihe auf einen Umfang von 6924 Messungen. Die Messdaten wurden zur weiteren Verarbeitung an den Projektpartner John Deere übermittelt.

Die Basis für die Kraftstoffdetektion bildet ein Modell der vollständigen Verbrennung. Hierbei wird angenommen, dass der eingespritzte Kraftstoff vollständig zu CO_2 und H_2O oxidiert wird und der Kraftstoff vereinfacht aus H, C und O besteht (siehe Formel 1).



Wird nun anstatt Diesel die gleiche Masse Rapsöl in den Zylinder eingespritzt, steigt bei gleichem Luftmassenstrom der Sauerstoffanteil im Abgas, da der Luftbedarf von Rapsöl geringer ist. Der Luftbedarf für Diesel (B_0) beträgt 14,6 kg Luft pro kg Kraftstoff und für Rapsöl nur 12,5 kg/kg [5],[6]. Dies ist dem im Kraftstoff gebundenen Sauerstoff geschuldet, welcher definitionsgemäß nicht oxidiert werden kann.

Das Detektionsmodell berechnet, auf Basis der eingespritzten Kraftstoffmasse und dem gemessenen O_2 -Gehalt, das Mischungsverhältnis (w_D) zwischen Diesel und Rapsöl. Der Ablauf des Detektionsalgorithmus ist in Abbildung 24 dargestellt. Die einzelnen Teilbereiche werden in weiteren Abschnitten erläutert.

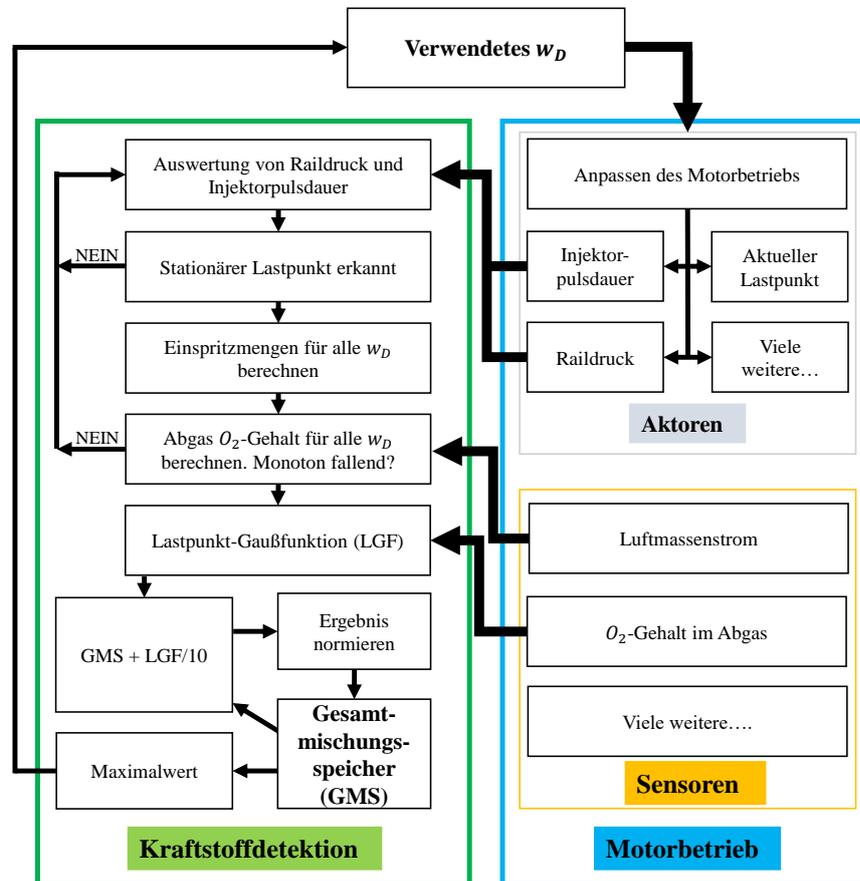


Abbildung 24: Modellübersicht Kraftstoffdetektion [7]

1.4.1.1 Berechnung der Einspritzmengen für alle Mischungsverhältnisse

Meistens wird bei Dieselmotoren die tatsächlich in den Zylinder eingespritzte Kraftstoffmasse nicht gemessen. Vielmehr wird diese über, auf dem Steuergerät hinterlegte, Einspritzkennfelder vorgesteuert. Auf Basis einer gewünschten Einspritzmasse ($m_{f,d}$) und dem aktuellen Raildruck (p_{rail}) wird über das Kennfeld die für diese Einspritzmasse notwendige Injektorimpulsdauer (IID) bestimmt.

Da die hinterlegten Einspritzkennfelder vom Injektorhersteller in der Regel nur für den Referenzkraftstoff Diesel bereitgestellt werden, führen verschiedene Kraftstoffe zu einer Abweichung der von der ECU geplanten Einspritzmenge. Folgen können unter anderem eine abweichende Leistung, ein verschobener Verbrennungsschwerpunkt oder ein schlechter Motorstart sein.

Da für die Kraftstoffdetektion auf Basis des O_2 -Gehalt die eingespritzte Kraftstoffmasse einen entscheidenden Einfluss hat, wurden für fünf verschiedene w_D (0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Dieselanteil) die Einspritzkennfelder erstellt. Die grundlegenden Untersuchungen hierzu wurden am Motorenprüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt. Diese Kennfelder sind ebenfalls die Basis, um die Leistung bei der Verwendung verschiedener Kraftstoffmischungen abzustimmen.

Wie in Abbildung 25 zu sehen, ist bei 30°C warmem Rapsölkraftstoff die eingespritzte Kraftstoffmasse bei gleicher IID und gleichem p_{rail} in weiten Teilen des Kennfeldes deutlich höher als im Dieselmotorbetrieb. Der generelle Verlauf ähnelt sich jedoch stark für die beiden Kraftstoffe.

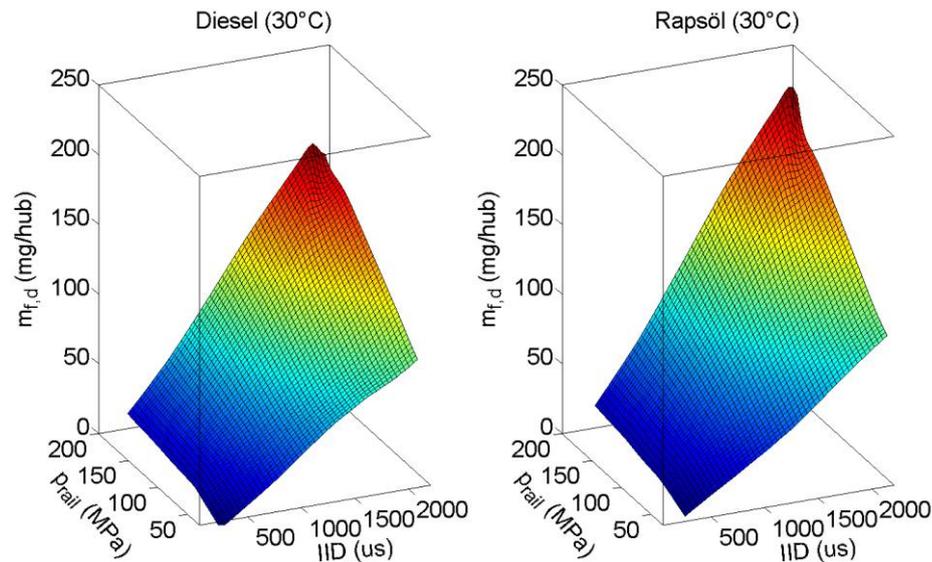


Abbildung 25: Einspritzkennfelder für Diesel- und Rapsöl-Kraftstoff [7]

Hierbei ist zu beachten, dass es je nach Temperatur auch einen umgekehrten Effekt geben kann. Bei kalten Kraftstofftemperaturen kann die eingespritzte Kraftstoffmasse im Rapsölbetrieb stark abnehmen. Bei sehr kalten Temperaturen ($<-5^{\circ}\text{C}$) ist die Kraftstoffmasse im Rapsölbetrieb nur sehr schwierig über Kennfelder bestimmbar. So kann es beim Startvorgang vorkommen, dass einzelne Injektoren geschlossen bleiben (keinen Kraftstoff einspritzen) und andere Injektoren öffnen. Das führt im Winter in den ersten Sekunden dazu, dass der Motor nicht auf allen Zylindern zündet.

Da der verwendete O_2 -Sensor eine bestimmte Mindesttemperatur benötigt kann eine Kraftstoffdetektion über den O_2 -Sensor bei Kaltstartvorgängen ohnehin nicht durchgeführt werden. Um den Applikationsaufwand zu minimieren, wird sich in dem vorgestellten Detektionsmodell auf Lastpunkte mit betriebswarmem Motor beschränkt.

1.4.1.2 Berechnung des theoretischen O_2 -Gehalts im Abgas für alle w_D

Nachdem der Motor betriebswarm ist, werden kontinuierlich Messwerte aufgenommen und gespeichert. Wenn p_{rail} und die IID für mindestens 10 Sekunden um weniger als $\pm 2,5\%$ schwanken wird nach Verlassen des quasi-stationären Lastpunktes die Datenaufnahme gestoppt und der Lastpunkt ausgewertet.

Der Grund nur (quasi)-stationäre Lastpunkte auszuwerten ist die lange Totzeit zwischen der Verbrennung und gemessenem O_2 Wert, da sich die NO_x -Sensoren verhältnismäßig weit entfernt vom Zylinder im Abgasstrang befinden. Des Weiteren können bei der Auswertung p_{rail} , IID, Luftmassenstrom und O_2 Wert gemittelt werden, sodass Messrauschen herausgefiltert wird. Die Einspritzmenge wird im Anschluss für alle w_D zwischen 0 und 100 % Diesel über die hinterlegten Kennfelder berechnet und gespeichert. Mit Hilfe des gemittelten Luftmassenstroms im betrachteten stationären Lastpunkt wird zusammen mit der jeweiligen Einspritzmenge ein Sauerstoffgehalt im Abgas für alle w_D zwischen 0 und 100 % Diesel berechnet. Dieser Sauerstoffgehalt ist ein theoretischer Wert, welcher im Abgas anliegen würde, wenn das jeweilige w_D eingespritzt werden würde.

In bestimmten Lastpunkten fällt der theoretische Sauerstoffgehalt nicht proportional zum ansteigendem Dieselanteil im w_D (Siehe Abbildung 26). Dies führt dazu, dass der theoretische Sauerstoffbedarf für verschiedene w_D gleiche Werte annehmen kann. Gleiche theoretische Sauerstoffwerte im Abgas führen dazu, dass kein eindeutiges w_D über den Sauerstoffgehalt bestimmt werden kann. Verstärkt wird dieser Effekt zusätzlich durch die Messungenauigkeit des O_2 Sensors (grauer Bereich in Abbildung 26), sodass es einen weiten Bereich von w_D gibt, welche den gemessenen O_2 Wert ergeben würden. In dem gezeigten Beispiel würde der theoretische Sauerstoffgehalt zwischen ca. 45-75 % Dieselanteil den gemessenen O_2 Wertebereich erfüllen.

1.4.1.4 Berechnen des Gesamtmischungsspeicher

Im Gesamtmischungsspeicher (GMS) ist die Information aller ausgewerteten Lastpunkte gespeichert. Der GMS besteht aus 101 Werten (0-100 % Diesel in 1 % Schritten) und der dazugehörigen Wahrscheinlichkeit für das jeweilige w_D . Da nur Diesel-Rapsölmischungen als Kraftstoff zugelassen werden beträgt die Gesamtwahrscheinlichkeit=1. Nach dem Auswerten eines stationären Lastpunktes wird der GMS aktualisiert.

Hierzu werden die Wahrscheinlichkeiten aus der LGF durch 10 geteilt und zur GMS addiert. Im Anschluss wird der GMS normiert, sodass die Gesamtwahrscheinlichkeit 1 beträgt. Das heißt eine neue ausgewertete Mischung hat eine 10 % Gewichtung auf den GMS. Für das Kraftstoff-Mischungsverhältnis, auf das die ECU den Motorbetrieb anpasst, wird das w_D mit der höchsten Wahrscheinlichkeit im GMS bestimmt.

Nach einem Tankvorgang wird der GMS zurückgesetzt (Über Tank-Füllstandsanzeige leicht detektierbar). Hierbei haben alle theoretisch möglichen w_D die gleiche Wahrscheinlichkeit und alle anderen eine Wahrscheinlichkeit von 0. Betrug das in der ECU verwendete w_D bspw. 100 % Diesel und der Kraftstofftank war halb leer, betragen die Wahrscheinlichkeiten der GMS nach volltanken zwischen 50-100 % Diesel ca. 1,96 %. Alle anderen Mischungsverhältnisse haben die Wahrscheinlichkeit 0 %. Das neue w_D kann nur im Bereich 50-100 % Diesel liegen, unabhängig vom Kraftstoff, welcher getankt wurde. Da die Gesamtwahrscheinlichkeit der GMS 1 beträgt ist die Wahrscheinlichkeit für einen Wert im möglichen Bereich

$$p = \frac{1}{51} \approx 0,0196.$$

1.4.1.5 Ergebnisse der Kraftstoffdetektion am Prüfstand

Die Auswertungen, basierend auf den Prüfstandsdaten, zeigen eine korrekte Kraftstofferkennung für Diesel, Rapsöl und verschiedene Mischungsverhältnisse beider Kraftstoffe mit einer Genauigkeit von ca. +/- 5 %. Die Qualität der Kraftstofferkennung hängt stark von den Lastpunkten ab, in denen der Motor betrieben wurde.

Die Genauigkeit der Schätzung wird besser, je mehr Lastpunkte ausgewertet werden (siehe Abbildung 28). Ebenfalls ersichtlich ist, dass die Qualität der Schätzung stark von dem jeweiligen Messpunkt abhängt. Nach dem Wechsel des Kraftstoffs von 25 % auf 0 % Diesel, wurde der Motor direkt bei hohen Drehmomenten betrieben, sodass das w_D sofort richtig erkannt wurde. Umgekehrt war es beim Wechsel von 50 % auf 100 % Diesel. Hierbei befand sich der Motor nach Starten der Detektion lange in sehr niedrigen Lastbereichen. Da hier sehr große Lambdawerte vorliegen ist der O_2 -Sensor verhältnismäßig ungenau. Das führt zunächst zu einer 65 % Diesel Schätzung, anstatt dem realen Wert von 100 % Diesel. Nachdem verschiedene stationäre Lastpunkte aus unterschiedlichen Lastbereichen ausgewertet wurden, nähert sich die erkannte Mischung dem Realwert an. Kleinere Abweichungen von +/- 5 % zwischen realem und berechnetem w_D wie bspw. bei 25 % und 50 % realer Dieselmischung sind in einem tolerierbaren Bereich und haben keine großen Auswirkungen auf den Motorbetrieb. Generell führen hohe Lastpunkte zu genaueren Detektionsergebnissen. Durch höhere Einspritzmengen und kleinere Verbrennungsluftverhältnisse sinken die prozentualen Abweichungen der NO_x -Sensoren. Des Weiteren fällt bei hohen Einspritzmengen der theoretische Sauerstoffgehalt mit steigendem Dieselgehalt viel stärker ab, sodass die Schätzung über den O_2 -Sensor im Abgas genauer wird. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine gute Detektion des Raps-Dieselmischungsverhältnisses.

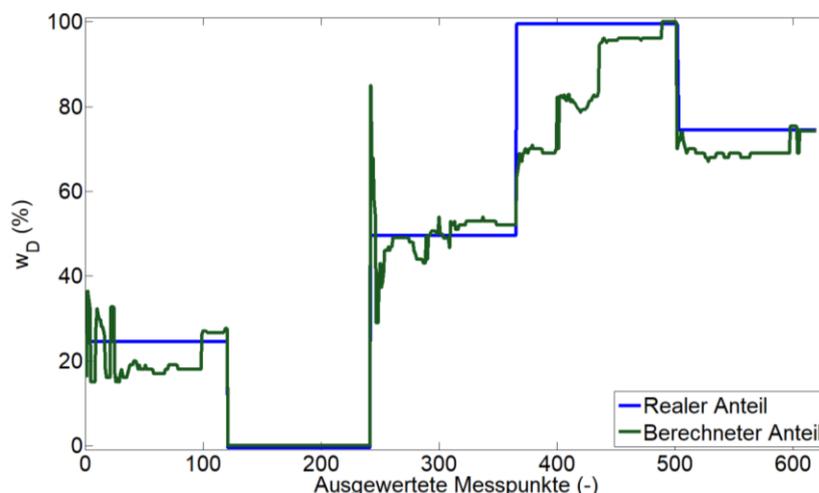


Abbildung 28: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion basierend auf Prüfstandsdaten für Diesel-Rapsöl Mischungen

Neben Diesel-Rapsöl Mischungen wurden ebenfalls Diesel-Biodiesel Mischungen am Prüfstand betrachtet (siehe Abbildung 29). Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen von Mischungen aus Diesel und Rapsöl. Da der Luftbedarf von Biodiesel fast identisch zu dem von Rapsöl ist, kann hier der gleiche Ansatz zur Unterscheidung der Mischungen herangezogen werden. Auch hier zeigt sich, dass die Qualität der

Kraftstoffdetektion stark von den Lastpunkten abhängt, in denen der Motor betrieben wird. Weiterhin wird deutlich, dass mehrere Messreihen untersucht werden müssen, um die Kraftstoffmischung erkennen zu können. Hierdurch können sich Schwankungen um den korrekten Wert ausgleichen. Dies ist im Betrieb möglich, da ausreichend Zeit vorhanden ist und die Kraftstoffmischung nur beim Tankvorgang verändert wird.

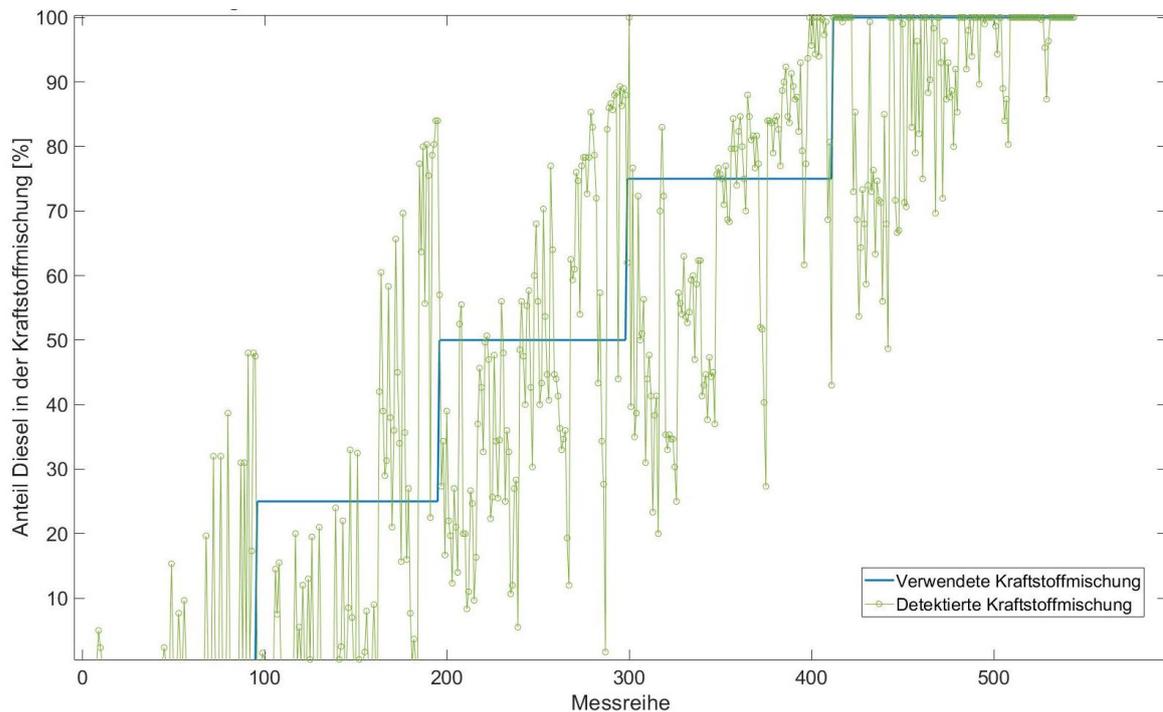


Abbildung 29: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion basierend auf Prüfstandsdaten für Diesel-Biodiesel Mischungen

1.4.1.6 Integration in Feldtestmaschine

Nachdem die Kraftstoffdetektion am Prüfstand validiert wurde, wurde ein Modell erstellt, welches auf einer Feldtestmaschine zum Einsatz kommt. Im ersten Schritt wurden Veränderungen am Motorsteuergerät vorgenommen, um das Auslesen benötigter Informationen zu ermöglichen. Hierbei wurden verschiedene Nachrichten auf dem CAN-Bus um die Parameter erweitert, welche zur Analyse der Kraftstoffmischungen benötigt werden. Diese Daten werden zum einen mit einer dSpace MicroAutobox II verarbeitet und zum anderen über einen CAN-Logger zusätzlich aufgezeichnet. Dieser Aufbau bietet die Möglichkeit, die Eingangsdaten des Modells auch später zur Verfügung zu haben. Damit können auch im Nachgang Veränderungen am Modell vorgenommen werden und die Ergebnisse verschiedener Auswertungen miteinander verglichen werden. Dies hat sich als sehr hilfreich erwiesen. Es werden für eine Zeitspanne von 300 Sekunden Daten gesammelt und anschließend in Zeitsegmenten von jeweils 10 Sekunden ausgewertet. Der Code des Modells wurde mit Simulink-Matlab 2018b erstellt und anschließend auf die MicroAutobox geladen.

Weitere Schritte, welche notwendig waren, um das Modell auf der Feldtestmaschine zu verwenden, werden zusammen mit den Ergebnissen im nächsten Kapitel erläutert.

Nachdem die Kraftstoffdetektion auf der Feldtestmaschine umgesetzt wurde, war der nächste Schritt, eine automatisierte Umschaltung umzusetzen. Auch hier wurden zunächst Tests am Motorenprüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt.

