

# Schlussbericht

## zum Verbundvorhaben

Thema:

**Verbundvorhaben: Strategien zur Ablagerungsvermeidung an Einspritzdüsen beim Multi-Fuel Einsatz biogener Kraftstoffe**

**Teilvorhaben 1: Entwicklung einer Prüfmethode**

**Teilvorhaben 2: Äußere Injektorablagerungen**

**Teilvorhaben 3: Überführung der Prüfmethode in Dienstleistung**

**Teilvorhaben 4: Additivierung der biogenen Kraftstoffe hinsichtlich der Ablagerungsbildung und Kraftstoffstabilität**

**Teilvorhaben 5: Untersuchungen am Traktor**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: OWI OEL-WAERME-INSTITUT gGmbH**

**Teilvorhaben 2: regineering GmbH**

**Teilvorhaben 3: TEC4FUELS GmbH**

**Teilvorhaben 4: ERC Additiv GmbH**

**Teilvorhaben 5: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)**

Förderkennzeichen:

**22402417, 22402517, 22402617, 22402717, 22402817**

Laufzeit:

**01.07.2017 bis 31.12.2019**

Gefördert durch:

Datum der Veröffentlichung:

**21.12.2020**



**Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft**

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Ansprechpartner:

**OWI OEL-WAERME-INSTITUT gGmbH**

Kaiserstr. 100  
52134 Herzogenrath  
Sebastian Feldhoff  
Tel: +49 2407 9518-117  
E-Mail: s.feldhoff@owi-aachen.de

**regineering GmbH**

Am Dörrenhof 13a  
85131 Pollenfeld  
Dr. Ulrich Männl  
Tel: +49 8421 93766-11  
E-Mail: u.maennl@regineering.com

**TEC4FUELS GmbH**

Kaiserstr. 100  
52134 Herzogenrath  
Dr. Hajo Hoffmann  
Tel: +49 2407 55830-17  
E-Mail: hajo.hoffmann@tec4fuels.com

**ERC Additiv GmbH**

Bäckerstr. 13  
21244 Buchholz in der Nordheide  
Dr. Svetlana Crusius  
Tel: +49 4181 216-533  
E-Mail: s.crusius@erc-additiv.de

**Technologie- und Förderzentrum im  
Kompetenzzentrum für Nachwach-  
sende Rohstoffe (TFZ)**

Schulgasse 18  
94315 Straubing  
Dr. Edgar Remmele  
Tel: +49 9421 300-130  
E-Mail: edgar.remmele@tfz.bayern.de

Autoren:

Sebastian Feldhoff (OWI), Michael Beringer (regineering GmbH), Hajo Hoffmann (TEC4FUELS GmbH), Klaus Lucka (TEC4FUELS GmbH), Svetlana Crusius (ERC Additiv GmbH), Martin Müller (ERC Additiv GmbH), Johannes Ettl (TFZ), Peter Emberger (TFZ), Klaus Thuneke (TFZ), Edgar Remmele (TFZ)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>	
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>	
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>	
<b>I</b>	<b>Ziele .....</b>	<b>1</b>
<b>I.1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2</b>	<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>2</b>
I.2.1	Übergeordnetes gemeinsames Ziel .....	2
I.2.2	Teilziel der OWI – Oel-Waerme-Institut GmbH .....	2
I.2.3	Teilziel der Firma ERC Additiv GmbH .....	3
I.2.4	Teilziel der Firma regineering GmbH .....	3
I.2.5	Teilziel der Firma TEC4FUELS GmbH.....	3
I.2.6	Teilziel des Technologie- und Förderzentrums (TFZ).....	4
<b>I.3</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>5</b>
I.3.1	Injektorablagerungen .....	5
I.3.1.1	Äußere Injektorablagerungen.....	6
I.3.1.2	Innere Injektorablagerungen .....	7
I.3.1.3	Testverfahren.....	9
I.3.2	Einsatz von Pflanzenölkraftstoff .....	10
I.3.2.1	Kraftstoffqualität .....	10
I.3.2.2	Motorbetrieb.....	12
I.3.2.3	Ablagerungsbildung .....	14
I.3.2.4	Additivierung .....	15
<b>I.4</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	<b>18</b>
<b>II</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>19</b>
II.1.1	Zusammenfassung .....	19
II.1.2	Daten aus dem Realeinsatz (AP 1).....	22
II.1.3	Äußere Ablagerungen: Beeinflussung der Ablagerungsbildung am Vollmotor (AP 2; regineering GmbH).....	23
II.1.3.1	Aufbereitung von Versuchsdaten aus dem ABM – Projekt.....	23
II.1.3.2	Grundlagenversuche am Vollmotor, Spezifizierung und Analytik .....	27
II.1.3.3	Konzepte gegen Ablagerungsbildung .....	48
II.1.4	Äußere und innere Ablagerungen: Wirkfähigkeit von Reinigungsadditiven für den Einsatz von Pflanzenöl (AP 3; ERC Additiv GmbH) .....	55
II.1.4.1	Experimentelle Bestimmung der physikochemischen Eigenschaften von alternativen Kraftstoffen (OMEx).....	55
II.1.4.2	Untersuchungen zum Kältefließverhalten von Pflanzenölen und FAME .....	58
II.1.4.3	Löslichkeit der Additive in FAME und in Rapsöl .....	59
II.1.4.4	Auswirkungen der Alterungsprozesse auf physikochemischen Eigenschaften der Pflanzenöle .....	60
II.1.4.5	Bereitstellung von Additiven für Untersuchungen der Projektpartner .....	62
II.1.4.6	Sicherheitsrelevante Informationen zu den Additiven .....	63
II.1.5	Innere Ablagerungen: Injektoralterung und Vermeidungsstrategien am Injektorablagerungsprüfstand (AP 4; OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH).....	65

II.1.5.1	Prüfstandskonzept und -aufbau.....	65
II.1.5.2	Entwicklung der Prüfmethodik.....	68
II.1.5.2.1	Einspritzbedingungen am nicht-motorischen Prüfstand.....	69
II.1.5.2.2	Ableitung des Prüfzyklus des nicht-motorischen Injektorprüfstands .....	70
II.1.5.3	Bewertungsmethodik für die Injektorfunktion.....	71
II.1.5.4	Materialien und Methoden.....	74
II.1.5.4.1	Kraftstoffe und Additive .....	74
II.1.5.4.2	Injektoren .....	74
II.1.5.4.3	Untersuchungsvarianten .....	75
II.1.5.5	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen am OWI.....	76
II.1.5.5.1	Prüfläufe zur forcierten Ablagerungsbildung.....	76
II.1.5.5.2	Reinigungs- und Vermeidungsstrategien.....	83
II.1.5.6	Fazit .....	88
II.1.6	Innere Ablagerungen: Bewertung der Prüfmethodik am Injektorablagerungsprüfstand (AP 4; TEC4FUELS GmbH) .....	90
II.1.6.1	Literaturrecherche und Beitrag von Expertise .....	90
II.1.6.1.1	Funktionsweise von Magnetventilinjektoren und Auswirkungen von IDID .....	90
II.1.6.1.2	Innere Ablagerungen (IDID): Allgemeine technische Aspekte .....	92
II.1.6.1.3	Auswirkung von IDID auf die Injektorfunktion abhängig vom Ort ihres Auf- tretens .....	94
II.1.6.1.4	Einfluss des verwendeten Injektortyps .....	96
II.1.6.1.5	Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Entstehung von IDID .....	98
II.1.6.1.6	Injektordiagnose durch Einspritzratenmessung .....	99
II.1.6.2	Erfahrungen aus der Prüfstandsentwicklung .....	100
II.1.6.3	Aufbau Heavy-Duty-CoCoS Prüfstand .....	102
II.1.6.4	Einschätzung des CoCoS-Prüfstandskonzeptes im Vergleich zum SAVEbio-Prüfstand .....	105
II.1.7	Praxiseinsatz pflanzenölauglicher Traktoren (AP 5; Technologie- und Förderzentrum TFZ).....	107
II.1.7.1	Feldtest und Prüfstand .....	107
II.1.7.1.1	Traktoren und Betriebsstoffe .....	107
II.1.7.1.2	Datenaufzeichnung im Feldtest.....	109
II.1.7.1.3	Traktorenprüfstand und Prüfzyklen .....	110
II.1.7.1.4	Untersuchungsvarianten .....	113
II.1.7.2	Betriebs- und Emissionsverhalten .....	116
II.1.7.2.1	Einsatzbedingungen im Praxisbetrieb .....	116
II.1.7.2.2	Kenngrößen der Ablagerungsbildung.....	124
II.1.7.2.3	Einsatztests entwickelter Maßnahmen .....	142
II.1.7.3	Fazit .....	145
<b>II.2</b>	<b>Verwertung .....</b>	<b>147</b>
II.2.1	OWI.....	147
II.2.2	T4F.....	147
II.2.3	regineering GmbH.....	148
II.2.4	ERC Additiv GmbH.....	149
II.2.5	TFZ .....	150
<b>II.3</b>	<b>Erkenntnisse von Dritten .....</b>	<b>151</b>
<b>II.4</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>151</b>
<b>III</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>153</b>
III.1	Teilvorhaben 1: OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH .....	153