Es sollen Veränderungen im Motorsteuergerät vorgenommen werden, welche den Betrieb an die jeweils erkannte Kraftstoffmischung anpassen. Dies wurde unter Verwendung eines Computers sowie eines Service Advisor Tools (Electronic Data Link) von John Deere umgesetzt. Nur mit dem Tool kann eine Verbindung zwischen dem Computer und dem Motorsteuergerät hergestellt werden, über die der Ansatz umgesetzt werden kann. In Abbildung 30 ist der schematische Aufbau zu erkennen.

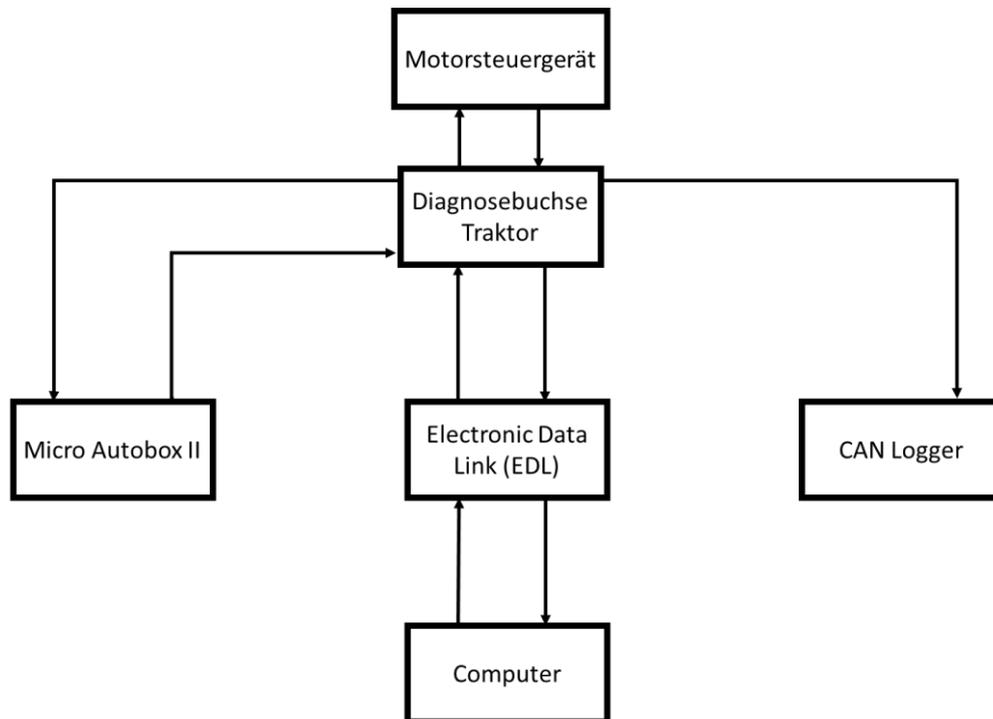


Abbildung 30: Hardware-Setup zur Kraftstoffdetektion auf der Feldtestmaschine

Nachfolgend soll der zeitliche Ablauf kurz beschrieben werden. Wurde der Motor gestartet, startet ebenfalls automatisch die Micro Autobox II mit der Kraftstoffdetektion. Die notwendigen Parameter des Motors können über den CAN-Bus an der Diagnosebuchse abgegriffen werden. Ist die Betriebstemperatur des NO_x-Sensors erreicht und sind die Motorparameter im definierten Rahmen, startet automatisiert das Modell zur Bestimmung des verwendeten Kraftstoffs. Wurden valide Messreihen ausgewertet, schickt die Autobox einen Schlüssel für das zu verwendende Kennfeld über den CAN-Bus. Über den Electronic Data Link ist ein Testcomputer ebenfalls an den CAN-Bus angeschlossen. Um die automatisierte Umschaltung umzusetzen, läuft auf diesem Computer ein Programm, welches zunächst den Schlüssel abfragt, welcher von der Autobox ausgegeben wurde. Da auch das aktuell hinterlegte Kennfeld einen Schlüssel hat, welcher auf dem CAN-Bus hinterlegt ist, können diese beiden abgeglichen werden. Ist das korrekte Kennfeld bereits hinterlegt, findet keine Umschaltung statt. Sind die beiden Schlüssel jedoch nicht identisch, wird eine Anpassung vorgenommen. In diesem Fall wird ein neues Kennfeld auf dem Motorsteuergerät hinterlegt und aktiviert. Umgesetzt wird dies über die Verbindung mit dem Electronic Data Link. Dieses Tool ist notwendig, um den Zugriff auf das Steuergerät zu ermöglichen. Über John Deere interne Software wird die Umstellung durch das geschriebene Programm umgesetzt. Auf direktem Wege ist dies aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Ist das neue Kennfeld auf dem Steuergerät hinterlegt, wird ebenfalls der Schlüssel angepasst, damit auch weiterhin der Detektionsalgorithmus korrekt funktionieren kann. Im Anschluss läuft die Kraftstoffdetektion weiter und erst wenn eine abweichende Mischung erkannt wird, findet wieder eine Umstellung statt. Die Überprüfung des Kennfeldes wird zum einen nur durchgeführt, wenn der Motor läuft – beim Einschalten der Zündung findet noch keine Auswertung statt, da auch noch keine Kraftstoffmischung detektiert werden kann. Zum anderen muss erst eine festgelegte Anzahl an validen Messreihen eingegangen sein, damit die Sicherheit erhöht ist, das richtige Kennfeld auszuwählen. Ergibt die Auswertung des Detektionsalgorithmus kein Ergebnis, verbleibt das Kennfeld für 100 % Rapsöl auf der ECU. Dies wurde gewählt, da bei hohen Raildrücken und langen Injektorimpulsdauern (hohe Last) mehr Rapsöl eingespritzt wird als Diesel. Die interne Leistungsberechnung der ECU greift auf die Einspritzmenge zurück, welche im Kennfeld für einen definierten Raildruck und eine definierte Injektorimpulsdauer hinterlegt ist. Ist tatsächlich Rapsöl im System, entspricht die Leistung der Maschine dem Soll. Wäre Diesel im System, würde weniger Kraftstoff eingespritzt werden und die Maschine hätte weniger Leistung. Im umgekehrten Fall hätte die Maschine mehr Leistung als zugelassen und somit eine unzulässige Leistungssteigerung.

In weiteren Entwicklungsschritten kann die Kraftstoffdetektion und entsprechend auch direkt die Umschaltung auf dem Steuergerät implementiert werden. Um bei den Untersuchungen flexibler zu sein, wurde sich jedoch zunächst für den beschriebenen Ansatz entschieden.

1.4.1.7 Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feld

Der folgende Abschnitt bezieht sich nun nicht mehr auf Messungen, welche am Prüfstand durchgeführt wurden, sondern auf Daten, welche auf der Testmaschine John Deere 6135R gesammelt wurden. Bei der Übertragung des Ansatzes auf eine Maschine, welche im Feld im Einsatz ist, haben sich gegenüber den Prüfstandsversuchen neue Herausforderungen ergeben. Während die Umsetzung der Integration im vorherigen Kapitel näher beschrieben wird, soll an dieser Stelle näher auf Anpassungen eingegangen werden,

welche am Modell selbst vorgenommen werden mussten. Es hat sich gezeigt, dass eine unveränderte Übertragung des Ansatzes, welcher am Prüfstand funktionierte, nicht möglich ist.

Bei der Ermittlung der Einspritzmenge werden zwei verschiedene Größen herangezogen. Zum einen wird der Parameter DesiredFuel (DF) vom Steuergerät ausgelesen und zum anderen die MultipleInjectionQuantities (MIQ). DF beschreibt die aktuell gesamte benötigte Kraftstoffmasse, welche vom Steuergerät für den aktuellen Betriebspunkt berechnet wird. Finden neben der Haupteinspritzung noch Nebeneinspritzungen des Kraftstoffs statt, so teilt sich die Kraftstoffmasse von DF auf eine Main Injection sowie diverse Multiple Injections auf. MIQ wird nachfolgend stellvertretend für die addierten Kraftstoffmassen der einzelnen Einspritzungen verwendet. Insgesamt ergeben die addierten Kraftstoffmassen den Wert, welcher im Steuergerät unter DF zu finden ist. Durch systembedingte Verzögerungen im Injektor, ergeben sich jedoch Abweichungen zwischen der Berechnung einer einzelnen großen Einspritzmasse, verglichen mit der Aufteilung der gleichen Masse auf mehrere kleinere Einspritzmassen. Dies führt zu abweichenden Ergebnissen bei der Berechnung des Sauerstoffgehalts im Abgas und damit zu unterschiedlichen erkannten Kraftstoffmischungen des Modells. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse zunächst parallel betrachtet und ausgewertet. Es hat sich gezeigt, dass die Detektion bei der Verwendung der MIQ besser funktioniert. Aus diesem Grund werden nachfolgend die Ergebnisse dargestellt, welche hiermit ermittelt wurden.

Betrachtet man die Resultate der Detektion für die beiden Reinkraftstoffe Diesel und Rapsöl (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32), zeigt sich, dass Rapsöl immer korrekt erkannt wird. Bei 100 % Diesel liegen die Ergebnisse jedoch über das komplette Spektrum verteilt.

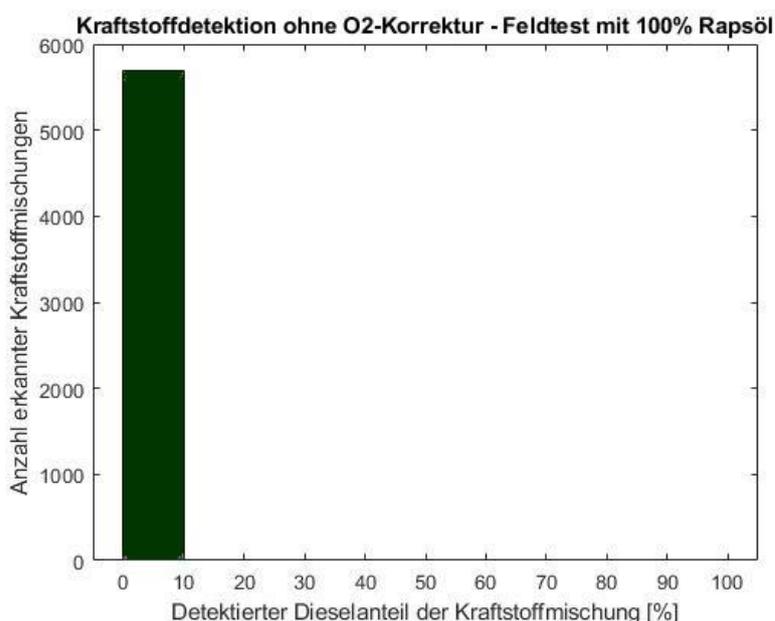


Abbildung 31: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest ohne O₂-Korrektur mit 100 % Rapsöl

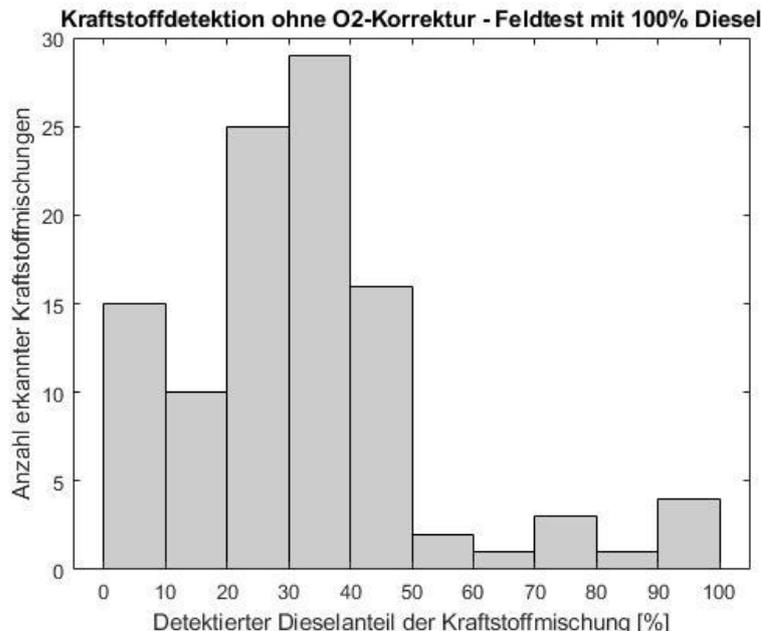


Abbildung 32: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest ohne O₂-Korrektur mit 100 % Diesel

Berechnet man bei bekannter Kraftstoffmischung den theoretischen Sauerstoffgehalt und vergleicht ihn mit dem gemessenen Sensorwert der Feldtestmaschine, so zeigt sich, dass diese nicht übereinstimmen. Differenzen zwischen berechnetem und gemessenem Wert kommen zum einen zustande durch Abweichungen zwischen tatsächlicher und angenommener Einspritzmenge, tatsächlichem und angenommenem Luftmassenstrom und zum anderen durch Messungenauigkeiten des Sensors.

Für die Feldtestdaten wurden die Sauerstoffdaten verglichen und sind in Abbildung 33 dargestellt. Die blaue Linie zeigt den Zusammenhang der beiden Größen, welcher anschließend im Modell hinterlegt wurde. Dieser stellt den bestmöglichen Fit der Werte dar.

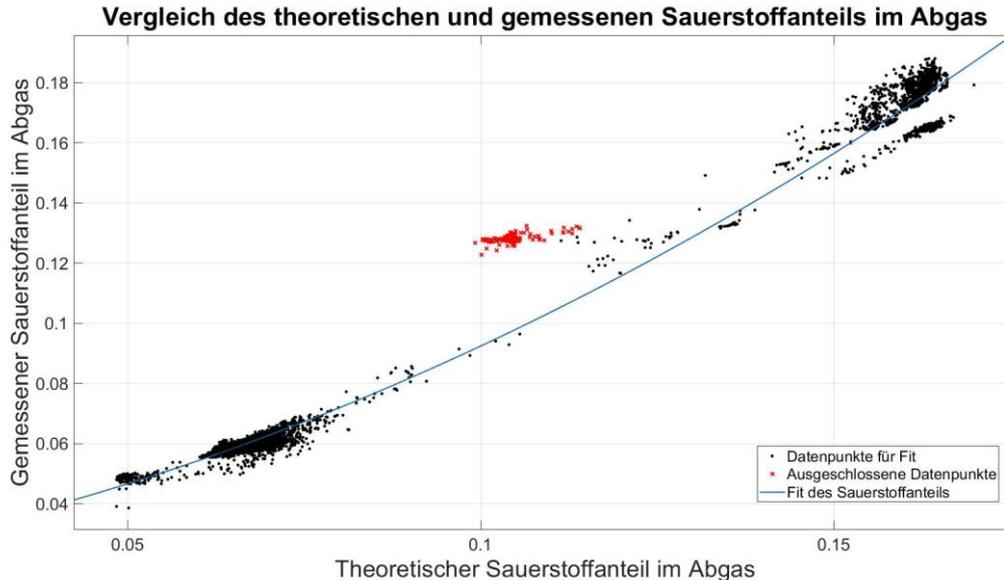


Abbildung 33: Vergleich des theoretischen und gemessenen Sauerstoffanteils im Abgas

Eine Auswertung des Modells mit integrierter Korrektur des gemessenen Sauerstoffwertes zeigt eine deutliche Verbesserung der Kraftstofferkennung. Die neuen Ergebnisse der Feldtests sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt. Hier zeigt sich eine deutliche Verbesserung für 100 % Diesel. Die Ergebnisse für reines Rapsöl zeigen nicht mehr für jeden Fall die korrekte Mischung. Insgesamt wird dennoch in den meisten Fällen der korrekte Kraftstoff erkannt. Aus diesem Grund wird die Sauerstoffkorrektur im Modell hinterlegt und für die Detektion verwendet.

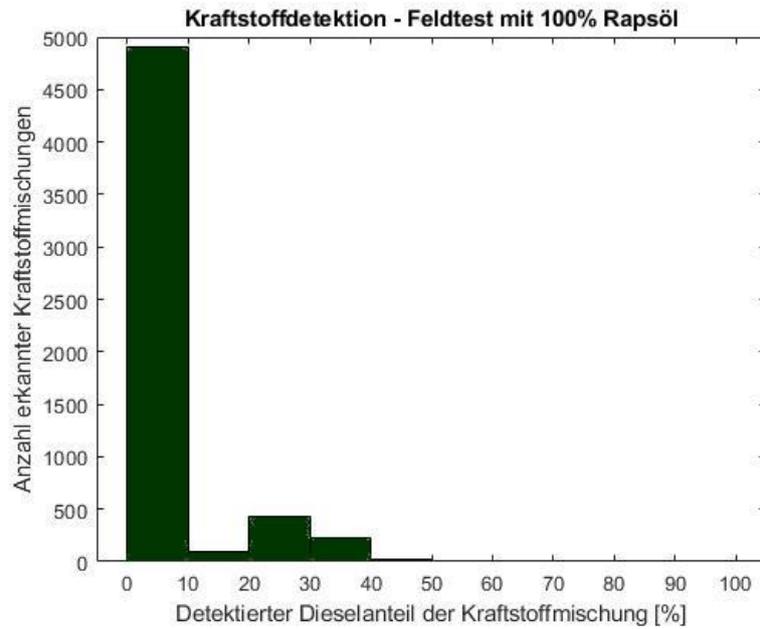


Abbildung 34: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest mit 100 % Rapsöl

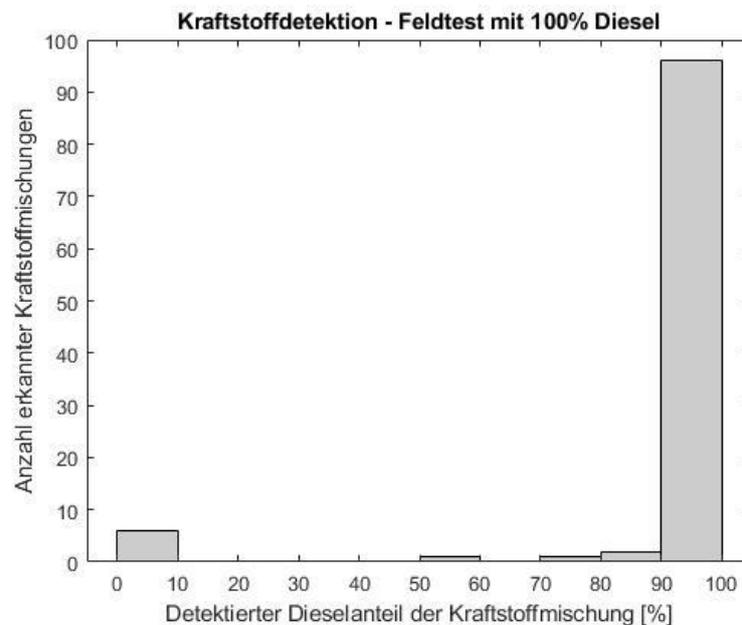


Abbildung 35: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest mit 100 % Diesel

Betrachtet man nun die Mischungen der Kraftstoffe, zeigt sich ein gemischtes Bild. Während die Detektion für Mischungen mit 75 % Diesel im Mittel akzeptable Ergebnisse liefert (siehe Abbildung 36), liegen die Werte für 25 % Diesel und 50 % Diesel schlechter verteilt (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Mit diesen Mischungen wurde die Maschine im Sommer 2021 betrieben. Während die verbleibenden drei Mischungen bereits für den Zwischenbericht 2021 ausgewertet wurden, lagen die Messdaten hierfür erst spät im Projekt vor. Dies war pandemiebedingter Verzögerungen geschuldet.

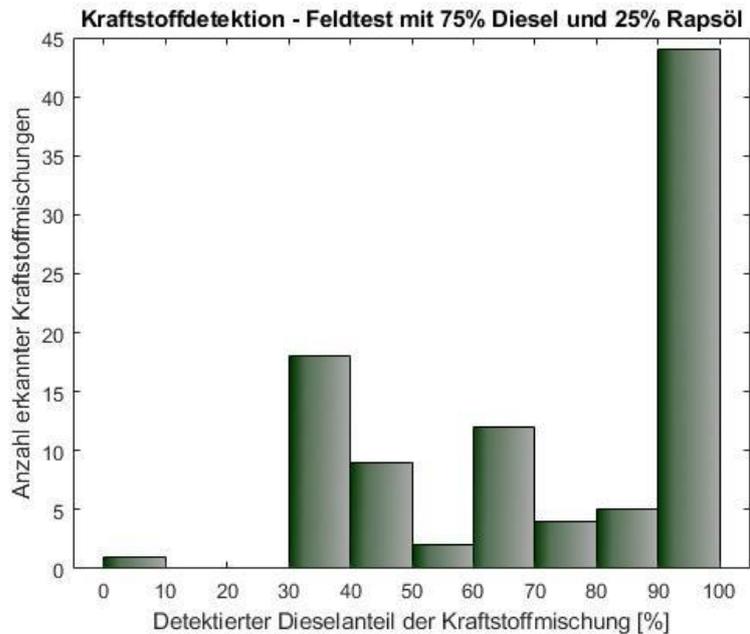


Abbildung 36: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest mit 75 % Diesel und 25 % Rapsöl

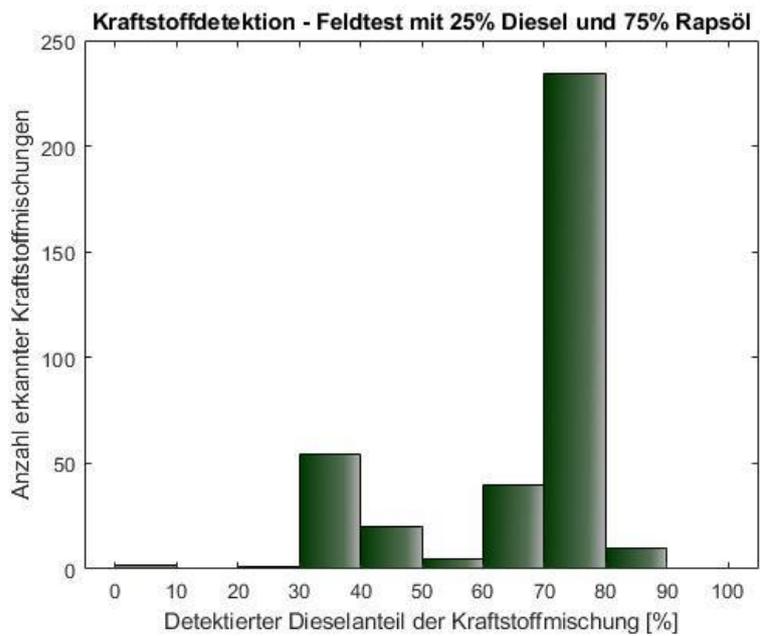


Abbildung 37: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest mit 25 % Diesel und 75 % Rapsöl

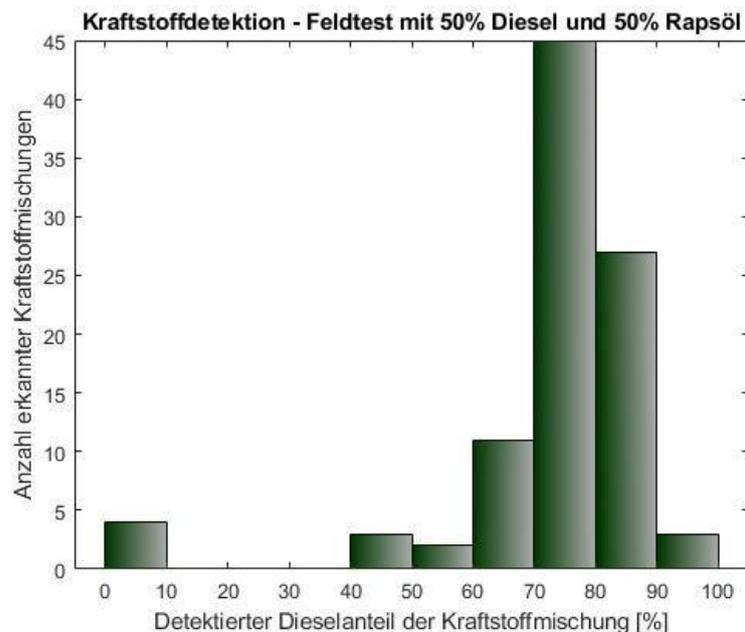


Abbildung 38: Ergebnisse der Kraftstoffdetektion im Feldtest mit 50 % Diesel und 50 % Rapsöl

Es zeigt sich, dass die Detektion mit den Mischungen weniger gut funktioniert, als erwartet. Aus diesem Grund wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Zum einen wurde ausgewertet, ob es einen Zusammenhang zwischen der Kraftstofftemperatur und der Genauigkeit der Detektion gibt. Analog wurde der Einfluss der Motordrehzahl untersucht.

Es zeigt sich jedoch anhand der Daten aus den Feldtests weder für die Kraftstofftemperatur noch für die Motordrehzahl ein erkennbarer Zusammenhang zwischen korrekten und inkorrekten Detektionen. Hier stellt sich die Frage, weshalb die Detektion am Prüfstand besser funktioniert als im Feld. Hierfür gibt es eine naheliegende These. Am Prüfstand schwanken die Eingangsgrößen des Modells deutlich weniger als im Feld. Definierte Vorgaben im Steuergerät und definierte Umgebungsbedingungen sorgen für einen optimalen Betrieb. Im Feldtest ist dies nicht gegeben. Stellt man die gleichen Grenzwerte wie am Prüfstand ein, gibt es nur vereinzelte Messreihen, welche ausgewertet werden können. Aus diesem Grund war es notwendig, zwischen einer ausreichenden Anzahl auswertbarer Messreihen und stärkeren Schwankungen der Messgrößen abzuwägen. Da die Testmaschine pandemiebedingt weniger gefahren wurde, als erhofft, ergeben sich für die meisten untersuchten Mischungen geringe Datengrundlagen. Hier werden auch nach Abschluss des Projekts noch weitere Daten gesammelt, um die Detektion verbessern zu können. Durch die erweiterte Datenbasis wird es möglich sein, das Modell weiter zu validieren und gegebenenfalls anzupassen und zu verbessern.

1.4.2 Kraftstoffdetektion auf Basis zusätzlicher Sensoren

Ergänzend zu dem zuvor beschriebenen Ansatz wird untersucht ob mit Hilfe von zusätzlich zu installierenden Sensoren eine Kraftstoffdetektion realisiert werden kann. Auf Basis typischer Eigenschaften sowie deren Schwankungsbreiten werden zunächst Unterscheidungsmerkmale von Diesel, Biodiesel und Rapsölkraftstoff ermittelt. Anschließend werden Sensoren gesucht, mit denen die charakteristischen Kenngrößen bestimmt werden können und die voraussichtlich robust genug für den Einsatz auf landwirtschaftlichen Maschinen sind. Folgende Sensoren werden ausgewählt:

- Multiparametrischer Flüssigkeitssensor MEAS **FPS2800** von TE Connectivity (TE-Nummer: FPP800A110), geeignet für Industriemaschinen und Off-Road-Fahrzeuge
- Multifunktionaler Ölzustandssensor Hydac® **HLB1400** von Hydac, konzipiert für stationäre und mobile Anwendungen
- Dichte- und Viskositätssensor **VLO-M1** von TrueDyne, z. B. für die Überwachung der Kraftstoffkonzentration im Motorenöl
- Motorenölzustandssensor **QLT** von Continental Temic, der sich im PKW-Einsatz bewährt hat, derzeit aber nicht angeboten wird

Eine Übersicht über die Sensoren gibt Abbildung 39, die Messgrößen, Messbereiche und Einsatzbereiche der Sensoren sind in Tabelle 7 aufgelistet.



Sensortyp	FPS2800	HLB 1400	QLT	VLO-M1
Hersteller	TE connectivity	Hydac	Continental Temic	TrueDyne

Abbildung 39: Ausgewählte Kraftstoffsensoren (Bildquellen: TFZ, www.Hydac.com, www.Truedyne.com)

Tabelle 7: Messgrößen, Messbereiche und Einsatzbereiche der Sensoren nach Herstellerangaben

Sensor	Messgröße	Messbereich		Einsatzbereich	
FPS2800	Dichte	650	bis 1.500 kg m ⁻³	-40	bis +150 °C
	Permittivität	1,0	bis 6,0	max. 25 bar	
	Dyn. Viskosität	0,5	bis 50 mPa s	max.20 Grms [*]	
	Temperatur	-40	bis +150 °C		
HLB1400	Permittivität	1	bis 10	-30	bis +90 °C
	El. Leitfähigkeit	0	bis 100 nS m ⁻¹	max. 50 bar	
	Rel. Wassersättigung	0	bis 100 %	Strömungsgeschw. max. 5 m s ⁻¹	
QLT	Temperatur	-25	bis +100 °C		
	Permittivität	1	bis 6	-40	bis +150 °C
VLO-M1	Temperatur	-40	bis +150 °C		
	Dichte	0	bis 1.000 kg m ⁻³	-20	bis +60 °C
	Dyn. Viskosität	0,3	bis 50 mPa s	0	bis 20 bar
	Temperatur	-20	bis +60 °C	Partikelgröße max. 30 µm	

* Maß für die Gesamtenergie einer zufälligen Vibration (root mean square of acceleration)

Neben den Sensoren in Tabelle 7 wird auch untersucht, ob mittels Ultraschall eine Detektion der Kraftstoffe möglich ist, da sich die Schallgeschwindigkeit in Rapsölkraftstoff, Biodiesel und Dieselmotorkraftstoff voneinander unterscheidet. Die Laufzeit eines Ultraschallimpulses kann mit einer kostengünstigen Ultraschallsonde (Transducer) gemessen werden.

1.4.2.1 Prüfung der Sensoren

Es werden drei verschiedene Testvorrichtungen (Druck-, Strömungs- und Kraftstoffsystemprüfstand) konzipiert und aufgebaut, um die Kraftstoffsensoren bezüglich ihrer Funktionalität zu prüfen und Referenzdaten für den späteren Einsatz auf dem Traktor zu ermitteln.

Der **Druckprüfstand** dient dazu, den Einfluss von Druckschwankungen, wie sie in einem Kraftstoffsystem eines Traktors auftreten können, auf die Messwerte zu analysieren. Dabei werden die Sensoren in Haltehülsen eingebracht, die mit Kraftstoff befüllt sind. Die Hülsen sind an eine gemeinsame Verteilerleiste angeschlossen, über die der Kraftstoff mit Druck beaufschlagt wird. Die Druckregulierung erfolgt automatisiert durch eine Membranpumpe in Abhängigkeit eines Regelsignals, das ein Drucksensor, der in der Verteilerleiste verbaut ist, liefert. Für die Untersuchung werden verschiedene Druckstufen in einer bestimmten Reihenfolge abgefahren: zuerst wird ein absoluter Druck von 1,0 bar angelegt (atmosphärischer Druck), anschließend wird der Druck auf etwa 0,3 bar abgesenkt (Unterdruck) und schließlich wird der Druck auf etwa 2,0 bar (Überdruck) erhöht. Das gewählte Profil soll das in einem Niederdruckkraftstoffsystem zu erwartende Druckniveau abdecken. Die Druckregelung erfolgt mit einer Genauigkeit von 0,15 bar.

Am **Strömungsprüfstand** wird der Einfluss des strömenden Kraftstoffs auf die Sensoren geprüft. So können mögliche Quereinflüsse eines strömenden Fluids auf die Messergebnisse erfasst werden. Der Kraftstoff wird dabei aus einem Vorratsbehälter über Kraftstoffleitungen durch eine T-förmige Haltehülse am Sensor vorbeigeleitet. Zur Förderung des Kraftstoffs wird eine Kraftstoffpumpe, die baugleich mit der Kraftstoffpumpe des Traktors ist, eingesetzt.

Am **Kraftstoffsystemprüfstand** wird das Niederdruckkraftstoffsystem des Versuchstraktors JD 6135R nachgebaut. Dadurch soll eine günstige Einbauposition für den jeweiligen Sensor ermittelt werden, um abschließend die Funktion des Sensors praxisnah unter verschiedenen Einflüssen, wie Lage des Sensors, Umgebungstemperatur, Kraftstofftemperatur, Kraftstoffdruck und Kraftstofffließgeschwindigkeit zu prüfen.

Die drei Prüfstände sind zur Simulation verschiedener Umgebungstemperaturen in einer Klimakammer (ohne Feuchteregulierung) aufgebaut. Folgende Temperaturstufen werden nacheinander angefahren und je 12

Minuten lang mit einer Hysterese von 4 K gehalten: 60 °C; 50 °C; 40 °C; 30 °C; 20 °C; 10 °C; 0 °C; -10 °C; -15 °C. Die Datenaufzeichnungsrate beträgt 1 Hz. Das Temperaturprofil wird jeweils zweimal vom höchsten zum tiefsten und zweimal vom tiefsten zum höchsten Wert durchlaufen. Daraus resultieren insgesamt vier Wiederholungen für jede Temperaturstufe. Als Regelgröße dient die Kraftstofftemperatur in den Prüfapparaturen.

Ultraschallmesssystem zur Kraftstoffdetektion

Der Aufbau des Ultraschallmesssystems ist in Abbildung 40 dargestellt. Die Ultraschallsonde (Transducer NDT1-220K von TE Connectivity) wird auf eine Metallplatte geklebt und in den zu untersuchenden Kraftstoff eingebracht. Im Abstand von 50 mm befindet sich eine zweite metallische Oberfläche, die den Ultraschallimpuls reflektiert, so dass dieser am Transducer als Echo detektiert werden kann. Als Impulsgeber dient der PicoPulser von Ultratek. Die Signale werden mit einem Oszilloskop (GDS-2072E von GW Instek) aufgezeichnet. Mithilfe eines Kryostaten wird der Kraftstoff, Transducer und Reflektor auf 20 °C temperiert.

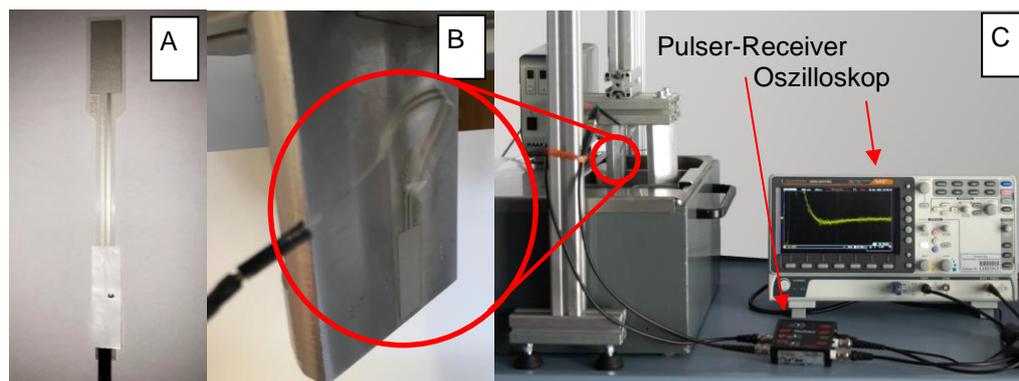


Abbildung 40: A: Ultraschall Transducer; B: Ultraschall Transducer auf Metallplatte; C: Messaufbau mit Kryostat, Transducer, Reflektor, Pulser-Receiver und Oszilloskop

Datenauswertung

Die Auswertung der Daten der Sensoren zur Kraftstoffdetektion sowie die Bildung von Modellen erfolgte mit der Software Excel von Microsoft und Origin 2021b von OriginLab.

1.4.2.2 Ergebnisse der Sensortests

Nachfolgend werden die mit den Sensoren erzielten Ergebnisse dargestellt.

HLB1400

Der Sensor HLB1400 von Hydac ist für die Zustandsüberwachung von Ölen, wie zum Beispiel Hydraulik- oder Motorenölen, konzipiert. Mit dem Sensor werden die relative Permittivität, die elektrische Leitfähigkeit, die relative Wassersättigung und die Temperatur des Öles erfasst. Der HLB1400 zeichnet sich durch eine kompakte Bauweise aus und verfügt über mehrere Schnittstellen.

Die Ergebnisse der Messungen am Druck- und Strömungsprüfstand zeigen, dass die Messwerte des Sensors zur elektrischen Leitfähigkeit und zur relativen Wassersättigung nicht zur Unterscheidung von Diesel, Biodiesel und Rapsölkraftstoff geeignet sind. So liegen beispielsweise die Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit zwischen den Kraftstoffen innerhalb der Messungenauigkeit des Sensors.

Die Ergebnisse der Messung der relativen Permittivität normiert auf die Bezugstemperatur von 50 °C von Biodiesel-Diesel- und Rapsölkraftstoff-Diesel-Mischungen sind in Abbildung 41 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität und dem Biodiesel- bzw. Rapsölanteil in Dieselkraftstoff im Temperaturbereich von 30 bis 50 °C besteht. Lineare Regressionsanalysen zeigen, dass der Druck im untersuchten Bereich (0,3 bis 2,0 bar) keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Permittivitätsmessung hat. Der mittlere quadratische Fehler der linearen Regressionsmodelle liegt für die Rapsölkraftstoff-Diesel-Mischung bei 0,0476 und für die Biodiesel-Diesel-Mischung bei 0,0475. Mithilfe des Sensors kann der Rapsöl- bzw. Biodieselanteil in Dieselkraftstoff mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im Bereich von etwa +/-10 % prognostiziert werden.

Eine Unterscheidung zwischen Rapsölkraftstoff und Biodiesel ist jedoch nicht möglich, da die vom Sensor gemessene relative Permittivität der beiden Kraftstoffe mit 3,21 für Rapsölkraftstoff und 3,09 für Biodiesel zu ähnlich ist. Ein Vergleich mit Literaturwerten zur relativen Permittivität von Biodiesel und Pflanzenölen [2],[8],[9] zeigt, dass die Messwerte plausibel sind.

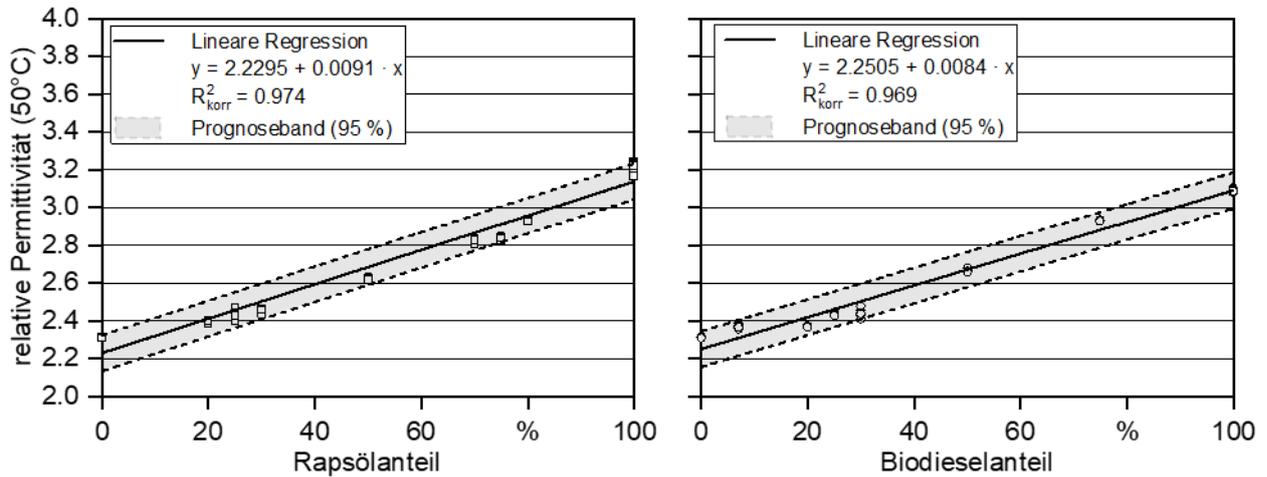


Abbildung 41: Relative Permittivität bei Bezugstemperatur 50 °C, ermittelt am Druckprüfstand im Temperaturbereich von 30 bis 50 °C mit dem HLB 1400 in Abhängigkeit vom Rapsöl- und Biodieseleanteil in Dieselkraftstoff

QLT

Der QLT Sensor von Continental ist zur Zustandsüberwachung und Füllstandsmessung von Motorenölen konzipiert. Der Sensor wurde bereits serienmäßig in verschiedenen PKW verwendet, aktuell wird er jedoch nicht mehr angeboten. Der Sensor erfasst die relative Permittivität und die Temperatur.

In Abbildung 42 sind die Ergebnisse der relativen Permittivität für Rapsölkraftstoff-Diesel und Biodiesel-Diesel-Mischungen, sowie die Resultate einer linearen Regressionsanalyse dargestellt. Da die relative Permittivität von der Temperatur abhängig ist (etwa $0,005 \text{ K}^{-1}$ [2], [8] für Rapsöl und Biodiesel), erfolgt die Regressionsanalyse nur mit Messwerten, die im Bereich von 30 bis 50 °C Kraftstofftemperatur ermittelt wurden. Der Kraftstoffdruck beeinflusst im untersuchten Bereich die Messung der relativen Permittivität nicht. Analog zu den Ergebnissen mit dem HLB1400 besteht ein Zusammenhang zwischen dem Anteil an Rapsölkraftstoff bzw. Biodiesel in Diesel und der relativen Permittivität. Die 95%ige Prognosewahrscheinlichkeit der Regressionsmodelle für den Kraftstoffanteil liegt für Rapsölkraftstoff bei etwa $\pm 10\%$ und für Biodiesel bei etwa $\pm 5\%$. Eine Differenzierung von Biodiesel und Rapsölkraftstoff ist mit dem QLT Sensor jedoch nicht möglich.

Die vom QLT Sensor ermittelte relative Permittivität der Kraftstoffmischungen liegt im Bereich von 2,3 bis 3,5 und somit in etwa auf gleichem Niveau wie die Messwerte des HLB1400 Sensors sowie Literaturangaben. Abweichungen können auf die individuelle Bauart und Kalibrierung der Sensoren zurückgeführt werden.

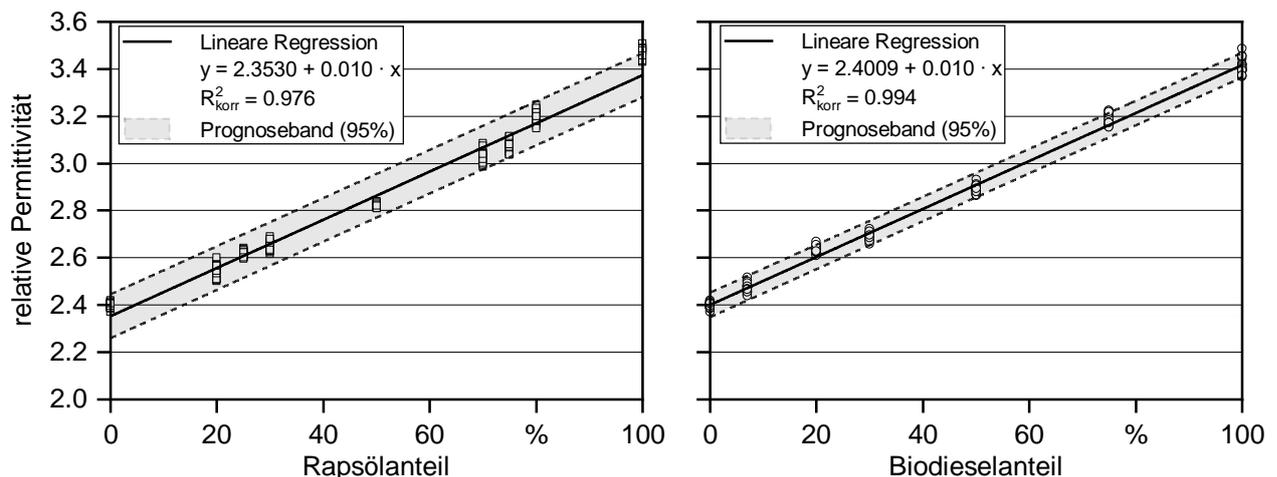


Abbildung 42: Relative Permittivität des QLT Sensors, ermittelt am Druckprüfstand im Temperaturbereich von 30 bis 50 °C in Abhängigkeit vom Rapsöl- und Biodieseleanteil in Dieselkraftstoff

VLO-M1

Der VLO-M1 Sensor der TrueDyne Sensors AG kann im Unterschied zu anderen Sensoren nicht im ruhenden Medium eingesetzt werden, da die Messzelle durchströmt werden muss. Der Sensor misst die Dichte, die dynamische Viskosität und die Kraftstofftemperatur und kann z. B. für die Detektion von Kraftstoffen in Motorenölen eingesetzt werden. Zur Bestimmung von Dichte und Viskosität wird ein mit dem Medium gefüllter Mikrokanal in resonante Schwingung versetzt und die Eigenfrequenz und Schwingungsgüte erfasst. Das Messprinzip wird in der technischen Beschreibung des Herstellers noch näher erläutert [10].