III.1.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	153
III.1.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	153
III.1.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	154
<b>III.2</b>	<b>Teilvorhaben 2: regineering GmbH .....</b>	<b>157</b>
III.2.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	157
III.2.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	157
III.2.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	158
<b>III.3</b>	<b>Teilvorhaben 3: TEC4FUELS GmbH .....</b>	<b>160</b>
III.3.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	160
III.3.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	160
III.3.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	160
<b>III.4</b>	<b>Teilvorhaben 4: ERC Additiv GmbH .....</b>	<b>162</b>
III.4.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	162
III.4.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	162
III.4.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	162
<b>III.5</b>	<b>Teilvorhaben 5: Technologie- und Förderzentrum (TFZ).....</b>	<b>164</b>
III.5.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	164
III.5.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	165
III.5.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	166
<b>IV</b>	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>171</b>



---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Allgemeine Mechanismen des Belagsaufbaus in Verbrennungsmotoren [38].....	6
Abbildung 2:	Prozentuale Durchflussminderung in Abhängigkeit von der Laufzeit pro Startvorgang .....	23
Abbildung 3:	Aufnahme Düsenloch .....	24
Abbildung 4:	Aufnahme Ausschnitt aus Düsenloch.....	24
Abbildung 5:	Temperaturbereiche zur Bildung von Ablagerungen .....	25
Abbildung 6:	Motorunabhängiger Einspritzprüfstand.....	26
Abbildung 7:	Durchfluss in Abhängigkeit von Kraftstofftemperatur und Betriebspunkt .....	26
Abbildung 8:	Ablagerungsbehaftete Einspritzdüse .....	26
Abbildung 9:	SEM Aufnahmen Düsenloch: Vergrößerung links: 150 fach, Mitte: 1.200 fach, rechts: 3.000 fach .....	27
Abbildung 10:	Konstruktion der modifizierten Düse.....	28
Abbildung 11:	Simulation der modifizierten Düse .....	28
Abbildung 12:	Für Temperaturmessung an der Düsen Spitze modifizierte Einspritzdüse.....	29
Abbildung 13:	Düsen Spitze mit eingeklebtem Thermoelement.....	29
Abbildung 14:	EPS Auswertung nach Modifikation der Düse .....	30
Abbildung 15:	Verwendete Maschine für den Umbau zum Prüfstand .....	31
Abbildung 16:	Steuergerätestruktur des Prüfstands .....	32
Abbildung 17:	Verdrahtung Messmodul für die Drehzahlsteuerung .....	32
Abbildung 18:	Elektrischer Schaltplan für die Laststeuerung.....	33
Abbildung 19:	Testlauf zur Last- und Drehzahlsteuerung.....	33
Abbildung 20:	Hydraulikschema mit Einbindung des Zusatzwärmespeichers zur Laststeuerung .....	34
Abbildung 21:	Durchflussmessung einer gekühlten und einer ungekühlten Düse	35
Abbildung 22:	SEM Aufnahmen Düsenlöcher der ungekühlten Düse .....	36
Abbildung 23:	SEM Aufnahmen Düsenlöcher der gekühlten Düse .....	37
Abbildung 24:	Probenausschnitt für die STEM Analyse .....	38
Abbildung 25:	STEM Analyse der ungekühlten Düse.....	38
Abbildung 26:	STEM Analyse der Grenzschicht der ungekühlten Düse.....	39

## Abbildungsverzeichnis

### VIII

---

Abbildung 27:	STEM Analyse der gekühlten Düse .....	40
Abbildung 28:	Durchflussmessung der Injektoren im Dieselbetrieb .....	41
Abbildung 29:	Motorölanalysen: links: Shell Rimula R6 LM 10W40 (verringerte Additive), rechts: Eurolub Formel 2 10W40 (Standardmotoröl) .....	42
Abbildung 30:	Durchflussmessung bei Einsatz von Motorschmieröl mit geringeren Anteilen an Ca und Zn .....	42
Abbildung 31:	Durchflussmessung Rapsöl bei 50 % Last.....	43
Abbildung 32:	Durchflussmessung nach 50 h clean up Additiv bei Volllast .....	44
Abbildung 33:	Motorölanalyse nach 50 h clean up Additiv unter Volllast .....	45
Abbildung 34:	Durchflussmessung nach 50 h clean up Additiv bei 50 % Last .....	46
Abbildung 35:	Motorölanalyse nach 50h clean up Additiv unter 50 % Last.....	47
Abbildung 36:	Durchflussmessung nach 100 h keep clean Additiv bei 50 % Last	47
Abbildung 37:	CAD - Modell des entwickelten Kraftstoffkühlers .....	48
Abbildung 38:	Aufbau des Kraftstoffkühlers am Prüfstand.....	48
Abbildung 39:	Auswertung Temperaturmessung an der Düsen Spitze mit gekühltem und ungekühltem Rapsölkraftstoff .....	49
Abbildung 40:	Temperaturverlauf der gekühlten Kraftstoffleitung .....	50
Abbildung 41:	Ausschnitt Auswertung Schleppversuch .....	51
Abbildung 42:	Auswertung mit Temperaturmessung ohne direkten Kontakt des Thermoelements.....	52
Abbildung 43:	Gegenstrom Kraftstoffkühler zur Kühlung der Einspritzleitung .....	53
Abbildung 44:	Durchlaufkühler zur Kraftstoffkühlung.....	54
Abbildung 45:	CFPP-Werte verschiedener Öle in Abhängigkeit von der Konzentration der eingesetzten Additive (CFI) .....	59
Abbildung 46:	Entstehung des Polymerfilmes bei der Lagerung bei hohen Temperaturen (160 °C).....	62
Abbildung 47:	Verfärbung der additivierten Probe bei der Alterung (160 °C).....	62
Abbildung 48:	Skizze des nicht-motorischen Injektorablagerungsprüfstands .....	66
Abbildung 49:	CAD-Ansicht der Antriebseinheit, Kraftstoffpumpe, Kraftstoffverteiler und Injektoren (links); Hallsensor mit 60-2-Zahnrad (rechts) .....	68
Abbildung 50:	Konstruktion der Injektoraufnahme mit Druckstutzen und Heizpatrone .....	69
Abbildung 51:	Darstellung der Injektordüse vor und nach eines Prüflaufs (links): die heißeste Stelle mit sichtbaren Kraftstoffrückständen befindet sich etwa 10 mm oberhalb der Düsenkuppe; Temperaturmessung an der Düse während eines Prüflaufs (Ausschnitt) (rechts) .....	69