In Abbildung 43 ist die Dichte von Rapsölkraftstoff- und Biodiesel-Diesel-Mischungen in Abhängigkeit von der Temperatur bei drei verschiedenen Drücken (0,3 bar, 1,0 bar, 2,0 bar) dargestellt. Multiple Regressionsanalysen zeigen, dass der Druck im untersuchten Druckbereich keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Dichtemessung hat. Erwartungsgemäß zeigt sich aber für alle Kraftstoffmischungen ein linearer Zusammenhang zwischen der Kraftstofftemperatur und der Dichte. Die Dichtemesswerte des Sensors stimmen meist sehr gut mit den im Labor ermittelten Werten überein.

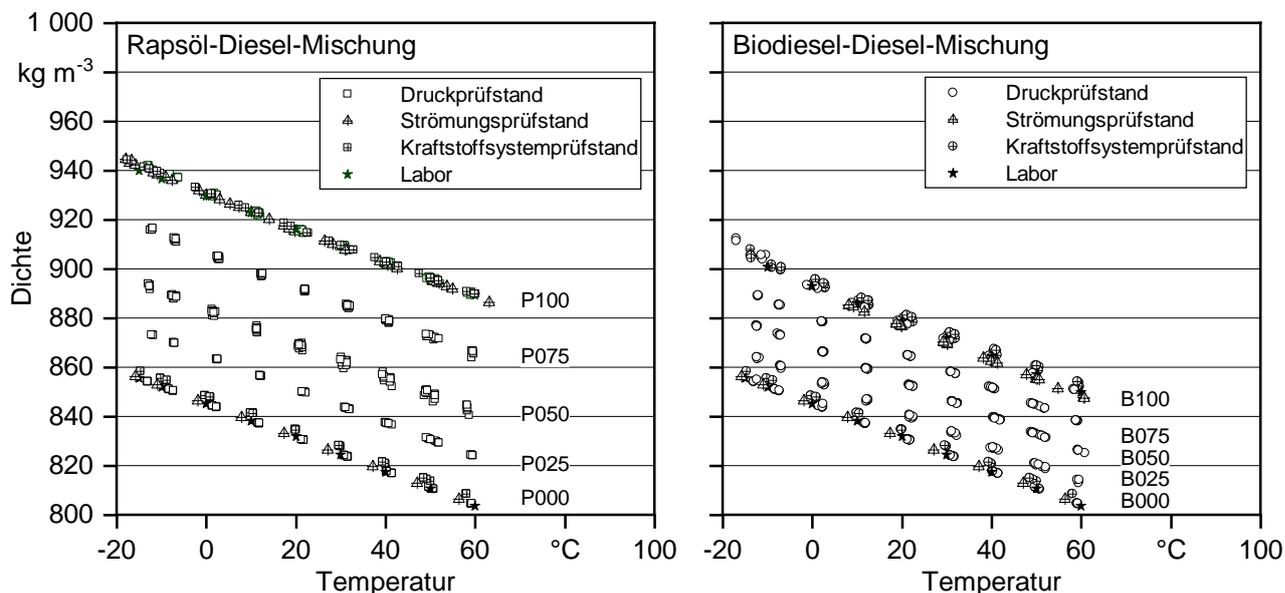


Abbildung 43: Dichtemesswerte des VLO-M1 Sensors für verschiedene Rapsöl- und Biodiesel-Diesel-Mischungen, ermittelt auf verschiedenen Prüfständen in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu Laborwerten

Um die Anteile X_i (in %) an Rapsölkraftstoff ($i = P$) bzw. Biodiesel ($i = B$) in Diesel abzuschätzen, wurde mit den Daten aus dem Druckprüfstand (für $T > 5^\circ\text{C}$) eine multiple lineare Regressionsanalyse mit der gemessenen Dichte ρ in kg/m^3 und der Temperatur T in $^\circ\text{C}$ als unabhängige Variablen durchgeführt:

$$X_i = \beta_{0,i} + \beta_{\rho,i} \cdot \rho + \beta_{T,i} \cdot T$$

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in Tabelle 8 aufgeführt:

Tabelle 8: Koeffizienten, korrigiertes Bestimmtheitsmaß (R_{korr}^2) und Root Mean Square Error (RMSE) der Regressionsmodelle zur Abschätzung des Anteils an Rapsölkraftstoff und Biodiesel in Diesel auf Basis von Dichte und Temperatur

Modell	$\beta_{0,i}$	$\beta_{\rho,i}$	$\beta_{T,i}$	R_{korr}^2	RMSE
Rapsölkraftstoff	-1011,7	1,199	0,813	0,994	2,559
Biodiesel	-1719,2	2,036	1,425	0,994	2,575

Der Anteil von Pflanzenöl bzw. Biodiesel in binären Mischungen mit Diesel kann mithilfe der mit dem VLO-M1 Sensor gemessenen Dichte und Temperatur bestimmt werden. Da sich die Dichtebereiche der binären Mischungen von Pflanzenöl und Biodiesel zum Teil überschneiden, können nur Pflanzenölanteile über 65 % von Biodieselmischungen eindeutig abgegrenzt werden. Für geringere Anteile ist neben Temperatur und Dichte noch eine weitere Messgröße notwendig.

Die Messergebnisse zur dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur sind in Abbildung 44 zu sehen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die obere Grenze des Messbereichs bei 50 mPa s liegt und somit die Viskosität von unvermishtem Rapsölkraftstoff erst ab $> \text{ca. } 25^\circ\text{C}$ bestimmt werden kann. Für B000 und B100 ist eine gute Übereinstimmung zwischen den Labor- und Sensorwerten festzustellen, für P100 hingegen waren etwas größere Abweichungen zu beobachten. Im untersuchten Bereich hat der Kraftstoffdruck keinen wesentlichen Einfluss auf die Messung der dynamischen Viskosität.

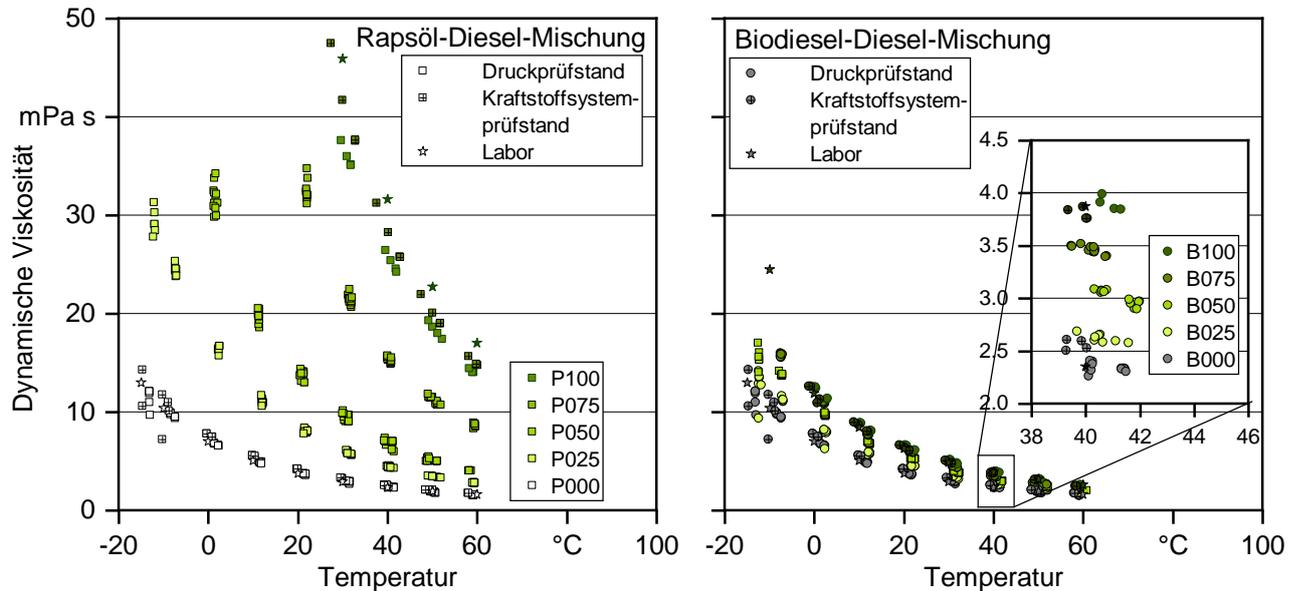


Abbildung 44: Messwerte der dynamischen Viskosität des VLO-M1 Sensors für verschiedene Rapsöl- und Biodiesel-Diesel-Mischungen in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu Laborwerten

Zur Abschätzung der Anteile X_i (in %) an Rapsölkraftstoff ($i = P$) bzw. Biodiesel ($i = B$) in Diesel anhand der vom VLO-M1 Sensor gemessenen dynamischen Viskosität η in mPa s und Temperatur T in °C wurde eine nichtlineare Regressionsanalyse durchgeführt. Da mit diesem Sensor eine Messung der dynamischen Viskosität für Rapsölkraftstoff unter 25 °C nicht möglich ist, wurden für die Regressionsanalyse nur Daten für Temperaturen von 30 °C und höher verwendet. Ausgangspunkt für die Ermittlung der nichtlinearen Regressionsfunktion ist die Andrade Gleichung, die die Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Reinstoffen beschreibt. Folgende Gleichung hat sich für die Abschätzung der Anteile als geeignet erwiesen, die dazugehörigen Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 9 aufgeführt:

$$X_i = A_i^{-1} \cdot \left(\ln(\eta) - B_i - \left(\frac{C_i}{T + 273} \right) + D_i \cdot \eta \right)$$

Tabelle 9: Koeffizienten, korrigiertes Bestimmtheitsmaß (R_{korr}^2) und Root Mean Square Error (RMSE) der Regressionsmodelle zur Abschätzung des Anteils an Rapsöl und Biodiesel in Diesel auf Basis der dynamischen Viskosität

Modell	A_i	B_i	C_i	D_i	R_{korr}^2	RMSE
Rapsölkraftstoff	0,02207	-7,522	2616	-0,0102	0,992	2,837
Biodiesel	0,00417	-4,163	1465	-0,1326	0,854	12,490

Für die Abschätzung des Rapsölanteils weist das Modell ein hohes Bestimmtheitsmaß auf. Das Modell zur Abschätzung des Biodieselanteils ist ungenauer, da sich die dynamische Viskosität von Diesel und Biodiesel weniger stark unterscheiden als von Diesel und Rapsölkraftstoff.

Durch Kombination der vom VLO-M1 Sensor bereitgestellten Informationen von Dichte und dynamischer Viskosität kann auch identifiziert werden, ob der Mischungspartner Pflanzenöl oder Biodiesel ist. Dies ist jedoch nur bei Kraftstofftemperaturen von über 25 °C eindeutig möglich, darunter wird insbesondere bei hohen Pflanzenölanteilen der gültige Messbereich überschritten.

FPS2800

Der FPS2800 von TE Connectivity ist für die Zustandsüberwachung von Motor-, Getriebe- und Hydraulikölen konzipiert. Die Messgrößen des Sensors sind Dichte, dynamische Viskosität, relative Permittivität und Temperatur. Baugleiche Sensoren wurden bereits von Dieringer (2012) [2] untersucht und die prinzipielle Eignung bestätigt. Durch die Ausgabe der Daten mittels CAN-Signalen, ist eine einfache Anbindung an Steuergeräte möglich. Im Rahmen des Vorhabens MuSt5-Trak wurden mit einem FPS2800 Sensor stichprobenartig Messungen an ausgewählten Mischungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Dichte bei 40 °C mit dem FPS2800 Sensor sind in Abbildung 45 dargestellt. Auffällig ist hierbei, dass der Sensor bei der Dichte im Vergleich zu den Laborwerten einen Offset von ca. 15 kg/m³ für alle gemessenen Kraftstoffe aufweist. Der Offset liegt innerhalb der im Datenblatt angegebenen Messgenauigkeit des Sensors. Dieringer (2012) [2] stellte bei ihren Untersuchungen keinen entsprechend großen Offset fest. Nichtsdestotrotz kann die vom Sensor ausgegebene Dichte zur Abschätzung der Anteile von Rapsölkraftstoff bzw. Biodiesel für binäre Mischungen mit Diesel verwendet werden, da vor

allen die relativen Unterschiede zwischen den Kraftstoffen von Bedeutung sind und der Offset mit einer Kalibrierung einbezogen werden kann. Die linearen Regressionsmodelle weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß auf. Wie auch beim VLO-M1 Sensor, kann anhand von Dichte und Temperatur erst ab ca. 65 % Beimischung von Rapsöl zu Diesel eindeutig Rapsöl als Mischungspartner bestimmt werden.

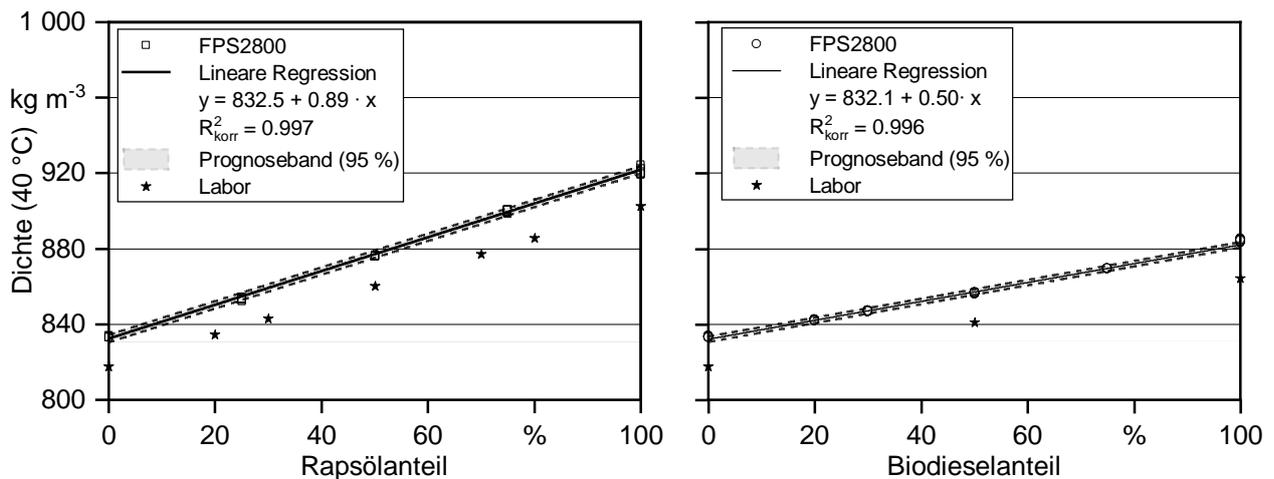


Abbildung 45: Dichte bei 40 °C des FPS2800 Sensors in Abhängigkeit vom Rapsöl- und Biodieselanteil in Dieselkraftstoff

Abbildung 46 zeigt die mit dem FPS2800 Sensor ermittelte dynamische Viskosität (40 °C) über den Rapsölkraftstoff- bzw. Biodieselanteil. Sie weist für alle Kraftstoffe eine sehr gute Übereinstimmung mit den im Labor bestimmten Werten auf. Mit steigendem Anteil an Rapsölkraftstoff bzw. Biodiesel nimmt die dynamische Viskosität exponentiell zu. Aufgrund der höheren Viskosität ist der Anstieg bei Rapsölkraftstoff deutlich stärker ausgeprägt als bei Biodiesel.

Die Ergebnisse zur relativen Permittivität sind Abbildung 47 zu entnehmen. Die relative Permittivität der Kraftstoffe und Kraftstoffmischungen liegt im Bereich von etwa 2,1 bis 3,4 und ist damit vergleichbar mit den Werten des HLB1400 und QLT Sensors. Auch die linearen Regressionsmodelle weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß von 0,995 und 0,996 auf. Der Pflanzenöl- bzw. Biodieselanteil kann damit auf +/- 5 % mit einer 95 %igen Wahrscheinlichkeit bestimmt werden. Eine Differenzierung zwischen Rapsölkraftstoff und Biodiesel ist mit einer Permittivitätsmessung allein jedoch nicht möglich. In Verbindung mit der vom FPS2800 ebenfalls gemessenen Dichte und Viskosität hingegen, ist eine Identifizierung des primären Mischungspartners möglich.

Um den Einfluss verschiedener Pflanzenölqualitäten und -arten auf das Ergebnis der Permittivität abzuschätzen, wurden Proben von fünf Rapsölen sowie von Sojaöl, Sonnenblumenöl und HO-Sonnenblumenöl gemessen. Die relative Permittivität unterscheidet sich bei diesen Ölen kaum (3,26 +/- 0,04), so dass deren Einfluss vernachlässigbar ist.

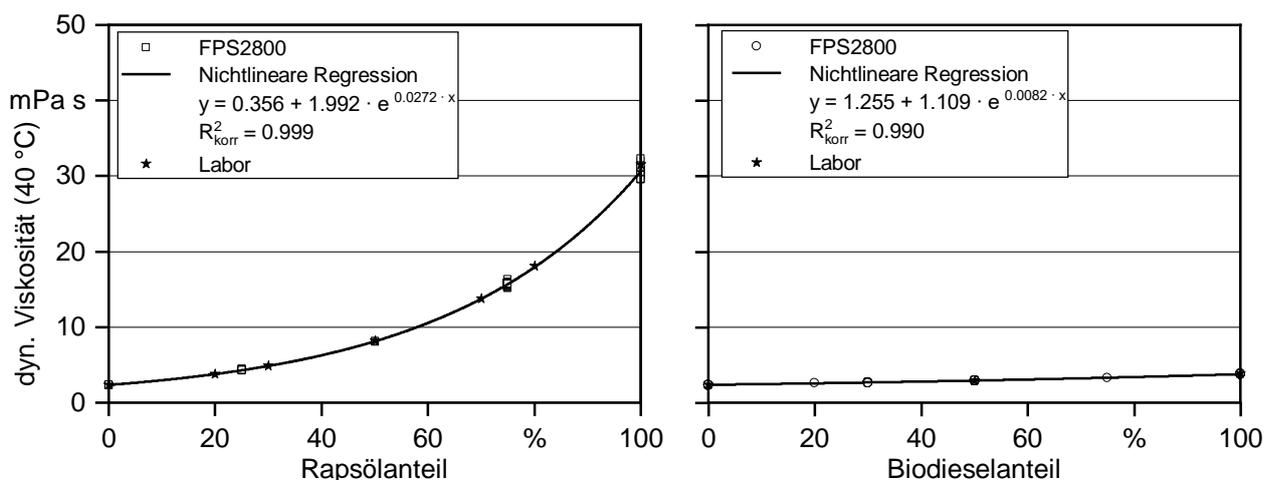


Abbildung 46: Dynamische Viskosität bei 40 °C des FPS2800 Sensors in Abhängigkeit vom Rapsöl- und Biodieselanteil in Dieselkraftstoff

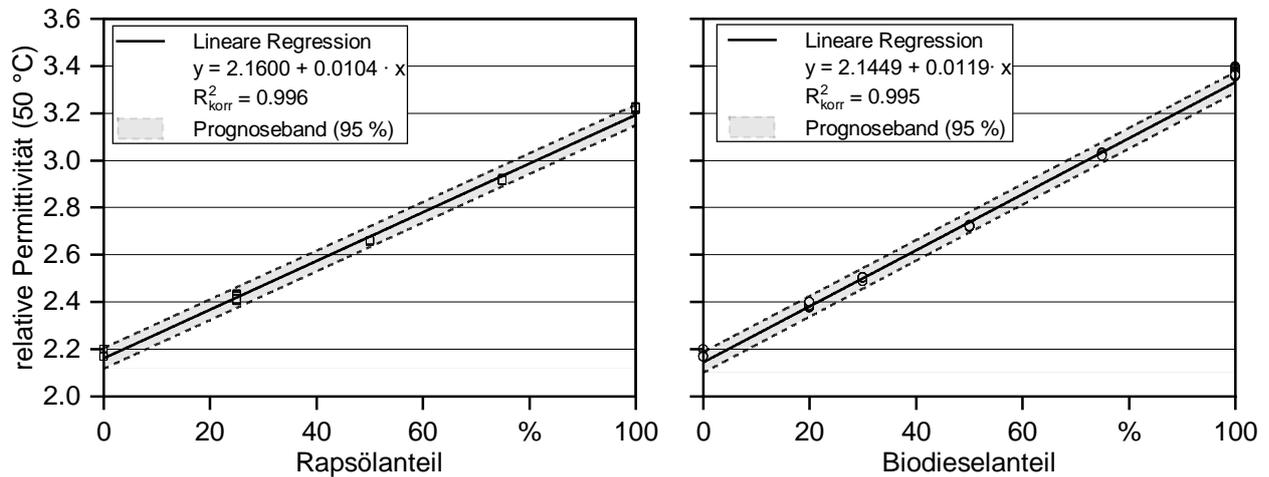


Abbildung 47: Relative Permittivität bezogen auf 50 °C im Temperaturbereich von 30 bis 40 °C des FPS2800 Sensors in Abhängigkeit vom Rapsöl- und Biodieselanteil in Dieselkraftstoff

Ultraschalllaufzeit

In Abbildung 48 sind die Ergebnisse des Ultraschallmesssystems für verschiedene Kraftstoffmischungen aufgetragen. Die Laufzeit des Ultraschallimpulses nimmt mit zunehmendem Rapsöl- bzw. Biodieselgehalt in Dieselkraftstoff ab. Die durchgeführte Regressionsanalyse zeigt, dass sich damit der Biokraftstoffanteil von binären Mischungen bestimmen lässt. Die 95%ige Prognosewahrscheinlichkeit liegt bei etwa +/-5%. Eine eindeutige Zuordnung zu Rapsölkraftstoff ist allerdings erst über einem zugemischten Anteil von ca. 50% möglich, da sich die Laufzeiten des Ultraschallimpulses bei geringeren Anteilen mit denen von Biodieselmischungen überlagern können. Ähnliche Beobachtungen wurden bei der Dichtemessung gemacht, was sich aus der Abhängigkeit von Schallgeschwindigkeit und Dichte ergibt.

Grundsätzlich könnte die Messung der Ultraschalllaufzeit zusammen mit einer Temperaturerfassung ein Baustein zur Kraftstoffdetektion sein. Jedoch sind derzeit keine entsprechenden Ultraschall-Sensoren bekannt, die für den Einbau in einen Traktor geeignet wären. Hierzu müssten zunächst weitere Entwicklungsarbeiten erfolgen.

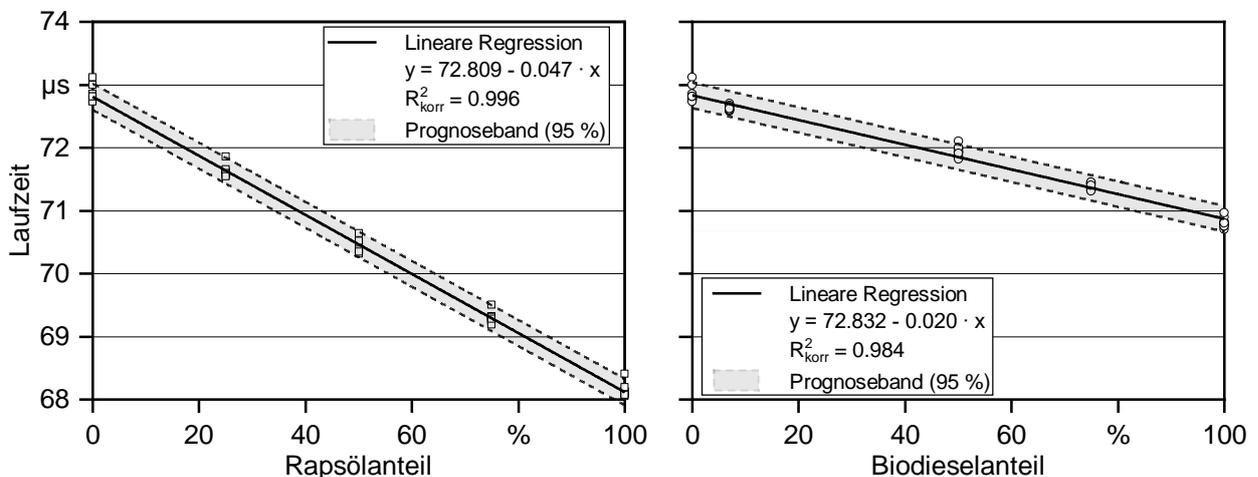


Abbildung 48: Laufzeiten eines Ultraschallimpulses in verschiedenen Kraftstoffmischungen bei einer Medientemperatur von 20 °C und bei einem Druck von 1 bar ($n = 10$)

Feldtest der Sensoren

Für den Test zur Praxistauglichkeit der Sensoren wurden der HLB1400 und der VLO-M1 Sensor ausgewählt und auf den Versuchstraktoren JD 6135R und JD 6250R installiert.

Der Einbauort lag bei beiden Maschinen zwischen dem Kraftstoffvor- und dem Kraftstoffhauptfilter. Dies hat den Vorteil, dass die Sensoren vor etwaigen Verunreinigungen oder Wasser im Kraftstoff geschützt sind und der Kraftstoff besser homogenisiert wird. Zudem sorgt der Einbau zwischen den Filtern für ausgeglichene Druck- und Fließgeschwindigkeitsverhältnisse.

Abbildung 49 zeigt die Ergebnisse der Permittivitätsmessung der HLB 1400 Sensoren, die am JD 6135R und JD 6250R eingebaut wurden. Am JD 6135R wurde einer beim Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff über 400 Stunden untersucht. Die Ergebnisse liegen im Bereich der am Prüfstand ermittelten Werte. Am JD 6250R erfolgte im Betrieb mit Rapsölkraftstoff die Datenaufzeichnung über einen Zeitraum von neun Monaten, um

die Zuverlässigkeit des Sensors im Praxiseinsatz zu testen. Während der über 450 h Betriebszeit mit Rapsölkraftstoff veränderten sich die Messwerte kaum (siehe Abbildung 49). Mehr als 99 % der Permittivitätswerte beider Sensoren streuen um weniger als $\pm 0,10$ um den jeweiligen Mittelwert.

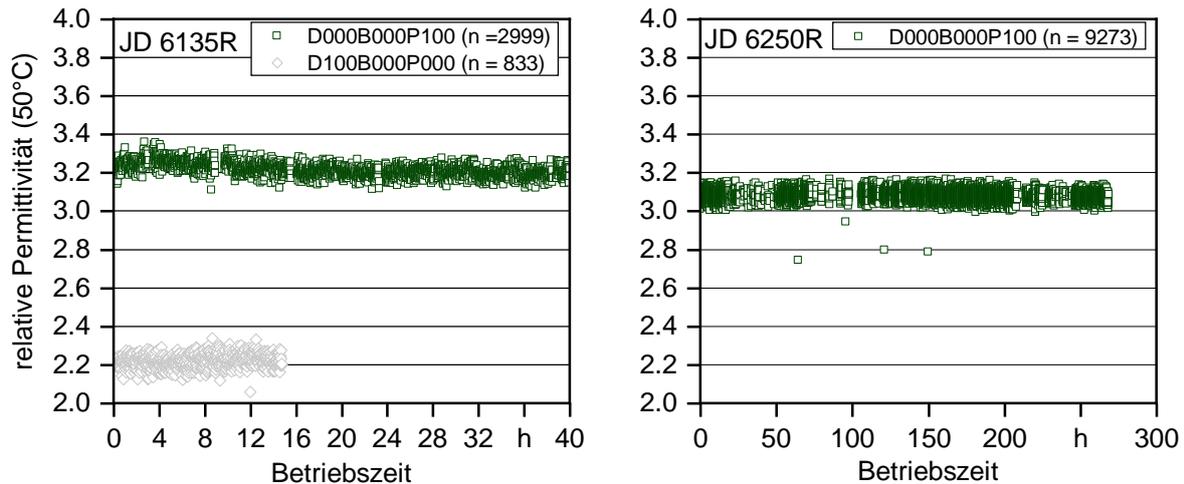


Abbildung 49: Relative Permittivität (50 °C) in Abhängigkeit von der Betriebszeit für Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff - Feldtestdaten eines HLB1400 am JD 6135R (links) und eines weiteren HLB1400 am JD 6250R (rechts)

Die Feldtestergebnisse der beiden VLO-M1 Sensoren sind in Abbildung 50 für verschiedene binäre Rapsöl-Diesel-Mischungen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Sowohl anhand der Dichte als auch anhand der dynamischen Viskosität sind die binären Mischungen eindeutig voneinander zu unterscheiden. Die Sensoren liefern über einen weiten Temperaturbereich – auch über der im Datenblatt angegebenen zulässigen Temperatur von max. 60 °C – zuverlässig plausible Werte. Mit Ausnahme der Messung von unvermishtem Rapsöl, stimmt die vom Sensor ausgegebene dynamische Viskosität gut mit den Sollwerten überein. Für Rapsöl hingegen liegen die vom Sensor ermittelten Werte deutlich über den Sollwerten. Dies war an den Sensorprüfständen nicht zu beobachten (vgl. Abbildung 44). Dennoch erscheint der Sensor prinzipiell geeignet, um die Kraftstoffzusammensetzung hinreichend genau zu bestimmen. Insgesamt absolvierte einer der Sensoren 400 Betriebsstunden am JD 6135R und ein weiterer 360 Betriebsstunden am JD 6250R. Bei zukünftiger Anwendung am Traktor sollte jedoch eine Messstelle ausgewählt werden, bei der die zulässigen Betriebstemperaturen der Sensoren nicht überschritten werden, um ihre Lebensdauer nicht zu beeinträchtigen. Gleichzeitig ist zu beachten, dass für eine zuverlässige Messung der dynamischen Viskosität von unvermishtem Rapsöl eine Kraftstofftemperatur von mindestens 30 °C sicherzustellen ist.

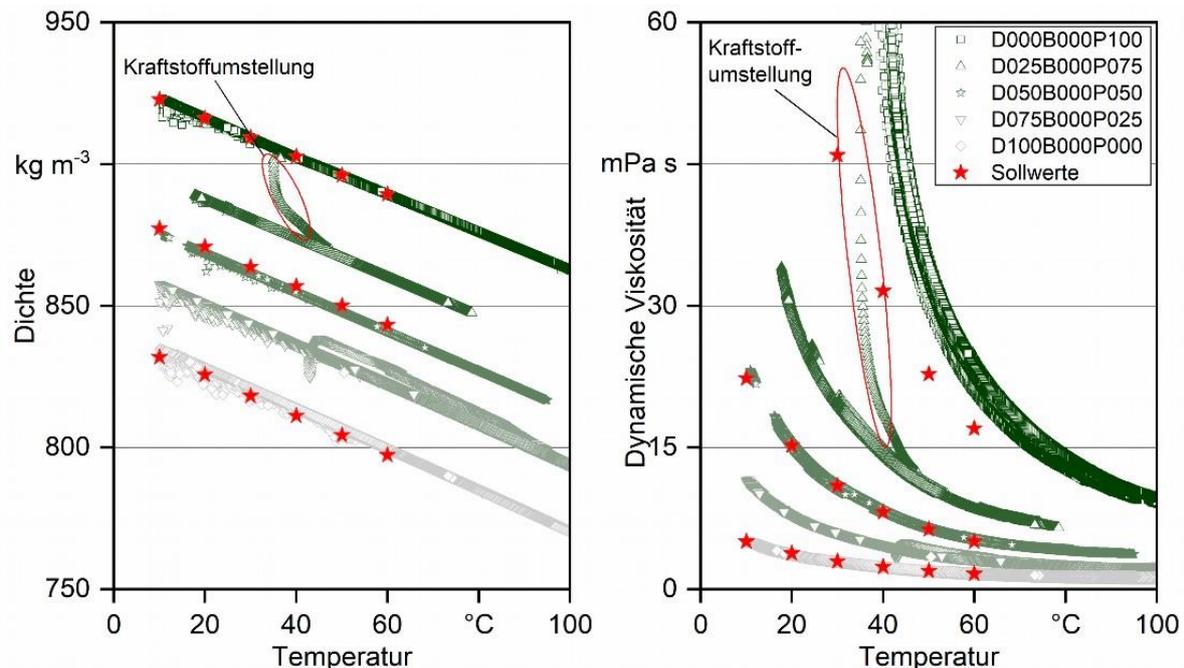


Abbildung 50: Dichte und dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene binäre Rapsöl-Diesel-Mischungen - Feldtestdaten des am JD 6135R installierten VLO-M1 Sensors

1.4.2.3 Fazit zu den Sensoren

Für die Detektion von binären Mischungen mit bekannten Mischungspartnern erscheinen alle Sensoren geeignet. Durch die Unterscheidung anhand der relativen Permittivität könnten auch besonders kostengünstige Lösungen realisiert werden. Zur Messung dieses Parameters sind derzeit jedoch nur Multiparametersensoren marktverfügbar, wie der HLB1400 oder der FPS2800, die jeweils etwa 400 bis 600 € bei Einzelbezug kosten.

Trinäre Mischungen könnten durch Multiparametersensoren wie den FPS2800 oder den VLO-M1 detektiert werden, da hier über die gleichzeitige Messung von Dichte und Viskosität eine Identifikation der Mischungspartner möglich ist. Nachteilig ist dabei allerdings, dass aufgrund der hohen Viskosität von Rapsölkraftstoff erst ab etwa 30 °C Kraftstofftemperatur belastbare Werte geliefert werden. Darüber hinaus wird beim VLO-M1 bereits bei über 60 °C die zulässige Medientemperatur überschritten, der FPS2800 kann hingegen bis 150 °C eingesetzt werden. Eine entscheidende Rolle spielt daher der Einbauort des Sensors am Fahrzeug.

Von den untersuchten Sensoren erscheint der FPS2800 Sensor, der bereits von Dieringer (2012) [2] untersucht wurde, am besten für die Kraftstoffdetektion von unbekanntem Mischungen aus Rapsöl, Biodiesel und Diesel in Abstufungen von 10 bis 20 % geeignet, was nach aktuellem Stand für die Anpassung der Motorsteuerung ausreichend ist. Fraglich ist jedoch noch die Langzeitstabilität bzw. Lebensdauer des Sensors, wenn er im Fahrzeug verbaut ist. In Kombination mit den modellbasierten Ansätzen zur Detektion der Kraftstoffe anhand von vorhandenen Sensoren oder der Stromaufnahme der Kraftstoffförderpumpen könnte auch ein Permittivitätssensor ausreichend sein.

1.4.3 Kraftstoffdetektion auf Basis von Machine Learning

Die Daten, welche am Prüfstand gewonnen wurden, dienen als Grundlage für den Aufbau einer Deep-Learning-Methode. Hiermit soll überprüft werden, ob dieser Ansatz ebenfalls zur Detektion des verwendeten Kraftstoffs eingesetzt werden kann. Hier wurden im Berichtszeitraum die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

Die SVM-Analyse (Support Vector Machine - Analyse) ist ein häufig verwendetes Werkzeug für maschinelles Lernen zur Klassifizierung und Regression.

In den meisten linearen Regressionsmodellen besteht das Ziel darin, die Summe der quadratischen Fehler zu minimieren (siehe Formel 2).

$$\text{MIN } \sum_{i=1}^n (y_i - w_i x_i)^2 \quad (2)$$

Dabei ist y_i der Zielwert, w_i der Koeffizient und x_i der Prädiktor (Merkmal).

Die Verwendung von SVMs in der Regression wird als Support Vector Regression (SVR) bezeichnet. SVR bietet die Flexibilität zu definieren, welche Abweichungen in einem Modell akzeptabel sind und findet eine geeignete Linie (oder Hyperebene in höheren Dimensionen), die zu den Daten passt.

Die Zielfunktion einer SVR besteht darin, die Koeffizienten - genauer gesagt die l_2 -Norm des Koeffizientenvektors - und nicht den quadratischen Fehler zu minimieren. Der Fehlerterm wird stattdessen in den Einschränkungen behandelt, in denen der absolute Fehler kleiner oder gleich einem bestimmten Rand gesetzt wird, der als maximaler Fehler Epsilon (ε) bezeichnet wird. Die neue Zielfunktion sowie die Beschränkung sind in den Formeln 3 und 4 dargestellt.

$$\text{MIN } \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (3)$$

$$|y_i - w_i x_i| \leq \varepsilon \quad (4)$$

Bei den Untersuchungen wurden Daten von 27 Motormerkmalen, bei mehr als 900 Messreihen betrachtet. Hierzu zählen unter anderem die Einspritzmengen, Zylinderdrücke und Temperaturen im Abgasstrang. Die Daten wurden mit den bereits dargestellten Mischungen aus Diesel und Rapsöl gesammelt. Auf dieser Grundlage wurde ein Regressionsmodell mithilfe von SVR trainiert. Hierbei wurden 80 % der Daten zum Trainieren des Modells und 20 % zum Validieren verwendet.

Abbildung 51 zeigt eine Darstellung der Ergebnisse nach Cubic SVR (Kernel Funktion: Ordnung des Polynoms 3). Punkte in Orange sind nach Trainingsmodell berechnete Mischungen von Rapsöl und Diesel. Punkte in Blau sind die tatsächlich verwendeten Mischungen.

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass das Modell ausreichend genau ist, um das jeweils passende Kennfeld zu selektieren. Die mittlere quadratische Abweichung beträgt ca. 4 %.

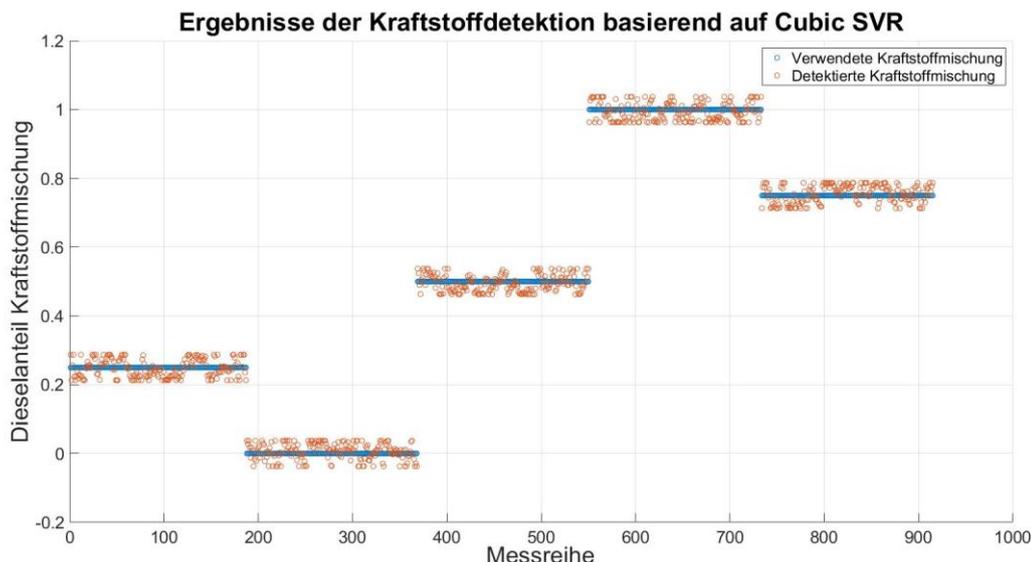


Abbildung 51: Ergebnisse der Kraftstofferkennung basierend auf Cubic SVR

In der nachfolgenden Tabelle (siehe Tabelle 10) sind die Standardabweichungen der Regressionsvorhersage sowie die kleinsten Fehlerquadrate für verschiedene Methoden dargestellt. Je kleiner die Standardabweichung ist und je näher sich das Fehlerquadrat dem Wert 1 nähert, desto besser sind die Ergebnisse. Damit zeigt sich, dass in diesem Fall die Cubic-SVM die Methode der Wahl darstellt.

Tabelle 10: Standardabweichung und Fehlerquadrate verschiedener Deep Learning Methoden für die Prüfstandsdaten

Methode	Standardabweichung	Fehlerquadrate
Linear Regression	0,11549	0,89
Linear Regression Interactions	0,062359	0,97
Linear Regression Robust	0,11891	0,89
Linear SVM	0,12808	0,87
Quadratic SVM	0,049237	0,98
Cubic SVM	0,040668	0,99

1.4.4 Fazit Kraftstofferkennungen

Es wurde gezeigt, dass die Reinkraftstoffe Diesel und Rapsöl auf Basis der internen Sensoren der Abgasnachbehandlung unterschieden werden können. Bei Mischungen der Kraftstoffe waren die Ergebnisse weniger gut. Hier hat sich gezeigt, dass weiterer Forschungsbedarf besteht. Binäre Mischungen konnten mit zusätzlichen Sensoren ausreichend genau erkannt werden. Hier war es sogar möglich, trinäre Mischungen, welche zusätzlich Biodiesel enthalten, zu erkennen. Basierend auf Maschine Learning konnten binäre Mischungen ebenfalls ausreichend genau erkannt werden. Hier liegen weitere Potentiale, welche durch nachfolgende Untersuchungen in Feldtestmaschinen ausgeschöpft werden können.

1.5 Emissions- und Leistungsmessungen der Traktoren

Emissions- und Leistungsmessungen werden an den beiden Feldtesttraktoren JD 6135R und JD 6250R am Traktorenprüfstand sowie im realen Betrieb durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Messtechnik sowie des Vorgehens bei den Messungen und der Auswertung ist Ettl et al. [11] zu entnehmen.

Zu Beginn des Feldtests werden beide Traktoren am Traktorenprüfstand mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff hinsichtlich Leistungs- und Emissionsverhalten untersucht. In Abhängigkeit vom Kraftstoff kommt dabei eine spezifische Motorsteuerungssoftware zum Einsatz. Mit dem JD 6135R werden darüber hinaus auch Messungen mit binären Mischungen aus Rapsölkraftstoff, Diesel und Biodiesel in 25 % Schritten durchgeführt. Die dafür verwendeten spezifischen Motorkennfelder wurden am Prüfstand der TU Kaiserslautern erstellt.

Die Ergebnisse der Emissions- und Leistungsmessungen im stationären Non-Road-Steady-Cycle (NRSC) für die Reinkraftstoffe sowie deren Mischungen sind in Abbildung 52 dargestellt. Es zeigt sich, dass die mittleren NO_x- und Partikelmasseemissionen für alle Kraftstoffe unter den Grenzwerten der Abgasstufe V von 0,4 g/kWh

für NO_x und $0,015 \text{ g/kWh}$ für Partikelmasse liegen. Die Leistung bei Nenndrehzahl beträgt im Mittel 82 kW . Größere Abweichungen vom Mittelwert weisen die Messungen mit den Kraftstoffen D000B100P000 und D025B075P000 mit 72 bzw. 76 kW sowie D075B000P025 mit 92 kW auf. Hierfür sind noch weitere Anpassungen der Motorkennfelder notwendig.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Einsatz von Rapsölkraftstoff und Biodiesel sowohl in Reinform als auch in Mischungen mit Dieselmotorkraftstoff bei kraftstoffspezifischer Motoreinstellung zu keiner Beeinträchtigung des Leistungs- und Emissionsverhaltens im Vergleich zum Dieselmotorenbetrieb führt.