## Abbildungsverzeichnis

### IX

---

Abbildung 52:	intermittierender Betriebszyklus am nicht-motorischen Ablagerungsprüfstand .....	71
Abbildung 53:	Injektorprüfgerät DISU 6000 der Fa. Autotestgeräte Leitenberger GmbH.....	72
Abbildung 54:	Darstellungen der Ergebnisse der Einspritzmengenmessung (links) und der Reaktionszeit (rechts) am Beispiel des Injektors 12T52781 .....	73
Abbildung 55:	Heavy-Duty-injektoren; Denso (oben); Bosch (unten) .....	75
Abbildung 56:	Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Denso-Injektoren #12T53190 und #12T5278; Betrieb mit Dieselkraftstoff	77
Abbildung 57:	Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Denso-Injektoren #12T53234 und #12T53759; Betrieb mit Dieselkraftstoff .....	78
Abbildung 58:	Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Denso-Injektors #12T52781; Betrieb mit Rapsölkraftstoff .....	79
Abbildung 59:	Übersicht über die festgestellten Veränderungen der Einspritzcharakteristik der hinsichtlich der Bildung von Ablagerungen untersuchten Denso-Injektoren .....	80
Abbildung 60:	Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Bosch-Injektors #5502; Betrieb mit Dieselkraftstoff .....	81
Abbildung 61:	Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Bosch-Injektors #5502; Betrieb mit Rapsölkraftstoff .....	81
Abbildung 62:	Übersicht über die festgestellten Veränderungen der Einspritzcharakteristik der hinsichtlich der Bildung von Ablagerungen untersuchten Bosch-Injektoren.....	82
Abbildung 63:	Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Feldtest-Injektoren TFZ_1 bis TFZ_4 aus dem Traktor John Deere 6215R (JD-Wö); Regenerationsversuch am nicht-motorischen Prüfstand mit Detergent 2 in Dieselkraftstoff .....	84
Abbildung 64:	Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Feldtest-Injektoren TFZ_5 und TFZ_6 aus dem Traktor John Deere 6215R (JD-Wö); Regenerationsversuch am Prüfgerät mit Reinigungsfluid.....	85
Abbildung 65:	Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Injektoren #2957 und #5470 nach Durchführung der clean-up-Strategie im nicht-motorischen Prüfstand mit Detergent 1 in Rapsölkraftstoff .....	86
Abbildung 66:	Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Injektors #2938 nach Durchführung der keep-clean-Strategie im nicht-motorischen Prüfstand mit Detergent 1 und Antioxidantienpaket in Rapsölkraftstoff .....	88
Abbildung 67:	Schnittzeichnung und Funktion eines Magnetventilinjektors: 1 Hochdruckzulauf; 2 Kraft-stoffrücklauf (Steuer-/ Leckagemenge); 3	

	Injektorkörper; 4 Düsenspannmutter; 5 Düse; 6 Injektornadel; 7 Magnetspule; 8 Ventilanker; 9 Druckstange; 10 Rückstellfeder; 11 Steuerkammer; 12 Steuerventil; FC Schließkraft; FP durch Druck hervorgerufene Öffnungskraft [23][42]. ....	91
Abbildung 68:	Einspritzratenmessung eines Injektors im Neuzustand (grün) und mit IDID (blau). Links: mittlere Last (mittlerer Raildruck), Haupteinspritzung; rechts: Leerlauf (niedriger Raildruck), Piloteinspritzung [27] .....	93
Abbildung 69:	Einspritzratenmessung eines Volllastpunktes für einen mit IDID belasteten Injektor im Vergleich zum Neuzustand. Sowohl Öffnen als auch Schließen sind leicht verzögert [27].....	93
Abbildung 70:	Wesentliche Funktionsbereiche, in denen das Auftreten von IDID einen wesentlichen Einfluss auf die Injektorfunktion hat (Darstellung nach [27]; Quelle des linken Fotos:[29]; Schnittzeichnung rechts: [8]). .....	95
Abbildung 71:	Unterschiedliches Injektordesign: Bosch (rechts, Foto: ERC) u. Delphi (links, [29])......	97
Abbildung 72:	Klare Auswirkungen äußerer Injektorablagerungen (verringerte maximale Einspritzrate) ohne jegliche Anzeichen innerer Ablagerungen (die Timings werden exakt eingehalten). Im ENIAK Projekt wiesen sämtliche Injektoren (anderer Injektortyp) nach gleichen Versuchsbedingungen deutliche Anzeichen für IDID auf [27]. .....	98
Abbildung 73:	Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Bildung von IDID nach [27]. .....	99
Abbildung 74:	links: Anschlussadapter der Firma Leitenberger. Die Düse (unten) ist frei zugänglich und kann in einen Heizblock eingebracht werden, vergleichbar zu dem im Projekt „ENIAK“ eingesetzten Konzept (rechts). .....	101
Abbildung 75:	Blick auf den linken Komponententräger eines CoCoS-Prüfstands für Dieselkraftstoffe mit Heavy-Duty Injektor .....	103
Abbildung 76:	Injektor mit Kernkomponenten Hochdruckanschluss, Heizblock und Einspritzbehälter; links: Heavy-Duty, rechts: PKW.....	103
Abbildung 77:	Temperaturverlauf am CoCoS-Prüfstand während der Inbetriebnahmeversuche .....	105
Abbildung 78:	Rapsöltaugliche Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-Wö) im Praxiseinsatz sowie der Traktor John Deere 6930 Premium (JD-K) am Traktorenprüfstand .....	107
Abbildung 79:	Temperatursensoren im Zwei-Tank-Kraftstoffsystems des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S) .....	110
Abbildung 80:	Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands zur Leistungs- und Emissionsmessung.....	111

Abbildung 81:	Arbeiten und Kraftstoffverbrauch über die Einsatzmonate des Traktors FE-S.....	117
Abbildung 82:	Leistung an der Zapfwelle des Traktors FE-S über die Betriebsstunden .....	118
Abbildung 83:	Motordrehzahl und -last aus dem CAN-Bus des Traktors FE-S im Feldtest (Injektorsatz B) .....	119
Abbildung 84:	Verteilung der Temperaturen im Kraftstoffsystem des Traktors FE-S im Feldtest des Injektorsatz B im Rapsöl- und Dieselkraftstoffbetrieb.....	120
Abbildung 85:	Oxidationsstabilität (OxiStab) des Rapsöls aus dem Rapsölkraftstofftank und des Biodiesels aus dem Dieselkraftstofftank des Traktors FE-S.....	122
Abbildung 86:	Äquivalentes Motordrehmoment, Leistung an der Zapfwelle und spezifischer gravimetrischer Kraftstoffverbrauch des Fendt 724 S4 (FE-S) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei verschiedenen Motordrehzahlen unter Volllast bei unterschiedlichen Betriebsstunden der Injektoren (Einzelwiederholungen) .....	125
Abbildung 87:	Leistung ( $P_{Zw}$ ), Abgastemperatur nach der AGN ( $T_{Abgas}$ ), Motoröltemperatur ( $T_{Moel}$ ), Kohlenstoffmonoxid (CO) in Abhängigkeit der Einspritzmenge $m_{Mess}$ mit Rapsölkraftstoff bei $1.700 \text{ min}^{-1}$ unter Volllast .....	127
Abbildung 88:	Temperaturen im Kraftstoffsystem des Traktors FE-S bei Volllast ( $1.700 \text{ min}^{-1}$ , Injektorsatz B) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff .....	128
Abbildung 89:	Gemessene ( $m_{Mess}$ ) und aus ECU-Daten errechnete Einspritzmenge ( $m_{Calc}$ ) bei Motordrehzahlen von $1.000$ bis $2.100 \text{ min}^{-1}$ unter Volllast mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff am Traktor FE-S.....	129
Abbildung 90:	Mittelwerte und Spannweiten der $\text{NO}_x$ -, CO- und HC-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN) .....	130
Abbildung 91:	Mittelwerte und Spannweiten der Abgasrückführrate (AGR) des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff .....	131
Abbildung 92:	Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des John Deere 6215R (JD-Wö) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff ( $n=3$ ) .....	133
Abbildung 93:	Gemessene ( $m_{Mess}$ ) und aus ECU-Daten errechnete Einspritzmenge ( $m_{Calc}$ ) bei Motordrehzahlen von $1.000 \text{ min}^{-1}$ bis $2.100 \text{ min}^{-1}$ unter Volllast mit Rapsölkraftstoff am Traktor JD-Wö	134

---

Abbildung 94:	Mittelwerte und Spannweiten der NO <sub>x</sub> -, CO- und HC-Emissionen des Traktors JD-Wö in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsölkraftstoff im Rohabgas vor der AGN (je n=3) .....	135
Abbildung 95:	Mittelwerte und Spannweiten der Temperaturen im Kraftstoffsystem in den Prüfphasen des NRSC am Traktor JD-Wö mit Rapsölkraftstoff (n=3) .....	136
Abbildung 96:	Mittlere Ansteuerungsdauer der Kraftstoffinjektoren auf Basis der Spannungs- und Stromsignale aus der ECU und die Unterteilung der Ansteuerdauer in Boostphase, Anzugsphase und Haltephase.in den Prüfphasen des NRSC am Traktor JD-Wö (n=3) .....	137
Abbildung 97:	Injektoren im Neuzustand (links) und nach einer Alterung von 1.500 Bh beim Traktor FE-S und 500 Bh beim Traktor JD-Wö (je Injektorsatz A).....	138
Abbildung 98:	Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung sowie des Wirkungsgrads des John Deere 6930 Premium (JD-K) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff.....	139
Abbildung 99:	Zylinderdruckverlauf in den acht Prüfphasen des NRSC des John Deere 6930 (JD-K) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff .....	140
Abbildung 100:	Mittelwerte und Spannweiten der NO <sub>x</sub> -, CO- und HC-Emissionen des Traktors JD-K in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsölkraftstoff (je n=3).....	141
Abbildung 101:	Einspritzöffnung an einem neuen (links), einem ca. 1.500 h gealterten (Injektorsatz A, mittig) und einem ca. 600 h gealterten Injektor (Injektorsatz B, rechts) des Traktors FE-S .....	144
Abbildung 102:	Relative Veränderung der Leistung des Traktors FE-S im Vergleich zum Ausgangszustand mit Rapsöl (RK)- und Dieselmkraftstoff (DK) .....	168

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich der Anforderungen der WWFC mit den Normen.....	12
Tabelle 2:	Risiken und Praxiserfahrungen beim Pflanzenölbetrieb .....	14
Tabelle 3:	Matrix der zu untersuchenden Kraftstoffe .....	55
Tabelle 4:	Physikochemische Eigenschaften der OME <sub>3-5</sub> Fraktion und der Einzelsubstanzen OME <sub>1</sub> bis OME <sub>5</sub> .....	57
Tabelle 5:	Index zur Beschreibung des V-T-Verhaltens von Pflanzenölkraftstoff.....	58
Tabelle 6:	Löslichkeit der Additive (Detergents und Antioxidantien) in FAME und Pflanzenöl .....	60
Tabelle 7:	Eigenschaften des Rapsölkraftstoffes nach Alterung .....	61
Tabelle 8:	Übersicht der im SAVEbio-Projekt eingesetzten Additive .....	62
Tabelle 9:	Übersicht der H-Sätze der eingesetzten Additive .....	63
Tabelle 10:	Non-Road Steady Cycle (NRSC) .....	113
Tabelle 11:	Maßnahmen zur Reinigung von Injektoren.....	114
Tabelle 12:	Mittlere Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad unter Vollast (1.400 - 2100 min <sup>-1</sup> ) bei verschiedenen Temperaturen des Rapsölkraftstoffs (RK) im Vor- und Rücklauf des Kraftstoffsystems .....	123
Tabelle 13:	Mittelwert und Standardabweichung von Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff vor und nach einer Maßnahme zur Verringerung von Ablagerungen , prozentuale Abweichung (ABW) sowie Prüfung der Signifikanz (Sig.) .....	142
Tabelle 14:	Mittelwert und Standardabweichung von Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad verschiedener Injektorsätze mit Rapsölkraftstoff .....	145
Tabelle 15:	Verwertungsplan regineering GmbH .....	149
Tabelle 16:	Verwertung und Erfolgsaussichten nach Abschluss des Projektes .....	150



## Abkürzungsverzeichnis

ABM	Projekt der regineering GmbH mit der Vorhabensbezeichnung: Erfassung der grundlegenden Ablagerungsbildungsmechanismen im rapsölbetriebenen Forschungsmotor mit angeschlossener Übertragung der Ergebnisse auf einen Vollmotor.
AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
B100	Biodiesel (Fettsäuremethylester)
BayStMELF	Bayrisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
BayStMWi	Bayrisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
B5	Diesekraftstoff mit einem Biodiesekraftstoffanteil von 5 Vol.-%
B7	Diesekraftstoff mit einem Biodiesekraftstoffanteil von 7 Vol.-%
Bh	Betriebsstunden
Bus	System zur Übertragung von Daten
Ca	Calcium
CAN	Controller Area Network
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
CoCoS	Complete Commonrail System
Cu	Kupfer
CR	Common-Rail
DDSA+Na	Dodeceny succinanhydrid und Natriumnaphthenat
DEF	Diesel Exhaust Fluid (wässrige Harnstofflösung)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DK	Diesekraftstoff
DOC	Oxidationskatalysator (engl. Diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Dieselpartikelfilter
DW10	Ablagerungstest basierend auf dem Peugeot DW 10 Dieselmotor
ECU	Electronic Control Unit (Motorsteuergerät)
EDID	External Diesel Injector Deposits
EN	Europäische Norm
ENIAK	Projekt der OWI GmbH mit der Langbezeichnung: Entwicklung eines nichtmotorischen Injektor-Verkokungsprüfstandes für alternative Kraftstoffe; FKZ 22000611
ERC	Emissions-Reduzierungs-Concepte GmbH
ETIC	European Technology Innovation Center der John Deere GmbH & Co.KG
EU	Europäische Union