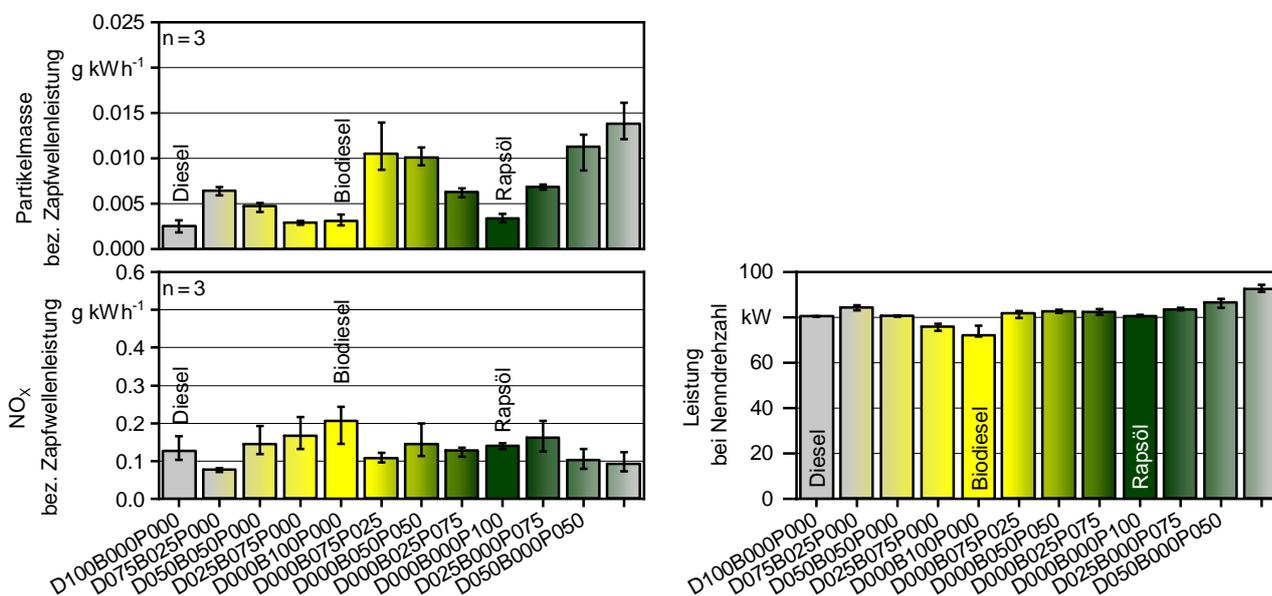


Abbildung 52: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse, Stickstoffoxide (NO_x) und Maximalleistung bei Nenndrehzahl des Traktors JD 6135R im Betrieb mit den Kraftstoffen Diesel, Biodiesel, Rapsöl und deren Mischungen gemessen im NRSC

Abbildung 53 zeigt die Ergebnisse der wiederkehrenden Emissionsmessungen an den beiden Traktoren über den Untersuchungszeitraum. Die Partikelmasseemissionen liegen deutlich unterhalb des Grenzwerts der Abgasstufe V von $0,015 \text{ g/kWh}$, unabhängig vom Prüfzyklus, Kraftstoff und Traktor. Auch die mittleren NO_x Emissionen sind im stationären NRSC Prüfzyklus bei allen Messungen deutlich unter den gesetzlichen Anforderungen. Im dynamischen NRTC Prüfzyklus sind zwar höhere NO_x -Emissionen zu verzeichnen, aber der Grenzwert von $0,4 \text{ g/kWh}$ (bezogen auf die Arbeit an der Kurbelwelle) wird voraussichtlich trotzdem eingehalten, wenn man berücksichtigt, dass sich die in Abbildung 53 dargestellten Werte auf die Arbeit an der Zapfwelle und nicht auf die Arbeit an der Kurbelwelle beziehen. Letztere würden um etwa 20 bis 30 % niedriger liegen. Zwischen den Kraftstoffen sind keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der NO_x - und Partikelmasseemissionen festzustellen, was auf ein für alle Kraftstoffe gut funktionierendes Abgasnachbehandlungssystem hinweist.

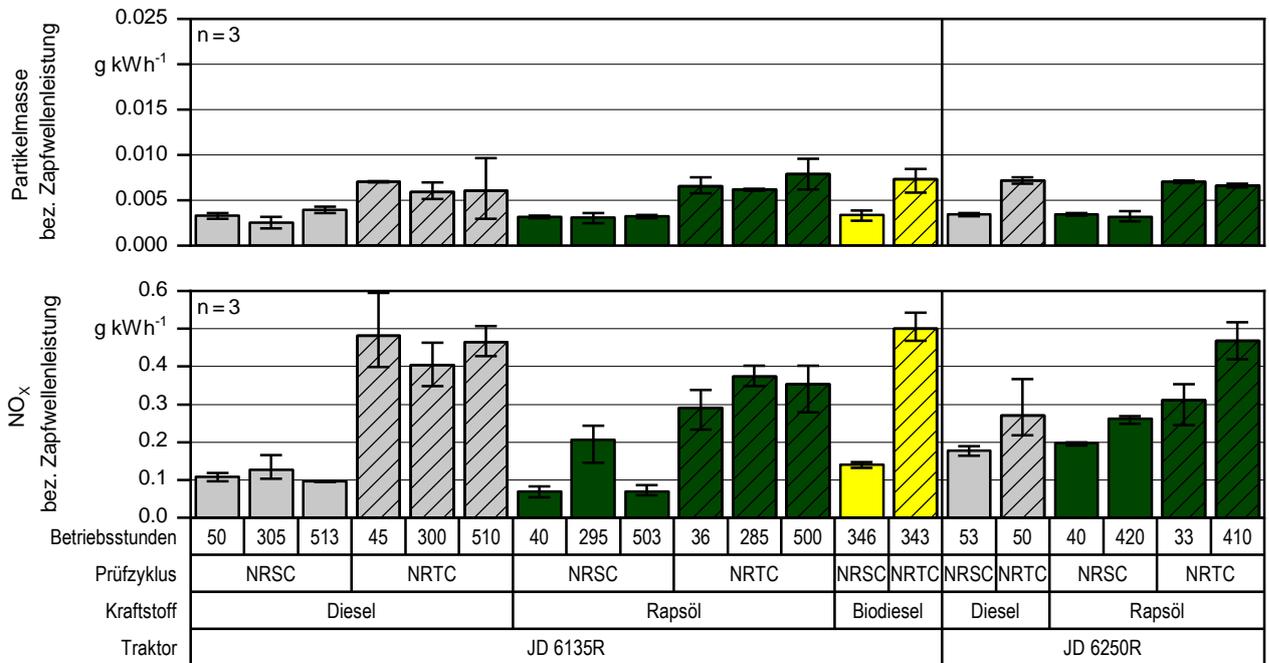


Abbildung 53: Mittelwerte und Spannweiten der Partikelmasse und Stickstoffoxide (NO_x) der Traktoren JD 6135R und JD 6250R bezogen auf die Zapfwellenleistung im Betrieb mit den Kraftstoffen Diesel, Biodiesel und Rapsöl gemessen im NRSC und NRTC zu verschiedenen Betriebsstundenständen

Mit dem Traktor JD 6135R wurden Messungen der Realemissionen bei Straßenfahrten sowohl mit Rapsöl- als auch mit Dieselmotorkraftstoff nach EU-Richtlinie 2017/655 durchgeführt und mit dem Tool EMROAD 6.03, unter Ausschluss von Kaltstarts und Non-Working Events, ausgewertet. Straßenfahrten stellen ein Worst-Case-Szenario dar, da der Traktor häufig bei extremer Schwachlast und im Stop-and-go-Betrieb gefahren wird. Die Ergebnisse der Stickstoffoxidmessungen sind in Abbildung 54 dargestellt. Bei allen Messfahrten liegt das 90. Perzentil der NO_x-Konformitätsfaktoren unter 1,5, was aktuell die Anforderung für EURO VI Heavy-Duty Motoren ist. Für Non-Road-Anwendungen sind bislang noch keine Anforderungen definiert. Dabei zeigt sich, dass zwischen Diesel und Rapsölkraftstoff keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich des Emissionsverhaltens festzustellen sind. Mit dem Traktor JD 6250R wurden Emissionsmessungen mit Rapsölkraftstoff sowohl bei einer Überführungsfahrt als auch während der Bodenbearbeitung Grubbern durchgeführt. Bei beiden Messungen liegt das 90. Perzentil deutlich unter einem Konformitätsfaktor von 1,0 und damit auf sehr niedrigem Niveau. Die Abgaskomponenten Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid sind bei beiden Traktoren nahe der Nachweisgrenzen. Beide Traktoren weisen somit im realen Betrieb ein sehr gutes Emissionsverhalten auf.

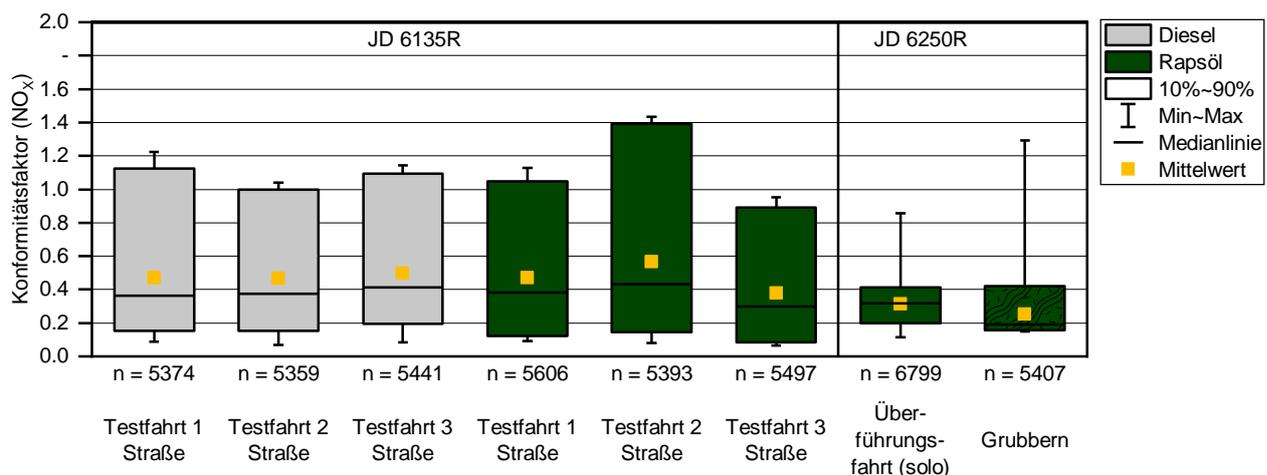


Abbildung 54: Konformitätsfaktoren der Stickstoffoxidemissionen (NO_x) des JD 6135R und des JD 6250R mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff bei Messungen unter realen Einsatzbedingungen (n: Anzahl Moving Averaging Windows)

Zusammenfassung der Feldversuche

Im Berichtszeitraum leistete der Traktor JD 6250R auf dem Staatsgut Almesbach etwa 940 Betriebsstunden. Der Traktor wurde vor allem zu Transportarbeiten, zum Güllefahren und zur Bodenbearbeitung eingesetzt. Der Traktor JD 6135R hat während der Untersuchungen insgesamt etwa 630 Betriebsstunden absolviert. Kleinere technische Probleme, die dem Prototypenstatus geschuldet waren, konnten meist schnell behoben

werden. Die an beiden Traktoren regelmäßig durchgeführten Motorölanalysen zeigen keine Auffälligkeiten bezüglich Kraftstoffeintrag oder Verschleiß. Auch ein vom örtlichen Landmaschinenhändler durchgeführter Motorsystemcheck am 6135R mit Fehlzündungs- und Kompressionsprüfung sowie Zylinderabschaltung weist auf einen guten Zustand des Fahrzeugs hin.

Am 6135R wurde durch John Deere eine dSpace MicroAutoBox II installiert, die die CAN Daten des Traktors auswertet und modellbasiert die verwendeten Kraftstoffe bzw. Kraftstoffmischungen bestimmt. Dadurch wurden die an den Prüfständen ermittelten Daten am Traktor mit verschiedenen Kraftstoffmischungen validiert.

1.6 Nebenergebnisse

Zusätzlich zu den vorgestellten Erkenntnissen aus den Arbeitspaketen konnten, während der Arbeiten am Projekt, die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse gewonnen werden.

Eine Tuningerkennung kann zum einen umgesetzt werden, indem der Kraftstoffdetektionsalgorithmus umgekehrt wird. Setzt man voraus, dass der Kraftstoff bekannt ist, kann die tatsächlich eingespritzte Kraftstoffmasse ermittelt werden. Diese wird mit dem Wert aus dem Motorsteuergerät abgeglichen. Weichen die Werte stark voneinander ab, kann entweder eine Fehlfunktion (bei zu niedriger tatsächlicher Einspritzmenge) oder Tuning (bei zu hoher tatsächlicher Einspritzmenge) ermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit, die tatsächliche Einspritzmenge mit der Vorgabe abzugleichen, ist die zeitlich fein aufgelöste Betrachtung des Raildrucks. Der Druckverlauf zeichnet sich durch zyklisches Ansteigen beim Pumpvorgang der Hochdruckpumpe, sowie durch Abfallen bei Ansteuerung der Injektoren aus. Über den Druckabfall im Rail bei einer Einspritzung, kann das Kraftstoffvolumen berechnet werden, welches das Rail verlassen hat. Bei beiden Ansätzen hat sich eine gute Deckung der berechneten und realen Werte am Prüfstand gezeigt.

Weiterhin lässt sich durch Auswertung des Raildrucks über 720° Kurbelwinkel feststellen, ob ein Defekt der Hochdruckpumpe vorliegt. Bauartbedingt kommt es zu zwei Pumpvorgängen bei einer Umdrehung der Kurbelwelle. In der Pumpe laufen zwei Kolben, welche über einen Exzenter bewegt werden. Im Falle eines Kolbenbruchs verändert sich der Druckverlauf, da nur noch ein Pumpvorgang stattfindet. Dies kann bei Betrachtung des Druckverlaufs erkannt werden.

Weitere Details hierzu sind in der Dissertation von Hinrichs zu finden [7].

Über den Projektverlauf wurden weitere Möglichkeiten zur Kraftstoffdetektion gesucht. Die Überlegung zur Verwendung von Zylinderdruckdaten stellt dabei eine vielversprechende Alternative dar. Zur Umsetzung einer solchen Kraftstofferkennung eignet sich, nach aktueller Einschätzung, vor allem die Verwendung eines Klopfensors. Dieser kann die nötigen Informationen liefern und ist in der motorischen Serienanwendung ein bereits häufig genutztes Bauteil.

Die Projektarbeiten am Motorenprüfstand lassen den Rückschluss zu, dass sich durch die Beimischung geringer Kraftstoffanteile mit vergleichsweise hoher Cetanzahl, Nachteile durch erhöhten Zündverzug von Pflanzenölen kompensieren lassen.

Aus den Regenerationsversuchen lässt sich ableiten, dass die Oxidation von Ruß mit Sauerstoff im Partikelfilter bereits bei niedrigeren Abgastemperaturen zu relevanten Oxidationsraten führt, als dies in der Literatur häufig beschrieben wird.

1.7 Schlusswort, Zusammenfassung und Ausblick

Die dargestellten Ergebnisse konnten durch die sehr gute Zusammenarbeit der Projektpartner erreicht werden. Im Laufe des Projekts wurden acht Konsortialmeetings zur bereichsübergreifenden Planung durchgeführt. Weiterhin gab es zur feineren Abstimmung regelmäßige Meetings der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Wegen pandemiebedingter Verzögerungen wurde das Projekt für alle Partner um 6 Monate verlängert.

Das Projekt MuSt5-Trak lieferte fundamentale Erkenntnisse zum Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen in weitestgehend konventionellen Dieselmotoren. Als wichtigste Teilergebnisse sind die verschiedenen Verfahren zur Kraftstofferkennung (basierend auf Kraftstoffsensoren, auf modellbasierter Kraftstofferkennung mit der Motorsensorik und auf Muster- bzw. KI-basierter Detektion ebenfalls mit der Seriensensorik) zu nennen. Weiterhin wurde erstmals ein Verfahren zur Regenerierung des Abgasnachbehandlungssystems mit reinem Pflanzenöl entwickelt. Dies ist ein Durchbruch zum Betrieb von Dieselmotoren der EU Abgasstufe V mit Pflanzenölkraftstoff und ohne Hilfskraftstoff wie in herkömmlichen Zweitanksystemen. Die Abgasgrenzwerte werden mit allen Kraftstoffen eingehalten. Mit Biokraftstoffen können durch deren günstiges Abgasverhalten in bestimmten Betriebspunkten energetische Wirkungsgradvorteile gegenüber dem Dieselbetrieb realisiert werden.

Als nächster Entwicklungsschritt ist die Integration des neuen Regenerierungsverfahrens für die Abgasnachbehandlungskomponenten in ein übergeordnetes technisches Abgas-Managementsystem notwendig. Nach Möglichkeit sollte die Regenerierung dabei im normalen Betrieb, also im mobilen Einsatz der Traktoren, und

nicht nur stationär erfolgen können. Ferner ist die Kraftstoffmatrix zu erweitern. Zusätzlich zu berücksichtigende Kraftstoffe sind vor allem der paraffinische Kraftstoff „HVO“ und synthetische Kraftstoffe. Es sollte untersucht werden, welche weiteren KI-Methoden eingesetzt werden können oder müssen, um zusätzliche Kraftstoffe und Mischungen differenziert bestimmen zu können. Für die Nutzung der KI-Verfahren sind Cloud-basierte Services und eine flächendeckende Konnektivität im ländlichen Bereich aufzubauen. Für beides wurden bei JD mehrere Forschungsprojekte gestartet: und zwar die Projekte Demeter (EU Horizon 2020, <https://h2020-demeter.eu/>), NaLamKI (BMW, <https://nalamki.de/>) und KILanKO (BMBF, <https://kilanko.de/>).

Das Projekt hat in Summe herausragende wissenschaftliche Ergebnisse erbracht. So ist eine Dissertation während der Projektlaufzeit (Michael Hinrichs, JD, TU Darmstadt) entstanden, eine weitere ist geplant (Matthias Thees, TU KL) und zwei weitere entstanden zwar nicht unmittelbar aus dem Projekt heraus, standen aber mit ihm in enger Verbindung (Patrick Sauer, JD, TU Darmstadt; Johannes Ettl, TFZ, TU München). Über das Projekt wurde und wird weiterhin in zahlreichen Vorträgen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen berichtet. Die Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP) hat zwei Messeauftritte von MuSt5-Trak auf der Internationalen Grünen Woche (IGW) 2019 und 2020 begleitet und finanziell unterstützt. Weitere geplante Messen bzw. Messeauftritte auf der IGW 2021 und 2022 konnten pandemiebedingt leider nicht stattfinden. MuSt5-Trak wurde außerdem als Projekt für die Woche der Umwelt 2020 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt ausgewählt. Hier kam es leider auch nur zu einer virtuellen Präsentation im Jahr 2021.

JD möchte im laufenden Jahrzehnt die Multifuel-Technologie weiterentwickeln und nach Möglichkeit in Serie einführen. Ob es dazu und zu einer Markteinführung kommt, hängt ganz wesentlich von den politisch-steuerlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Bei einer im CO₂-Kontext gerechten steuerlichen Behandlung haben nachhaltige Biokraftstoffe, wie Gegenstand in diesem Projekt, eine hervorragende Chance, einen Beitrag für eine nachhaltige Landwirtschaft mit hohem Wertschöpfungspotenzial zu leisten (s. Abschnitt 2).

Das Projektkonsortium ist glücklich und stolz auf das Geleistete und möchte sich herzlichst beim Fördermittelgeber, dem BMEL, und dem Projektträger, der FNR, für die finanzielle und organisatorische Unterstützung bedanken, ohne die das Projekt nicht hätte durchgeführt werden können.

1.8 Literaturverzeichnis

- [1] Munack, A.; Krahl, J. (2003): Erkennung des RME-Betriebes mittels eines Biodiesel-Kraftstoffsensors. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik. Braunschweig (Landbauforschung Völknerode, Sonderheft, 257).
- [2] Dieringer, S. (2012): Der Flexfuel Traktor. Untersuchungen zum Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoffen und zur Unterscheidbarkeit fossiler und biogener Kraftstoffe. Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2012. Aachen: Shaker (Berichte aus der Agrarwissenschaft).
- [3] Thuneke, K.; Schreiber, K. (2013): Qualitätsüberwachung von Motoröl-Rapsölmischungen mit Online-Ölsensoren - Labortests. In: Nelles, M. (Hrsg.): 7. Rostocker Bioenergieforum. Tagungsband. Rostock, 20.-1. Juni. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Nr. 36. Putbus: Wissenschaftsverlag Putbus, S. 261–269
- [4] Düsseldorf C. (2014): „Experimentelle Untersuchungen zur inner- und außermotorischen Partikelreduktion an einem Nutzfahrzeugdieselmotor zur Erfüllung der Abgasstufe IV im Betrieb mit biogenen Kraftstoffen“, Dissertation, TU Kaiserslautern, VKM Schriftenreihe Bd. 15, ISBN 978-3-943995-86-2
- [5] Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. Ansatzpunkte und Potentiale zur Minderung des Treibhauseffektes aus Sicht der fossilen Energieträger: DGMK-Projekt 448-2 1992
- [6] Hofmann U, Reinhardt P, Evtimova M (2006) Untersuchungen zum Einsatz eines Partikelfiltersystems beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsmethylester und Rapsöl. Chemie Ingenieur Technik 78(6): 709–714. doi: 10.1002/cite.200500188
- [7] Hinrichs M. (2021): Online Fault Detection of a Heavy Duty Diesel Engine with Model-Based Methods. Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, DOI: 10.26083/tuprints-00018886
- [8] Corach, J.; Sorichetti, P. A.; Romano, S. D. (2015): Electrical and ultrasonic properties of vegetable oils and biodiesel. In: Fuel 139 (1), S. 466–471. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.026
- [9] Šegatin, N.; Pajk Žontar, T.; Poklar Ulrih, N. (2020): Dielectric Properties and Dipole Moment of Edible Oils Subjected to 'Frying' Thermal Treatment. In: Foods (Basel, Switzerland) 9 (7). DOI: 10.3390/foods9070900.
- [10] TrueDyne Sensors AG (Hg.) (2020): DML01 Version: Viskositätssensor VLO-M1. Datenblatt I Technische Beschreibung und Installationsanleitung (DB-Ku-100078-5). Online verfügbar unter https://www.truedyne.com/download/truedyne_vlo-m1_datenblatt/?wpdmdl=5287&masterkey=5d4d39dd331ba.
- [11] Ettl, J.; Thuneke, K.; Emberger, P.; Remmele, E. (2019): Langzeitmonitoring pflanzenölauglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV. Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenölauglicher Traktoren auf den bayerischen Versuchsbetrieben. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Berichte aus dem TFZ, 60).