---

FAME	Biodiesel (engl. Fatty Acid Methyl Esters)
FID	Flammenionisations-Detektor
FKZ	Förderkennzeichen
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (e.V.)
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop
HC	Kohlenwasserstoffe
HDP	(Kraftstoff-) Hochdruckpumpe
HVO	Hydriertes Pflanzenöl (engl. Hydrotreated Vegetable Oil)
IDID	Internal Diesel Injector Deposits
ISO	International Organization for Standardization
K	Kalium
KFZ	Kraftfahrzeug
LL	Leerlaufpunkt
Mg	Magnesium
MW	Mähwerk
Na	Natrium
N <sub>2</sub> O	Lachgas
NDIR	Nicht-Dispersives-Infrarot-Spektroskop
NDUV	Nicht-Dispersives-Ultraviolett-Spektroskop
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide (NO + NO <sub>2</sub> )
NRMM	Non-Road Mobile Machinery (mobile Arbeitsmaschinen)
NRSC	Non-Road Steady Cycle
NRTC	Non-Road Transient Cycle
O <sub>2</sub>	elementarer Sauerstoff
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OWI	Oel-Waerme-Institut GmbH
P	Phosphor
PD	Prüfdauer (bei der Auswertung von PEMS-Messungen)
PEMS	Portables Emissionsmesssystem
PIBSI	Polyisobutylensuccinimid
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
RK	Rapsölkraftstoff
RSP	Einspritzzeitpunkt (engl. Injection response time)
S	Schwefel
SAE	Society of Automotive Engineers
SCR	Selective Catalyst Reduction (selektive katalytische Reduktion)
SPEC	Vornorm des Deutschen Instituts für Normung e.V.

TFZ	Technologie- und Förderzentrum
UFOP	Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.
ULSD	Diesel mit reduziertem Schwefelanteil (engl. Ultra Low Sulfur Diesel)
VL	Volllastpunkt
XUD9	Ablagerungstest basierend auf dem Peugeot XUD 9 Dieselmotor
Zn	Zink



# I Ziele

## I.1 Einleitung und Problemstellung

In der Landwirtschaft dominieren Traktoren mit Common-Rail-Dieselmotoren. Hier werden im Allgemeinen robuste Motoren eingesetzt, um insbesondere den gegenüber einem PKW deutlich längeren Nutzungszeiten (ca. 10.000 Betriebsstunden gegenüber ca. 3.000 Betriebsstunden beim PKW) Rechnung zu tragen. Auch für Landmaschinen werden die Anforderungen an die Schadstoffemissionen kontinuierlich verschärft, so dass im Bereich der Motorenentwicklung Mehrfacheinspritzungen und weiter ansteigende Einspritzdrücke eine immer wichtigere Rolle spielen.

Daher werden bei jedem Verbrennungsvorgang vermehrt Vor-, Haupt- und Nacheinspritzvorgänge von einer Dauer unterhalb einer Millisekunde ausgeführt. Diese Mehrfacheinspritzungen werden mit weiter ansteigenden Einspritzdrücken (bis zu 3.000 bar) und entsprechend kleineren Düsenöffnungsquerschnitten kombiniert. Die Umsetzung erfolgt durch hochagile Einspritzventile mit geringen Spaltmaßen im Injektorinneren. Im Jahr 2005 wurde erstmals von Injektorfehlfunktionen durch Ablagerungen im Injektorinneren, den sogenannten „IDID“ (Internal diesel Injector Deposits) berichtet [2]. Seit 2008 werden vermehrt Untersuchungen zu diesem Thema publiziert [4][62][64][56][58]. IDID stehen seitdem auch im Fokus der Forschung.

In Landmaschinenmotoren ist ohne weitere Anpassungen, analog zur Situation im Automobilbereich, mit einer erhöhten Ablagerungsbildung im und am Injektor zu rechnen. Dies muss überprüft, Gegenmaßnahmen entwickelt und mit geeigneten Untersuchungsmethoden verifiziert werden. Anders als im Kraftfahrzeugsektor existiert für den Landmaschinenbereich kein Standardtestverfahren hinsichtlich der Ablagerungsneigung von Kraftstoffen.

Für den Kraftfahrzeugbereich wurde, da die motorischen Tests XUD9 und DW10 zur Untersuchung von Injektorablagerungen nur teilweise zielführend sind (veraltet bzw. sehr aufwändig), am OWI im Rahmen des ENIAK-Projektes [26] ein nichtmotorischer Injektorablagerungsprüfstand zur Untersuchung innerer Injektorablagerungen aufgebaut. Auf dem Prüfstand können an vier Prüfsträngen parallel Kraftstoffuntersuchungen an vollständigen Common-Rail-Systemen mit elektrisch beheizten Injektoren durchgeführt werden. Es wurde gezeigt, dass der Prüfstand IDID abbilden kann. Dies war zu erwarten, da IDID ohne direkten Einfluss der motorischen Verbrennung entstehen. Auf dem Prüfstand können verschiedene Einflüsse auf die Ablagerungsbildung, wie Kraftstoffart und -qualität, Druck, Durchsatz und Temperatur untersucht werden. Die Prüfmethode ist aktuell für KFZ-Komponenten und primär auf Kraftstoff- und Additivscreenings bei gleichbleibender Hardware und konstanten Versuchsbedingungen ausgelegt.

Neben den IDID treten nach wie vor auch äußere Ablagerungen (Düsenloch, Düsenkuppe) auf. Diese Ablagerungen beeinflussen das Kraftstoffspray. Die Folgen sind verschlechterte Abgaswerte und Leistungseinbußen bis hin zum Düsenversagen. Ausgehend von

Versuchsergebnissen aus dem ABM-Projekt [65] sind für die Erarbeitung praxistauglicher Maßnahmen weiterführende Prüfstandsversuche unabdingbar. So ist beispielsweise nachgewiesen, dass durch Einflussnahme auf die Kraftstofftemperatur die Ablagerungsbildung gemindert werden kann [65]. Eine spezifizierte und quantifizierte Minderung in einem breiten Einsatzbereich ist jedoch noch nicht möglich. Hier müssen zuerst Grenzwerte am Prüfstand, wie z. B. Temperaturschwellen, ab denen sich die Effekte auswirken, ermittelt werden. Weiterhin wurden sämtliche Versuche bisher am Einzylinder-Prüfstand durchgeführt. Zur Übertragung auf Praxisanwendungen müssen sich die Maßnahmen auch im einsatznahen Vollmotor bewähren.

Die Energiewende erfordert eine drastische Reduzierung von THG-Emissionen sowie die Hinwendung zu erneuerbaren Energiequellen. Bei mobilen Landmaschinen dominiert in Deutschland nach wie vor der Einsatz des fossilen Dieselkraftstoffs. Für landwirtschaftliche mobile Antriebe bieten hochenergiedichte flüssige Biokraftstoffe die Chance zur nachhaltigen Flächenbewirtschaftung insbesondere in Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf. In Landmaschinen konnte der Einsatz von Pflanzenölkraftstoff nach DIN 51605 bereits mehrfach erfolgreich demonstriert werden [18][14][46]. Über die Ablagerungsbildung am Kraftstoffinjektor in modernen biokraftstofftauglichen Traktoren liegen jedoch kaum Erkenntnisse vor.

## **I.2 Aufgabenstellung**

### **I.2.1 Übergeordnetes gemeinsames Ziel**

Übergeordnetes gemeinsames Ziel der Projektpartner innerhalb des Vorhabens ist es, Pflanzenöl als Teil der Multi-Fuel Einsatzstrategie zum Einsatz zu ertüchtigen. Die hierzu zu erreichenden Teilziele sind, einsatzbereite Strategien zur Minderung und, wenn möglich, Vermeidung von Ablagerungen in und am Dieselinjektor beim Einsatz von Pflanzenölkraftstoff in der Landwirtschaft zu entwickeln, um Stillstandzeiten der landwirtschaftlichen Nutzfahrzeuge sowohl infolge IDID als auch infolge äußerer Ablagerungen („External Diesel Injector Deposits“, EDID) an den Injektoren zu vermeiden.

### **I.2.2 Teilziel der OWI – Oel-Waerme-Institut GmbH**

Der Fokus liegt auf inneren Injektorablagerungen und der Anwendung von Diesel- und Rapsölkraftstoff. Für die Untersuchungen am OWI soll das Prinzip des ENIAK-Prüfstandes angewendet werden. Aufgrund des Umfangs der notwendigen Änderungen von PKW auf Landmaschine (Steuergeräte, Hochdruckpumpen, Rails, Injektoren) muss ein neuer Prüfstand aufgebaut werden. Hierbei können die Erfahrungen des ENIAK-Projektes genutzt werden. Der Prüfstand wird innerhalb des Projektes für zwei gängige Common-Rail-Injektoren aus Landmaschinen ausgerüstet.

Das wesentliche Ziel hinsichtlich des Prüfstands ist die Entwicklung einer Prüfumgebung für Injektoren für den Einsatzbereich der Landmaschinen. Hier wird anhand von

veröffentlichten Realdaten ein Testzyklus entwickelt, der eine zeitgeraffte Prüfung unter realistischen bzw. verschärften Prüfbedingungen ermöglicht. Dieser Zyklus wird mit den im Rahmen des Vorhabens ermittelten Realdaten abgeglichen.

Wissenschaftliches Ziel ist die belastbare Untersuchung der inneren Ablagerungsbildung bei Einsatz von Rapsöl in Heavy-Duty-Motoren sowie der Untersuchung von möglichen Reinigungs- und Vermeidungsstrategien. Hier ist zu klären, ob Erkenntnisse und Ergebnisse aus Untersuchungen im Automobilbereich auf diese Anwendung übertragbar sind oder ob beim Einsatz von Pflanzenöl in Heavy-Duty-Anwendungen andere Mechanismen berücksichtigt werden müssen.

### **I.2.3 Teilziel der Firma ERC Additiv GmbH**

Die Firma ERC Additiv GmbH wird zu dem Projekt Know-how und Erkenntnisse aus dem Additiveinsatz in der Automobilindustrie sowie verschiedene Additivformulierungen beitragen. Das Ziel ist es, die Wirkfähigkeit von Reinigungsadditiven für den Einsatz von Pflanzenöl entweder zu verifizieren oder herzustellen. Hierzu sind als Zwischenziele die Erfassung pflanzenölspezifischer Effekte, die Überprüfung und Bewertung der Eignung des nichtmotorischen Ablagerungsprüfstands sowie, falls notwendig, die Erarbeitung einer dem Verwendungszweck angepassten Additivierungsstrategie. Zur Überprüfung bzw. Entwicklung der Additivierungsstrategie werden auch die Analyseergebnisse aufgetretener Ablagerungen genutzt. Ferner werden die Eigenschaften der verwendeten Kraftstoffe bewertet und gegebenenfalls mit Hilfe gezielter Additivierung eingestellt.

### **I.2.4 Teilziel der Firma regineering GmbH**

Der Fokus seitens regineering liegt auf den äußeren Ablagerungen. Die bisher im Vorgängerprojekt „ABM“ erworbenen Erkenntnisse zu Ablagerungsbildungsmechanismen bei Common Rail (CR) Dieselmotoren sollen weitergeführt und in die Praxis überführt werden.

Aus wissenschaftlicher Sicht soll in diesem Projekt das Verständnis für Vorgänge der Ablagerungsbildung und -beeinflussung speziell im Düsenloch bei der Verwendung von reinen Pflanzenölkraftstoffen vertieft werden. Hierzu werden, aufbauend auf Ergebnissen des „ABM“ Projektes, jetzt Versuche am Vollmotor zur Beeinflussung der Ablagerungsbildung durchgeführt. Neben analytischen Verfahren erfolgt die Validierung durch CRI-Durchflussmessungen, was für äußere Ablagerungen ein hervorragend geeignetes Mittel ist.

### **I.2.5 Teilziel der Firma TEC4FUELS GmbH**

Ziel der Firma TEC4FUELS Ziel ist es, die Prüfmethodik dahingehend zu bewerten, ob nach Projektende als Dienstleistung für das Testing eine Prüfung mit einem nichtmotorischen Ablagerungsprüfstand angeboten werden kann. TEC4FUELS wird hierzu mindestens zwei Prüfläufe hauptverantwortlich betreuen. TEC4FUELS wird dabei die

Untersuchungen des OWI begleiten. Dies betrifft sowohl die Prüfstandsplanung, den Aufbau und den Versuchsbetrieb als auch die Veröffentlichung der Erkenntnisse.

TEC4FUELS wird jedoch ein besonderes Augenmerk auf die Eignung des Prüfstands für den Einsatz als Dienstleistung legen. Hierbei werden andere Schwerpunkte gesetzt als in den wissenschaftlichen Untersuchungen des OWI. Hierzu gehören insbesondere die Zeitraffung des Prüfzyklus und die Anpassung des Prüfstandsdesigns auf den Einsatz im Dienstleistungsbereich (z.B. schnelle, einfache Umrüstung, Reduktion auf die für die Dienstleistung wesentlichen Ausstattungsmerkmale).

### **I.2.6 Teilziel des Technologie- und Förderzentrums (TFZ)**

Ziel der Arbeiten des TFZ im Rahmen des Vorhabens ist es, die Ablagerungsbildung und -vermeidung von in Traktormotoren eingebauten Injektoren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff am Traktorenprüfstand und im Praxiseinsatz zu untersuchen. Dabei sollen die Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Injektoren erfasst und Einflüsse auf die Bildung von Ablagerungen ermittelt werden. Auf Basis des mit einem Zylinderdruckindiziersystem aufgenommenen Zünd- und Verbrennungsverlaufs sowie weiterer Betriebsparameter sollen durch innere Injektor-Ablagerungen verursachte Auswirkungen auf den Einspritzvorgang ermittelt werden. Anhand der Ergebnisse aus den Untersuchungen sollen Konzepte entwickelt und validiert werden, welche Informationen über die Ablagerungsbildung an Injektoren liefern und eine Nachjustierung bzw. Gegenmaßnahmen erlauben.

### I.3 Stand der Technik

#### I.3.1 Injektorablagerungen

Im Automobilbereich sind Injektorablagerungen allgemein seit langem ein viel beachtetes Thema. Die in diesem Bereich veröffentlichten Erkenntnisse und Zusammenhänge sind in weiten Teilen übertragbar auf den Landmaschinenbereich. Hier werden im Allgemeinen robustere Maschinen eingesetzt, um insbesondere den gegenüber PKW deutlich längeren Nutzungszeiten (ca. 10.000 Betriebsstunden gegenüber ca. 3.000 Betriebsstunden beim PKW) Rechnung zu tragen. Auch für Landmaschinen werden die Anforderungen an die Schadstoffemissionen kontinuierlich verschärft, so dass im Bereich der Motorenentwicklung Mehrfacheinspritzungen und weiter ansteigende Einspritzdrücke eine immer wichtigere Rolle spielen.