2. Erkenntnisse von Dritten

Dem Konsortium sind zum Zeitpunkt der Berichtserstellung keine weiterführenden neuen Erkenntnisse bekannt.

3. Öffentlichkeitsarbeit

Informationsbesuche bei Multiplikatoren und legislativen sowie exekutiven Organen

- Peter Pickel: Präsentation im Rahmen der studentisch organisierten Vortragsreihe „Ingenieur mit Zukunft“, 14.1.2019, TU Kaiserslautern.
- Peter Pickel: Besuch und Diskussion mit Hochschulleitung (u.a. Prof. Dr. Krahl), HS Ostwestfalen-Lippe, 12. März 2019
- Peter Pickel, Fabienne Seibold: Besuch und Diskussion mit Marco Weber MdL RLP, Mainz; 16. April 2019
- Peter Pickel: Vortrag für Mitglieder der Landwirtschaftskammern, Hofgut Neumühle, Münchweiler, 17. April 2019
- Peter Pickel: Statusbericht MuSt5-Trak, UFOP, Berlin, 19. Juni 2019
- Peter Pickel: Vortrag, Uni Rostock, 16. Dez. 2019
- Internationale Grüne Woche 2019 in Berlin
- Internationale Grüne Woche 2020 in Berlin. Vorstellung des Projekts MuSt5-Trak auf gemeinsamem Messestand der Branchenplattform für Biokraftstoffe im BBE e.V. (gefördert von der UFOP e.V.)
- Woche der Umwelt 2020 – Virtuelle Ausstellung verschoben auf 2021
- Peter Pickel: (Technische) Herausforderungen auf dem Weg zum Multifuel-Traktor – Das Projekt MuSt5. Ölmüllertage 2020, 11.-12. März 2020, Haus Düsse
- Peter Emberger: Vortrag für die Landwirtschaftsschüler der Berufsschule Straubing, 20.05.2021
- Peter Emberger: Vortrag für die Höhere Landbauschule Almesbach, 01.06.2021
- Peter Pickel: Statusbericht MuSt5-Trak, UFOP, 9.06.2021
- Klaus Thuneke: Vortrag für die Höhere Landbauschule Almesbach, 24.06.2021
- Peter Pickel: Erneuerbare Power durch Pflanzenölmotoren. Zukunftsforum (virtuell), Veranstalter TFZ, 13.7.2021
- Projekt-Konsortium: MuSt5-Trak – virtueller Abschlussevent am 11. August 2021, ca. 100 Teilnehmer
- Peter Pickel: Das Multifuel-Traktor-Konzept von John Deere. Ölmüllertage 2021, BDOel-Konferenz, 17.11.2021, John Deere Forum Mannheim
- Edgar Remmele: Vortrag Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu alternativen Antriebssystemen und Kraftstoffen im Land- und Forstwirtschaftssektor, Netzwerk Zukunftsraum Land, Österreich, 30.11.2021
- Edgar Remmele, Biokraftstoffe?! Ergebnisse aus Forschungsvorhaben des TFZ, VDI Arbeitskreis Landtechnik 19.01.2022
- Geplante Ausstellung auf der Internationalen Grünen Woche 2022 wurde Pandemie-bedingt abgesagt
- Angefragt Edgar Remmele: Vortrag bei Fachgespräch Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen des KTBL und VDMA für das BMEL am 9./10.03.2022

Beiträge zu Konferenzen und Fachveranstaltungen, sowie Fachzeitschriften

- Andreas Schröder: Präsentation im Rahmen des „ATZ live“ Experten-Forum Powertrain 2019; Modellbasierte Kraftstofferkennung an Dieselmotoren, 23.10.2019, Hanau
- Michael Hinrichs, Peter Pickel, Rolf Isermann: Virtual Sensors for State Detection of Internal Combustion Engines. 77th International Conference on Agricultural Engineering LAND.TECHNIK AgEng 2019, Nov. 8th/9th, Hanover, Germany
- Michael Hinrichs: Model-based injector deposit detection. Heavy-Duty, On- and Off-Highway Engines 2019, Challenge: CO₂ limits, 26. 11. – 27. 11. 2019, Friedrichshafen
- Andreas Schröder, Peter Pickel: Pflanzenöl und Energiewende. 6. Mitteleuropäische Biomassekonferenz CEBC 2020, 22.-24.01. 2020, Graz
- Michael Hinrichs: Onboard fuel detection of a stage 5 engine. Fuels of the Future 2020 (17th International Conference on Renewable Mobility), Berlin
- Dr. Axel Kunz: Rollout of alternatively powered tractors – potential for preventing CO₂ and fulfillment of energy demand till 2030. Fuels of the Future 2021 (18th International Conference on Renewable Mobility), Berlin
- Edgar Remmele, Henning Eckel, Peter Pickel, Josef Rathbauer, Gerd Reinhold, Roger Stirnimann, Roland Hörner, Norbert Uppenkamp: Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen (Alternative Powertrain Systems for Agricultural Machinery). KTBL-Schrift 519. Publisher: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 2020, 132 pages, ISBN 978-3-945088-73-9, URL: <https://www.ktbl.de/shop/produktkatalog/alle-kategorien/11519/>
- Thees, M., Guenther, M., Müller, F., „Thermal Management Concept for the Exhaust Aftertreatment of Commercial Vehicle Diesel Engines Using Variable Mixtures of Diesel Fuel and Rapeseed Oil,” SAE Technical Paper 2021-01-0498, 2021, doi:10.4271/2021-01-0498

- Michael Hinrichs: Online Fault Detection of a Heavy Duty Diesel Engine with Model-Based Methods. Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2021, DOI: 10.26083/tuprints-00018886
- Peter Pickel: Klimafreundlichere Traktoren in Sicht. Umweltmagazin, Bd. 51 (2021), Nr. 09-10, S. 42-44
- Andreas Herrmann: Landwirtschaft als Energieerzeuger - Weniger Emissionen durch Pflanzenöl im Tank. Mitteilung des VDI vom 26.10.2021, <https://www.vdi.de/news/detail/weniger-co2-durch-pflanzenoel-im-tank>.
- VDI: Zirkuläre Wertschöpfung - Regional erzeugtes Pflanzenöl zum Antrieb von Maschinen in der Landwirtschaft. Flyer: https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/themen/Zirkulaere_Wertschoepfung/Dateien/Flyer-TLS-Zirkulaere-Wertschoepfung-Regional-erzeugtes-Pflanzenoel-zum-Antrieb-von-Maschinen-in-der-Landwirtschaft.pdf
- Andreas Schröder: One Engine, One Tank, Various Fuel Blends – The Project MuSt5. Fuels of the Future 2022 (19th International Conference on Renewable Mobility), Berlin
- Peter Emberger: Sensor-based detection of rapeseed oil, biodiesel, diesel and their blends for multi-fuel engines. Fuels of the Future 2022 (2022 (19th International Conference on Renewable Mobility), Berlin
- Andreas Schröder, Peter Emberger, Julian Spiegel, Peter Pickel, Edgar Remmele: The Multifuel Tractor – A Flexible Fuel Option to Reduce Fossil Fuel Consumption. 79th International Conference on Agricultural Engineering LAND. TECHNIK AgEng 2022, Feb. 25., Hanover, Germany
- Thees, M., Müller, F., Günthner, M., „Optimierung des Regenerations- und Emissionsverhaltens eines Multi-Fuel-Motors bei Verwendung von Pflanzenöl-Diesel-Mischungen“, CVT-Symposium 2022, Commercial Vehicle Alliance Kaiserslautern, Voraussichtliche Veröffentlichung 03/2022
- Geplante Veröffentlichung beim ATZ Heavy-Duty Motoren Kongress 2023, über die Erkenntnisse zur Regeneration im Teillastbetrieb insbesondere im Vergleich zur High-Idle-Regeneration und des Nutzens von AGR zur Abgastemperatursteigerung.
- Geplante Veröffentlichung im Fachmagazin Schule und Beratung des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie im Bayerischen Landwirtschaftlichen Wochenblatt

Öffentlichkeitsarbeit und Durchführung einer Abschlussveranstaltung

Der Projektfortschritt wurde von Seiten des TFZ stetig auf einer Webseite sowohl in deutscher, als auch englischer Sprache veröffentlicht (<https://www.tfz.bayern.de/biokraftstoffe/projekte/201806/index.php> bzw. <https://www.tfz.bayern.de/biokraftstoffe/projekte/217995/index.php>).

Im Rahmen einer Hybridveranstaltung wurden die Ergebnisse des Projekts erfolgreich am 12. August 2021 am TFZ in Straubing präsentiert. Die Veranstaltung hat mehr als 100 Vertreter aus Politik, Landwirtschaft, Forschung und Industrie erreicht. Die Begrüßung fand durch Herrn Dr. Remmele und Prof. Dr.-Ing. Pickel statt. Im Anschluss gab es zwei Grußworte, welche von Frau Staatsministerin Michaela Kaniber (MdL, Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) und Herrn Dr.-Ing. Andreas Schütte (Geschäftsführer der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) gesprochen wurden. Das dritte Grußwort von Herrn Dr. Volker Niendieker (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) musste leider entfallen. Nach der Präsentation der wissenschaftlichen Ergebnisse fand eine angeregte Fragen- und Diskussionsrunde mit den Gästen statt. Auch im Nachgang zur Veranstaltung gab es weiteres Interesse und weiteren Austausch mit Gästen.

Die veröffentlichten Vortragsfolien sind unter folgendem Link abrufbar:

https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biokraftstoffe/dateien/210812_multifueltraktor_must5trak.pdf

Weiterhin wurde ein knapp vierminütiges Video über das Projekt erstellt, welches bei der Abschlussveranstaltung gezeigt wurde und außerdem auf YouTube zu finden ist (<https://www.youtube.com/watch?v=ruohq2FDNY4>). Dieses Video wurde weiterhin in die englische Sprache übersetzt, um eine noch größere Zuhörerschaft zu erreichen und über soziale Medien geteilt.

Die Feldtestmaschinen waren auf Betrieben der Bayerischen Staatsgüter im Einsatz und wurden zum Teil auch für die Lehrlingsausbildung mit eingesetzt.

ANHANG

Teilvorhaben 1 (John Deere): Adaption von Motorsteuergeräten und dessen Implementierung in ein Versuchsfahrzeug, FKZ 22408217

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die Arbeiten der John Deere GmbH & Co. KG (JD) wurden durch das John Deere European Technology and Innovation Center (JD ETIC) geleitet und maßgeblich durchgeführt. JD ETIC hat die Zusammenarbeit der Partner koordiniert, insbesondere den Austausch der Ergebnisse zwischen den Bearbeitern verschiedener Arbeitspakete. In Bezug auf die Technologieentwicklung lag der Schwerpunkt des John Deere ETIC auf der Weiterentwicklung eines Multi-Kraftstoffmotors mit automatischer Kraftstofferkennung und Umschaltung. Der Fokus lag auf der Weiterentwicklung der betriebssicheren Kraftstoffdetektion und der Neuentwicklung von Umschaltalgorithmen sowie der entsprechenden Motorkennfelder zur Erfüllung aktuell gültiger und zukünftiger Abgasemissionsgrenzwerte liegen. Weiterhin stellte JD die Versuchsträger inklusive der benötigten Ersatzteile bereit. Dies waren insbesondere zwei Traktoren zur Prüfung der Praxistauglichkeit im Feldtest sowie die entsprechenden Motoren für die Prüfstände.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1: Koordination der Projektpartner und der Arbeitspakete

AP 2: Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus

AP 3: Entwicklung des Umschaltalgorithmus

AP 4: Motorenkennfelder: Adaption und Anpassung der Motorleistung

AP 5: Validierung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus des Umschaltalgorithmus und der Kennfeldanpassung

AP 6: Analyse des Einsatzes von neuronalen Netzen, Aufbau der Deep Learning Datenbasis

AP 7: Integration der Multi Kraftstofftechnologie in eine Feldtestmaschine, welche die Abgasstufe 5 entsprechend der aktuell diskutierten Grenzwerte erfüllt

AP 8: Informationsbesuche bei Multiplikatoren und legislativen sowie exekutiven Organen

AP 9: Beiträge zu Konferenzen und Fachveranstaltungen, sowie Fachzeitschriften

AP 10: Öffentlichkeitsarbeit und Durchführung einer Abschlussveranstaltung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP 1: Koordination der Projektpartner und der Arbeitspakete

Die dargestellten Ergebnisse konnten durch die sehr gute Zusammenarbeit der Projektpartner erreicht werden. Im Laufe des Projekts wurden acht Konsortialmeetings zur bereichsübergreifenden Planung durchgeführt. Weiterhin gab es zur feineren Abstimmung regelmäßige Meetings der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Wegen pandemiebedingter Verzögerungen wurde das Projekt für alle Partner um 6 Monate verlängert.

AP 2: Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus

Es wurde ein Kraftstoffdetektionsalgorithmus auf Basis im Serienprodukt vorhandener Sensoren erstellt. Die verbauten NO_x Sensoren wurden verwendet, um den Sauerstoffgehalt im Abgas zu ermitteln. Der theoretische Sauerstoffgehalt für alle Kraftstoffmischungen (in 1 % Schritten) wird über die eingespritzte Kraftstoffmasse mit dem Sauerstoffgehalt verrechnet, der zur Verbrennung zur Verfügung steht. Durch den Abgleich der theoretischen Werte mit dem gemessenen Wert im Abgas, kann auf die verwendete Kraftstoffmischung zurückgeschlossen werden. Dies ist möglich, weil Diesel und Rapsöl beziehungsweise Biodiesel einen unterschiedlichen Sauerstoffbedarf haben. Dieser Ansatz ist nicht nur auf die geprüften Kraftstoffe beschränkt, sondern kann beispielsweise auch für HVO verwendet werden. Um diesen Ansatz umsetzen zu können, war es notwendig, die Einspritzmengen für alle verwendeten Kraftstoffmischungen zu kennen. Da die Einspritzkennfelder nur für Diesel bekannt waren, mussten zusätzliche Kennfelder generiert werden. Hierauf wird in Arbeitspaket 4 näher eingegangen.

Ausführlichere Informationen zum Detektionsalgorithmus sind im gemeinsamen Teil des Abschlussberichts zu finden (siehe Abschlussbericht Kapitel 1.4.1).

AP 3: Entwicklung des Umschaltalgorithmus

Ist eine Kraftstoffmischung erkannt, so soll im nächsten Schritt das entsprechend passende Kennfeld für die Einspritzungen verwendet werden. Hierfür wurde ein Python-Skript geschrieben, mit welchem das aktuell verwendete Kennfeld ausgelesen und überprüft wird, ob es das korrekte Kennfeld für die detektierte Kraftstoffmischung darstellt. Ist dies nicht der Fall, wird das passende Kennfeld in den Speicher der ECU geladen und aktiviert. Hierzu wurde jedem Kennfeld ein Schlüssel zugewiesen, welcher beim Ablegen des Kennfeldes in den Speicher der ECU ebenfalls abgelegt wird. Dieser Schlüssel ist anschließend auch auf dem CAN-Bus zu finden, worüber auch die Daten des Detektionsalgorithmus abgegriffen werden. Die Überprüfung

des Kennfeldes wird zum einen nur durchgeführt, wenn der Motor läuft – beim Einschalten der Zündung findet noch keine Auswertung statt, da auch noch keine Kraftstoffmischung detektiert werden kann. Zum anderen muss erst eine festgelegte Anzahl an validen Messreihen eingegangen sein, damit die Sicherheit erhöht ist, das richtige Kennfeld auszuwählen. Die Anzahl der notwendigen Messreihen kann flexibel festgelegt werden. Ergibt die Auswertung des Detektionsalgorithmus kein Ergebnis, verbleibt das Kennfeld für 100 % Rapsöl auf der ECU. Dies wurde gewählt, da bei hohen Raildrücken und langen Injektorimpulsdauern (hohe Last) mehr Rapsöl eingespritzt wird als Diesel. Die interne Leistungsberechnung der ECU greift auf die Einspritzmenge zurück, welche im Kennfeld für einen definierten Raildruck und eine definierte Injektorimpulsdauer hinterlegt ist. Ist tatsächlich Rapsöl im System, entspricht die Leistung der Maschine dem Soll. Wäre Diesel im System, würde weniger Kraftstoff eingespritzt werden und die Maschine hätte weniger Leistung. Im umgekehrten Fall hätte die Maschine mehr Leistung, als zugelassen und somit eine unzulässige Leistungssteigerung.

AP 4: Motorenkennfelder: Adaption und Anpassung der Motorleistung

Meistens wird bei Dieselmotoren die tatsächlich in den Zylinder eingespritzte Kraftstoffmasse nicht gemessen. Vielmehr wird diese über, auf dem Steuergerät hinterlegte, Einspritzkennfelder vorgesteuert. Auf Basis einer gewünschten Einspritzmasse ($m_{f,d}$) und dem aktuellen Raildruck (p_{rail}) wird über das Kennfeld die für diese Einspritzmasse notwendige Injektorimpulsdauer (IID) bestimmt. Da das Kennfeld, welches auf dem Motorsteuergerät hinterlegt ist, nur für Diesel korrekt ist, mussten neue Kennfelder für die Mischungen erstellt werden (0 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Dieselanteil). Die grundlegenden Untersuchungen hierzu wurden am Motorenprüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt. Diese Kennfelder sind ebenfalls die Basis, um die Leistung bei der Verwendung verschiedener Kraftstoffmischungen abzustimmen. Die Ergebnisse zu den Leistungs- und Emissionsmessungen sind im gemeinsamen Teil in Kapitel 1.5 zu finden.

AP 5: Validierung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus des Umschaltalgorithmus und der Kennfeldanpassung

Die Auswertungen, basierend auf den Prüfstandsdaten, zeigen eine korrekte Kraftstofferkennung für Diesel, Rapsöl und verschiedene Mischungsverhältnisse beider Kraftstoffe mit einer Genauigkeit von ca. ± 5 %. Die Qualität der Kraftstofferkennung hängt stark von den Lastpunkten ab, in denen der Motor betrieben wurde. Es hat sich gezeigt, dass eine unveränderte Übertragung des Ansatzes, welcher am Prüfstand funktionierte, nicht möglich ist. Bei der Ermittlung der Einspritzmenge werden zwei verschiedene Größen herangezogen. Zum einen wird der Parameter DesiredFuel (DF) vom Steuergerät ausgelesen und zum anderen die MultipleInjectionQuantities (MIQ). Die Auswertung konnte mit den MIQ verbessert werden. Weiterhin wurde eine Korrektur des Sauerstoffgehalts durchgeführt. Berechnet man bei bekannter Kraftstoffmischung den theoretischen Sauerstoffgehalt und vergleicht ihn mit dem gemessenen Sensorwert der Feldtestmaschine, so zeigt sich, dass diese nicht übereinstimmen. Differenzen zwischen berechnetem und gemessenem Wert kommen zum einen zustande durch Abweichungen zwischen tatsächlicher und angenommener Einspritzmenge, tatsächlichem und angenommenem Luftmassenstrom und zum anderen durch Messungenauigkeiten des Sensors. Eine Auswertung des Modells mit integrierter Korrektur des gemessenen Sauerstoffwertes zeigt eine deutliche Verbesserung der Kraftstofferkennung. Die Reinkraftstoffe können sehr gut detektiert werden. Weiterer Forschungsbedarf hat sich bei den Feldtests für die Kraftstoffmischungen gezeigt. Hier werden weitere Untersuchungen folgen, um zum einen die Datenbasis zu erweitern und zum anderen auch die Mischungen der beiden Kraftstoffe besser unterscheiden zu können. Nähere Beschreibungen sind dem gemeinsamen Teil des Abschlussberichts zu entnehmen (Kapitel 1.4.1.6). Weiterhin sollen in Zukunft Hydrotreated Vegetable Oils (HVO) in die Kraftstoffmatrix aufgenommen werden.

Da sich gezeigt hat, dass die Detektion mit reinem Rapsöl am besten funktioniert, wurde der Umschaltalgorithmus mit diesem Kraftstoff validiert. Zu Beginn waren die Betriebsparameter für Diesel auf dem Motorsteuergerät hinterlegt. Nach einer Anzahl von zehn ausgewerteten Messreihen der Kraftstoffdetektion wurde die automatisierte Umschaltung umgesetzt. Die Funktion wurde erfüllt und es wurden die korrekten Parameter für den Betrieb mit 100 % Rapsöl auf dem Steuergerät hinterlegt.

AP 6: Analyse des Einsatzes von neuronalen Netzen, Aufbau der Deep Learning Datenbasis

Die Daten, welche am Prüfstand gewonnen wurden, dienten als Grundlage für den Aufbau einer Deep-Learning-Methode. Hiermit wurde überprüft, ob dieser Ansatz ebenfalls zur Detektion des verwendeten Kraftstoffs eingesetzt werden kann. Die SVM-Analyse (Support Vector Machine - Analyse) ist ein beliebtes Werkzeug für maschinelles Lernen zur Klassifizierung und Regression. Bei den Untersuchungen wurden Daten von 27 Motormerkmalen, bei mehr als 900 Messreihen betrachtet. Hierzu zählen unter anderem die Einspritzmengen, Zylinderdrücke und Temperaturen im Abgasstrang. Die Daten wurden mit den bereits dargestellten Mischungen aus Diesel und Rapsöl gesammelt. Auf dieser Grundlage wurde ein Regressionsmodell mithilfe von SVR trainiert. Hierbei wurden 80 % der Daten zum Trainieren des Modells und 20 % zum Validieren verwendet. Es hat sich gezeigt, dass das Modell ausreichend genau ist und die mittlere quadratische Abweichung ca. 4 % beträgt. Dies bestätigt, dass der Ansatz Ergebnisse liefert, welche ausreichend genau sind. Im gemeinsamen Teil wird hierauf ausführlicher eingegangen (Kapitel 1.4.3).