In den letzten Jahren haben sich durch neue technische Entwicklungen bei der Herstellung von Brenn- und Kraftstoffen maßgebliche Änderungen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Qualität ergeben. Dies hat allgemein Auswirkungen auf den gesamten Verkehrssektor. Nach mehr als einem Jahrzehnt der breiten Einführung von Biokraftstoffen in den Bereich der Mitteldestillate drängen neue Biokraftstoffe und Additive in den Markt.

Neben hydrierten Pflanzenölen (HVO, engl. „Hydrogenated Vegetable Oils“) und alternativen Rohstoffen für die Herstellung von Fettsäuremethylester (FAME) werden bereits auch Kraftstoffe wie „Algenkraftstoff“ und Biomass-to-Liquid (BtL) thematisiert, obgleich eine industrielle Herstellung derzeit noch nicht absehbar ist. Auch auf der Seite der fossilen Kraftstoffe gibt es neue Entwicklungen. Rohöl aus konventionellen Lagerstätten wie Ölfeldern, Ölschiefern und Teersanden wird ergänzt durch flüssige Kohlenwasserstoffe aus alternativen fossilen Quellen wie Erdgas (Gas-to-Liquid, GtL) und Kohle (Coal-to-Liquid, CtL). Entwicklungen in anderen Mitteldestillatmärkten wie Schifffahrtskraftstoffe können ebenfalls zu Änderungen in der Kraftstoffzusammensetzung führen, da hier aufgrund politischer Maßnahmen vermehrt Mitteldestillatprodukte nachgefragt werden.

Des Weiteren werden neue Kraftstoffmischungen wie beispielsweise Diesel R33 (7 % FAME, 26 % HVO) untersucht. Außerdem werden neue Kraftstoffnormen erarbeitet. Zwei Beispiele sind hier paraffinischer Dieselkraftstoff (DIN SPEC 53940 / CEN TS 15940) und B30 Kraftstoffe für den Flottenbetrieb (Entwurf DIN EN 16709). Speziell in der Landwirtschaft gibt es zudem weitere Bestrebungen, den Einsatz von Pflanzenölkraftstoffen (nach DIN 51605 bzw. von Rapsölkraftstoff nach DIN 51623) zu fördern.

Teilweise müssen die neuen Mitteldestillate durch geeignete Additivierung an die Anforderungen der Normen, insbesondere DIN EN 590, angepasst werden. Eine weitere Additivierung ist zur Langzeitstabilisierung der Kraftstoffe erforderlich. Durch die bauartabhängigen Rücklaufmengen im Fahrzeug aus der Hochdruckpumpe und dem Injektor wird, gerade bei Motoren mit modernen Einspritzsystemen, eine vergleichsweise hohe Temperatur im Tank erreicht und der Kraftstoff kurzzeitig lokal stark thermisch (teilweise über 100 °C) und mechanisch beansprucht. Weiterhin stellt der erwärmte Kraftstoff im Förder-system nach der Motorabschaltung ein Problem dar. Der Kraftstoff verbleibt lange Zeit auf

hohen Temperaturniveaus und altert. Gealterte Kraftstoffe neigen jedoch zu einer erhöhten Ablagerungsbildung in den Injektoren [4][62][64].

### 1.3.1.1 Äußere Injektorablagerungen

Äußere Ablagerungen in Einspritzlöchern von Injektoren von DI-Dieselmotoren führen neben Leistungseinbußen häufig zu einer Beeinträchtigung einer homogenen Strahlausbreitung und verschlechtern dadurch die Verbrennung, was eine Erhöhung der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs zur Folge hat.

In der von Lepperhoff und Houben [38] entwickelten Theorie zu innermotorischen Belägen werden Mechanismen zur Belagbildung aufgeführt (siehe Abbildung 1).

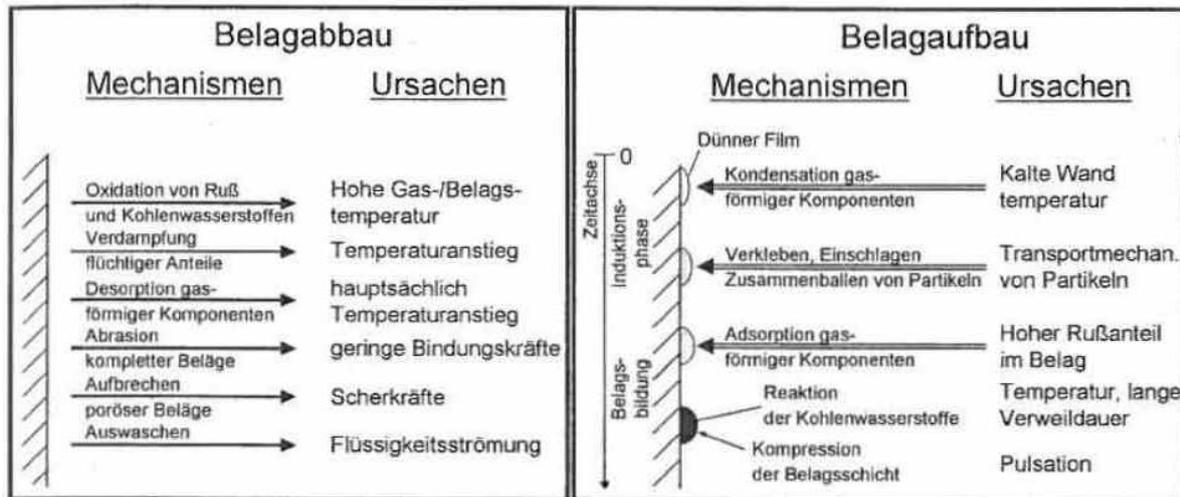


Abbildung 1: Allgemeine Mechanismen des Belagaufbaus in Verbrennungsmotoren [38]

Ihr Modell beschreibt ein System, in dem eine Wand in einer Fluidströmung liegt. Partikel werden in Richtung der Wand transportiert, wenn die Wand kälter als das umgebende Fluid ist. Dieser Mechanismus nennt sich Thermophorese. Er beschreibt die Eigenschaft von Partikeln in Fluiden, sich in Richtung einer Temperatursenke zu bewegen. Als gegensätzlicher Mechanismus wird die Turbulenz in der Strömung angegeben. Der Belagaufbau beruht auf einer Agglomeration von Partikeln an der Wand. Als Initialisierung des Belagaufbaus sehen Lepperhoff und Houben [38] die Kondensation und Adhäsion des Aerosols an der im Vergleich zum Fluid kälteren Wand. Das Wachstum wird durch Verkleben, Einschlagen und Zusammenballen von Partikeln beeinflusst. Während dieses Prozesses vollziehen sich verschiedene chemische Reaktionen wie Pyrolyse, Dehydrierung und eine Polymerisation, die zu einer Verfestigung und einer Vergrößerung der Dichte führen. Mechanismen für den Abbau der Beläge beruhen auf ähnlichen, aber gegenläufigen physikalischen und chemischen Prinzipien. Chemisch resultiert die Oxidation in der Zerstörung organischer Verbindungen im Belag. Durch starke fluid- oder aerodynamische Kräfte

entsteht ein weiterer Abbau. Des Weiteren induzieren thermische Spannungen durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Belag und Wand einen Aufbruch der Ablagerungen.

Der Einsatz von Zündbeschleunigern wirkt sich begünstigend auf die Belagbildung aus, ebenso die Additivierung mittels säurebasierter Schmierverbesserer [60]. Zink wird häufig in Belägen von Einspritzdüsenlöchern nachgewiesen [60]. In extremen Fällen kann es sein, dass eine Entnahme und externe Säuberung der Düsen notwendig ist, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten [60]. Quellen des Zinks sind zum Teil legierte Bauteile im Niederdruckkraftstoffkreislauf, wie z. B. Anschlussstellen und Filtergehäuse [60], die meistens aus einer Kupfer-Zink-Legierung bestehen.