AP 7: Integration der Multi Kraftstofftechnologie in eine Feldtestmaschine, welche die Abgasstufe 5 entsprechend der aktuell diskutierten Grenzwerte erfüllt

Nachdem die Kraftstoffdetektion am Prüfstand validiert wurde, wurde ein Modell erstellt, welches auf einer Feldtestmaschine zum Einsatz kommt. Im ersten Schritt wurden Veränderungen am Motorsteuergerät vorgenommen, um das Auslesen benötigter Informationen zu ermöglichen. Hierbei wurden verschiedene Nachrichten auf dem CAN-Bus um die Parameter erweitert, welche zur Analyse der Kraftstoffmischungen benötigt werden. Die Daten werden mit einer dSpace Micro Autobox II verarbeitet und zusätzlich mit einem CAN-Logger aufgezeichnet. Somit ergibt sich die Möglichkeit auch im Nachgang Veränderungen am Modell zu testen. Für die Detektion werden 300 Sekunden lang Motorparameter gespeichert und anschließend in 10 Sekunden Segmenten ausgewertet. Nach der Auswertung wird eine Nachricht auf dem CAN-Bus gesendet, welche die erkannte Mischung enthält.

Nachdem die Kraftstoffdetektion auf der Feldtestmaschine umgesetzt wurde, war der nächste Schritt, eine automatisierte Umschaltung umzusetzen. Auch hier wurden zunächst Tests am Motorenprüfstand der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt. Es werden Veränderungen im Motorsteuergerät vorgenommen, welche den Betrieb an die jeweils erkannte Kraftstoffmischung anpassen. Dies wurde unter Verwendung eines Computers sowie eines Service Advisor Tools (Electronic Data Link) von John Deere umgesetzt. Nur mit dem Tool kann eine Verbindung zwischen dem Computer und dem Motorsteuergerät hergestellt werden, über die der Ansatz umgesetzt werden kann.

Wurde der Motor gestartet, startet ebenfalls automatisch die Micro Autobox II mit der Kraftstoffdetektion. Ist die Betriebstemperatur des NO_x-Sensors erreicht und sind die Motorparameter im definierten Rahmen, startet automatisiert das Modell zur Bestimmung des verwendeten Kraftstoffs. Wurden valide Messreihen ausgewertet, schickt die Autobox einen Schlüssel für das zu verwendende Kennfeld über den CAN-Bus. Über den Electronic Data Link ist ein Testcomputer ebenfalls an den CAN-Bus angeschlossen. Um die automatisierte Umschaltung umzusetzen, läuft auf diesem Computer ein Programm, welches zunächst den Schlüssel abfragt, welcher von der Autobox ausgegeben wurde. Da auch das aktuell hinterlegte Kennfeld einen Schlüssel hat, welcher auf dem CAN-Bus hinterlegt ist, können diese beiden abgeglichen werden. Ist das korrekte Kennfeld bereits hinterlegt, findet keine Umschaltung statt. Sind die beiden Schlüssel jedoch nicht identisch, wird eine Anpassung vorgenommen. In diesem Fall wird ein neues Kennfeld auf dem Motorsteuergerät hinterlegt und aktiviert. Umgesetzt wird dies über die Verbindung mit dem Electronic Data Link. Dieses Tool ist notwendig, um den Zugriff auf das Steuergerät zu ermöglichen. Über John Deere interne Software wird die Umstellung durch das geschriebene Programm umgesetzt. Auf direktem Wege ist dies aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Ist das neue Kennfeld auf dem Steuergerät hinterlegt, wird ebenfalls der Schlüssel angepasst, damit auch weiterhin der Detektionsalgorithmus korrekt funktionieren kann. Im Anschluss läuft die Kraftstoffdetektion weiter und erst wenn eine neue Mischung erkannt wird, findet wieder eine Umstellung statt. In weiteren Entwicklungsschritten kann es möglich sein, die Kraftstoffdetektion und entsprechend auch direkt die Umschaltung auf dem Steuergerät zu implementieren. Um bei den Untersuchungen flexibler zu sein, wurde sich jedoch zunächst für den beschriebenen Ansatz entschieden.

AP 8: Informationsbesuche bei Multiplikatoren und legislativen sowie exekutiven Organen

Eine Auflistung ist im Hauptteil des Abschlussberichts zu finden (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

AP 9: Beiträge zu Konferenzen und Fachveranstaltungen, sowie Fachzeitschriften

Eine Auflistung ist im Hauptteil des Abschlussberichts zu finden (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

AP 10: Öffentlichkeitsarbeit und Durchführung einer Abschlussveranstaltung

Im Rahmen einer Hybridveranstaltung wurden die Ergebnisse des Projekts erfolgreich am 12. August 2021 am TFZ in Straubing präsentiert. Die Veranstaltung hat mehr als 100 Vertreter aus Politik, Landwirtschaft, Forschung und Industrie erreicht. Die Begrüßung fand durch Herrn Dr. Remmele und Prof. Dr.-Ing. Pickel statt. Im Anschluss gab es zwei Grußworte welche von Frau Michaela Kaniber (MdL, Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) und Herrn Dr.-Ing. Andreas Schütte (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) gesprochen wurden. Das dritte Grußwort von Herrn Dr. Volker Niendieker (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) musste leider entfallen. Nach der Präsentation der wissenschaftlichen Ergebnisse fand eine angeregte Fragen- und Diskussionsrunde mit den Gästen statt. Auch im Nachgang zur Veranstaltung gab es weiteres Interesse und weiteren Austausch mit Gästen.

Die veröffentlichten Vortragsfolien sind unter folgendem Link abrufbar:

https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biokraftstoffe/dateien/210812_multifueltraktor_must5trak.pdf

Weiterhin wurde ein knapp vierminütiges Video über das Projekt erstellt, welches bei der Abschlussveranstaltung gezeigt wurde und außerdem auf YouTube zu finden ist (<https://www.youtube.com/watch?v=rueh2FDNY4>). Dieses Video wurde weiterhin in die englische Sprache übersetzt, um eine noch größere Zuhörerschaft zu erreichen und über soziale Medien geteilt.

Teilvorhaben 2 (TFZ): Sensortest und Untersuchung des Gesamtsystems auf dem Traktorenprüfstand und im Feldeinsatz, FKZ 22408617

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Multifuel-Traktor - Sensortest und Untersuchung des Gesamtsystems auf dem Traktorenprüfstand und im Feldeinsatz

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 11: Evaluierung von Sensoren und Modellentwicklung zur Kraftstoffidentifikation

AP 12: Emissions- und Leistungsmessung des Traktors im (Multifuel-) Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen und Kraftstoffmischungen am Traktorenprüfstand, um die erfolgreiche Integration der entwickelten Maßnahmen für den Multifuel Betrieb zu untersuchen und gegebenenfalls Optimierungen vorzunehmen

AP 13: Felderprobung der Traktoren (zunächst Felderprobung im reinen Pflanzenölbetrieb mit installierten Sensoren zur Bewertung von deren Langzeitverhalten und –Stabilität, sobald verfügbar, Felderprobung des Multifuel-Traktors.

AP 14: Kraftstoffnormierung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP 11: Sensorevaluierung

Für die Detektion von binären Mischungen mit bekannten Mischungspartnern erscheinen alle 4 untersuchten Sensoren geeignet, dies zeigen die entwickelten Regressionsmodelle. Insbesondere durch die Messung der relativen Permittivität könnten kostengünstige Sensoren realisiert werden. Zur Messung dieses Parameters sind derzeit jedoch nur Multiparametersensoren markverfügbar, wie der HLB1400 (Hersteller: Hydac) oder der FPS2800 (Hersteller: TE Connectivity), die etwa 400 bis 600 € bei Einzelbezug kosten. Trinäre Mischungen könnten durch Multiparametersensoren wie den FPS2800 oder den VLO-M1 (Hersteller: TrueDyne) detektiert werden, da hier über die gleichzeitige Messung von Dichte und Viskosität eine ausreichende Abschätzung der Mischungspartner möglich ist. Nachteilig ist dabei allerdings, dass aufgrund der hohen Viskosität von Rapsölkraftstoff für beide Sensoren erst ab etwa 30 °C Kraftstofftemperatur Werte innerhalb des Messbereichs der Sensoren erhalten werden. Darüber hinaus wird beim VLO-M1 über 60 °C bereits der zulässige Temperaturbereich des Mediums überschritten, der FPS2800 kann bis 150 °C eingesetzt werden. Eine entscheidende Rolle spielt daher der Einbauort des Sensors am Fahrzeug.

Von den untersuchten Sensoren erscheint der FPS2800 Sensor am besten für die Kraftstoffdetektion von unbekanntem Mischungen aus Rapsöl, Biodiesel und Diesel in 10 bis 20 % Abstufungen geeignet. Fraglich ist jedoch noch die Langzeitstabilität bzw. Lebensdauer des Sensors, wenn er im Fahrzeug verbaut ist. In Verbindung mit den modellbasierten Ansätzen zur Detektion der Kraftstoffe anhand von vorhandenen Sensoren (entwickelt im Teilvorhaben 1) oder der Stromaufnahme der Kraftstoffförderpumpen könnte auch ein Permittivitätssensor ausreichend sein.

Neben marktverfügbaren Sensoren wurde im Labormaßstab versucht über die Messung der Laufzeit von Ultraschallimpulsen mittels eines kostengünstigen Ultraschall Transducers auf die Kraftstoffe zu schließen. Dieser Ansatz erscheint ebenfalls erfolgversprechend, jedoch sind derartige Sensoren mit für den Einsatzzweck notwendiger Auswertefunktionalität derzeit nicht bekannt und müssten in Neuentwicklungen angestoßen werden.

AP 12: Emissions- und Leistungsmessungen

Die Untersuchungen am Traktorenprüfstand zeigen, dass die im Teilvorhaben 1 entwickelten kraftstoffspezifischen Motorsteuergerätesoftwarestände für eine Angleichung des Leistungsverhaltens für Diesel, Biodiesel, Rapsölkraftstoff und binäre Mischungen aus Diesel und Biodiesel bzw. Rapsölkraftstoff geeignet sind. Die Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand und die Realemissionen im Betrieb weisen darauf hin, dass die Vorgaben der EU Abgasstufe V mit allen Kraftstoffen und untersuchten Kraftstoffmischungen eingehalten werden können. In Verbindung mit der Kraftstoffdetektion ist somit die Ausgangsbasis geschaffen, die in die Serienentwicklung von Multifuel-Traktoren einfließen kann. Eine selbstständige, automatische Umschaltung der Motorsteuergerätesoftware in Abhängigkeit von der Kraftstoffdetektion konnte am Prototypfahrzeug noch nicht aufgebaut werden, hierzu sind weitere Entwicklungen notwendig.

AP 13: Felderprobung

Im Feldeinsatz wurden zwei Traktoren mit Sensoren zur Kraftstoffdetektion ausgestattet, die über den Beobachtungszeitraum stabile Werte lieferten und somit grundsätzlich für die Kraftstoffdetektion am Traktor geeignet erscheinen. Ein Traktor wurde primär mit Rapsölkraftstoff betrieben, an einem zweiten wurde die Untersuchungen mit den verschiedenen Kraftstoffen und Kraftstoffmischungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass beispielsweise der VLO-M1 Sensor geeignet ist, um im Feld die Mischungen hinreichend genau zu

detektieren. Die Traktoren waren während des Feldeinsatzes für die Betreiber vollumfänglich nutzbar und eine Motorsystembegutachtung eines Traktors weist auf eine ordnungsgemäße Funktion hin.

AP 14: Kraftstoffnormierung

Die Mitglieder des Normungsgremiums DIN NA 062-0296-32-02 UA wurden zur Abschlussveranstaltung eingeladen und der Abschlussbericht zum Vorhaben wird zur Verfügung gestellt. Es ist geplant, bei der nächsten Normungssitzung die Ergebnisse des Projektes vorzustellen und deren Auswirkungen auf Anforderungsparameter zu diskutieren.

Teilvorhaben 3 (TUK): Sensortests und Validierung der Motorkennfeldanpassung auf dem Motorenprüfstand, FKZ 22408517

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die Aufgabe des Lehrstuhls für Antriebe in der Fahrzeugtechnik der TU Kaiserslautern ist die Akquisition von Messdaten, vor allem zur Regeneration des Abgasnachbehandlungssystems und die Validierung adaptierter Motorkennfelder an verschiedene Kraftstoffe und deren Mischungen. Der Lehrstuhl wird ferner an der Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus und des Umschaltalgorithmus mit. Hierzu ist der Betrieb eines Motorprüfstands unerlässlich, um ein umfangreiches Messprogramm abzuwickeln und um die zur Erfüllung der Projektziele notwendigen Messdaten zu generieren. Außerdem sind umfangreiche Tests dieser Algorithmen und Kennfeldanpassungen am Prüfstandmotor notwendig, um sie während der Projektlaufzeit auf den gewünschten Entwicklungsstand zu bringen und um die zuverlässige Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems zu sichern. Der Betrieb des Prüfstands beginnt, sobald der Prüfmotor in die Prüfstruktur integriert wurde und dauert bis zum Ende des Projektes. Dabei dauert ein kompletter Prüfstandtag mit allen Arbeitsschritten (tägliche Vorabchecks, Motorstart, ggf. Warmlauf, Prüfstandsbetrieb und weitere Schritte) von Arbeitsbeginn bis –ende. Aufgrund der Überwachung der umfangreichen Messtechnik bei gleichzeitiger Bedienung des Prüfstands müssen am Prüfstand in den meisten Fällen mindestens 2 Personen gleichzeitig eingesetzt werden.

Zeitgleich zum Prüfstandsbetrieb sind von der TUK noch weitere Aufgaben zu erfüllen. Sobald verfügbar, müssen alle Messdaten ausgewertet und analysiert werden. Mit den dabei gewonnenen Daten unterstützt der Lehrstuhl die Projektpartner bei der Parameterauswahl und Modellbildung. Diese Aufgaben sind parallel zum Prüfstandsbetrieb zu bearbeiten.

Aus der Anforderung, die einzelne Teilaufgaben parallel bearbeiten zu müssen, ergibt sich die Notwendigkeit entsprechender Personalkapazität. Da viele Aufgaben (Prüfstandsaufbau, Integration neuer Hardware, Teile des Prüfstandsbetriebs, etc.) durch eine Technikervollzeitstelle und den Technikerunterstützende wissenschaftliche Hilfskräfte mit je 6 Wochenstunden Arbeitszeit geleistet werden können, wird für das Projekt nur ein wissenschaftlicher Mitarbeiter eingeplant.

Der wissenschaftliche Mitarbeiter übernimmt neben der lehrstuhlseitigen Leitung des Teilvorhabens alle Aufgaben, für die er unerlässlich ist, wie z. B. die Auswertung und Analyse der Messdaten, die Unterstützung bei der Parameterauswahl und der Modellbildung sowie einer Beteiligung beim Prüfstandsbetrieb in wichtigen Projektphasen. Auf Basis der durch die Prüfstandversuche gewonnenen Ergebnisse nimmt der wissenschaftliche Mitarbeiter der TUK im JD Arbeitspaket zur Entwicklung eines Umschaltalgorithmus eine beratende Funktion ein. Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist außerdem verantwortlich für das Berichtswesendes Teilvorhabens.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 15: Prüfstandsaufbau

AP 16: Aufbau (Hard- und Software) einer Deep-Learning Plattform am Motorenprüfstand

AP 17: Unterstützung bei der Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus

AP 18: Umschaltstrategie

AP 19: Motorkennfelder: Entwicklung und Kalibrierung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP 15: Prüfstandsaufbau

In die Prüfstandsperipherie wurde ein EU Abgasstufe V Dieselmotor von John Deere integriert. Dabei wurde dieser mit der entsprechenden Messtechnik, den Probennamesonden und notwendigen Konditioniereinheiten ausgestattet, um den Motor sicher betreiben zu können und um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Zur Inbetriebnahme wurde der Motor einer Grundvermessung mit Dieselmotorkraftstoff unterzogen. Dabei wurde das gesamte Motorkennfeld in einem Raster von 200 rpm und 50 Nm vermessen. Insgesamt ergaben sich so eine Messreihe von 112 Betriebspunkten.

AP 16: Aufbau (Hard- und Software) einer Deep-Learning Plattform am Motorenprüfstand

Die am Motorenprüfstand gesammelten Daten, zur Entwicklung eines Kraftstoffdetektionsalgorithmus wurden mit Hilfe von Deep-Learning Methoden ausgewertet, um eine Verfeinerung der Kraftstofferkennung zu erreichen. Die vorgesehene Hardwareseitige Deep-Learning Anwendung auf Basis einer Micro-Autobox 2 erwies sich in der Projektdurchführung als ungeeignet. Diese wurde stattdessen zur Datenerfassung via CAN-Bus für den Kraftstoffdetektionsalgorithmus genutzt. Die so gewonnenen Daten wurden mit Hilfe des Projektpartners John Deere einer softwareseitigen Deep-Learning-Analyse unterzogen.

AP 17: Unterstützung bei der Entwicklung des Kraftstoffdetektionsalgorithmus

Die Daten zur Bildung eines Kraftstoffdetektionsalgorithmus wurden am Motorenprüfstand der TUK gemessen und gesammelt. Darüber hinaus wurden dies an den Projektpartner John Deere übermittelt und die motorseitige Sensorik, welche sich für eine Kraftstoffdetektion eignet, zur Diskussion gestellt. Die Modelle zur Kraftstofferkennung wurden für einen stationären Betrieb am Prüfstand der TUK getestet.

AP 18: Umschaltstrategie

Der Projektpartner John Deere wurde umfangreich über möglich Probleme, Lösungen und Strategien zur Umschaltung von Datenständen für Kraftstoffmischungen beraten. Dabei wurden für die Umsetzung der Umschaltung sowohl hardwareseitige Lösungen, wie Zusatzmotorsteuergeräte, in Betracht gezogen, als auch die softwareseitige Lösung, über die Automatisierungsschnittstellen ASAM, des Motorsteuergeräts.

AP 19: Motorkennfelder: Entwicklung und Kalibrierung

Unabhängig von den Erfolgen der Feldtests, haben die Messungen am Motorenprüfstand gezeigt, dass eine Anpassung der Motorsteuerung auf die spezifische Kraftstoffmischung, weitere Verbesserungen hinsichtlich Effizienz und Emissionsminderung bewirken kann. Insbesondere eine Bedatung des Motorsteuergeräts, die Regelgrößen des Kraftstoffsystems betreffend, sollte auf die jeweilige Kraftstoffmischung angepasst werden. Durch die Änderung der Kraftstoffviskosität und Energiedichte müssen die Modelle zur Berechnung der Einspritzmengen und der damit in den Motor eingebrachten Energiemenge angepasst werden. Daraus berechnet sich in erster Linie die Last des Motors, was zu einer Korrektur der Regelung durch betriebspunktabhängige Kennfelder führt. Dadurch werden Größen wie AGR-Raten oder Harnstoffdosiermengen zur Emissionsminderung, Verbrennungsschwerpunktlagen zur Effizienzoptimierung oder Grenzen zum Bauteilschutz, wie z. B. Zylinderspitzendrücke, beeinflusst. Ebenfalls können Stellgrößen wie Einspritzdrücke, Einspritzzeitpunkte oder AGR-Raten auf den jeweiligen Kraftstoff optimiert werden, sodass dessen Potential zur Emissionsminderung ausgeschöpft werden kann. Diese Anpassungen wurden von der Technischen Universität Kaiserslautern in Messreihen an exemplarischen Betriebspunkten untersucht und belegt. Die Ergebnisse zeigen, dass die ohnehin schon reduzierten Emissionen durch Rapsölanteile im Kraftstoff, zu einer Vergrößerung der Stellmöglichkeiten für innermotorische Emissionsminderungsmaßnahmen und zur Effizienzsteigerung beitragen.

Neben der Anpassung der Motorregelung auf die jeweilige Kraftstoffmischung, stellt ein Multifuel-Motor für die Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff, Anforderungen an die Abgasnachbehandlung in Bezug auf die Dieselpartikelfilterregeneration. Da die konventionelle DPF Regeneration bei Verwendung von Pflanzenöl nicht möglich ist, wurden im MuSt5-Trak Projekt von der TUK, Betriebsstrategien untersucht, die eine solche Regeneration über die Verbrennung ermöglichen. Dabei konnte eine Lösung für eine stationäre High-Idle-Regeneration entwickelt werden. Diese wurde im Rapsölbetrieb auf ihre Wirksamkeit geprüft. Zusätzlich wurde die Motorölverdünnung mit Pflanzenöl geprüft und belegt, dass durch die Regeneration, unabhängig vom Pflanzenölanteil im Kraftstoff, keine Steigerung des Kraftstoffeintrags ins Motoröl erfolgt.

Die Untersuchung der Regeneration wurde auf die Teillast des Motors ausgeweitet, um Erkenntnisse für die Anwendung der Regeneration während eines transienten Fahrzeugbetriebs zu erhalten. Innerhalb des betrachteten Kennfeldbereichs konnten Möglichkeiten für eine ausreichende Abgastemperatursteigerung belegt werden. Zusätzlich zu der motorischen Applikation wurden simulative 1D-Modelle abgeglichen und benutzt um Verbesserungen für die Regenerationsstrategie, hinsichtlich des Nutzens von AGR, zu untersuchen. Dabei wurde belegt, dass die Deaktivierung der AGR für die Regeneration eine notwendige Maßnahme darstellt. Dies wurde in den motorischen Applikationsversuchen so ausgeführt.