### **I.3.1.2 Innere Injektorablagerungen**

Moderne Common-Rail-Dieselmotoren müssen die kontinuierlich verschärften Abgasnormen (z.B. Euro V und Euro VI im Kraftfahrzeugsektor) erfüllen. Hierzu werden bei jedem Einspritzvorgang mehrere Vor-, Haupt- und Nacheinspritzevents von einer Dauer unterhalb einer Millisekunde ausgeführt. Diese multiplen Einspritzungen werden mit kontinuierlich steigenden Einspritzdrücken (aktuell bis zu 2.500 bar, in Prototypen bis 3.000 bar) und entsprechend kleineren Öffnungsquerschnitten kombiniert. Die Umsetzung erfolgt durch hochentwickelte und hochagile Einspritzventile mit geringen Spaltmaßen im Injektorinneren. Es ist naheliegend und wird auch in der Literatur vermutet, dass moderne Injektoren aufgrund der geringen Toleranzen empfindlicher auf die Bildung von Ablagerungen im Injektorinneren (IDID, Internal Diesel Injector Deposits) reagieren [5][49][56]. IDID führen zu einer trägeren Reaktion oder zum kompletten Versagen des Magnetventils und/oder der Düsennadel, was zu einem verzögerten Öffnen und/oder Schließen oder Ausfall einem des Injektors führt.

Die Folge ist eine Verschiebung des Einspritzzeitpunkts, gegebenenfalls einhergehend mit einer Falschbemessung der eingespritzten Kraftstoffmenge, insbesondere bei niedriger Last und im Leerlauf. Die für den Fahrer wahrnehmbaren Folgen sind ein sehr unruhiger Leerlauf und schlimmstenfalls Motorstartprobleme oder ein vollständiger Injektorausfall.

In der Literatur werden mehrere Arten von inneren Injektorablagerungen unterschieden. Diese können einzeln oder auch zusammen auftreten. Crusius [7] unterteilt IDID in fünf verschiedene Typen:

- Organische Oligomere und Polymere aus Kraftstoffen
- Amid-basierte Polymere
- Seifenartige Ablagerungen
- Buntmetalle
- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Als Quellen für die genannten Ablagerungstypen kommen fossile Dieselmotorkraftstoffe, Biodiesel, Spurenelemente sowie Additive und insbesondere Reaktionen der Komponenten untereinander in Frage. Die drei erstgenannten Ablagerungstypen gelten als die am häufigsten im Feld in Kraftfahrzeugen vorkommenden. Auf sie wird im Folgenden näher eingegangen.

### **Seifenartige Ablagerungen**

Seifenartige Ablagerungen sind die am häufigsten vorkommenden IDID [41][36]. Sie treten sowohl auf dem US-Markt als auch auf dem Europäischen Markt auf [36]. Sobald im Kraftstoff Natrium-Ionen und gleichzeitig Fettsäuren vorhanden sind, reagieren sie zu Metallcarboxylaten, die wiederum zu seifenartigen Ablagerungen führen können [3]. Die seifenartigen Ablagerungen sind als weiße Schicht sichtbar [3][36]. Als Natriumquellen kommen Salz, Korrosionsschutzadditive und Verunreinigungen aus der FAME-Herstellung in Betracht [37][62][64]. Quellen für die Fettsäuren sind Spuren aus der FAME Produktion sowie die Alkene Hexadecenyl- oder Dodecenylbernsteinsäure (DDSA) die als Pipeline Korrosionsschutz verwendet werden [1][3][37][41].

Natriumablagerungen sind in den USA nach der Einführung von Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD) und in Europa nach der Einführung von B5 aufgetreten [63]. Nachgewiesen wurden sie auf dem Magnetanker, dem Steuerkolben sowie der Düsenadel [63].

Die Temperatur im Injektor scheint das Absetzen der Seifen direkt proportional zu beeinflussen [6].

Bei Versuchen wurde festgestellt, dass Carboxylat-Ablagerungen nur in gleitenden Komponenten auftreten, jedoch nicht in der Hochdruckpumpe [59]. Eine Erklärung dafür ist, dass die Temperatur im Injektor höher ist als in der Hochdruckpumpe [59].

### **Amid-basierte Polymere**

Polymere Amide oder amid-basierte Ablagerungen werden aufgrund der hohen Intensität der Amid-Bande im IR-Spektrum klassifiziert. Das Auftreten dieser IDID-Art wird primär bei PKWs in der EU beobachtet.

Die mögliche Ursache für die Bildung von Amid-basierten polymeren Ablagerungen wird kontrovers diskutiert. Eine umstrittene Theorie vermutet eine Reaktion zwischen Reinigungsadditiven und säurehaltigen Komponenten des Dieselmotorkraftstoffs. Ullmann [63] hat die Hypothese aufgestellt, dass das Reinigungsadditiv „Polyisobutylsuccinimid“ (PIBSI) eine Rolle bei der Entstehung dieses Ablagerungstyps spielt. Demzufolge reagieren niedermolekulare PIBSI-Klassen mit Mono- und Di-Carbonsäuren in Anwesenheit von niedermolekularen Säuren, wie z.B. Ameisensäure zu einem polymeren Amid-haltigen Produkt [6]. Dass niedermolekulares PIBSI zu Ablagerungsbildung neigt, wurde von weiteren Quellen in Experimenten bestätigt [4][37][64].

Allerdings konnte nach Barker [4] bei einem kommerziell verwendeten PIBSI nach aktuellem Industriestandard (diese sind stets hochmolekular) in Motorversuchen keine IDID festgestellt werden. Amidbasierte Ablagerungen zeigen eine bräunliche Färbung [3].

### **Organische Polymere und Polymere aus Kraftstoffen**

Kraftstoffe mit niedriger Oxidationsstabilität können durch Oxidationsprozesse hochmolekulare Verbindungen bilden. Dabei entstehen Ablagerungen, insbesondere im Betrieb mit Mischungen aus fossilem Diesel mit Biodiesel [6]. Aufgrund der in erheblichem Umfang vorliegenden mehrfach ungesättigten Fettsäuren in Biodiesel ist dessen Oxidationsstabilität geringer als von schwefelarmem Dieselmotorkraftstoff [12]. Reaktionsfreudige Komponenten des Dieselmotorkraftstoffes oxidieren bei Lagerung durch Sauerstoffkontakt. Es entstehen Oxidationsprodukte, die kraftstofflöslich und polar sind [6]. Diese Produkte reagieren sowohl miteinander als auch mit anderen säurehaltigen Oxidationsprodukten [6]. Bei diesem Prozess entstehen Sedimente, die aufgrund steigender Polarität kraftstoffunlöslich werden [6]. Diese unlöslichen Teilchen verbinden sich zu größeren Teilchen. Es wird vermutet, dass die Ablagerungsneigung von der Anwesenheit von Substanzen wie di- und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen abhängt, die beim katalytischen Cracken schwerer Erdölfraktionen entstehen [6].

Der Mechanismus der Belagentstehung wird der Autoxidation von Kohlenwasserstoffen zugeschrieben [6]. Die Autoxidation ist eine chemische Oxidation, bei der unter Einwirkung von Sauerstoff, Licht, Wärme und/oder katalytischen Metallen wie z.B. Kupfer eine Radikalkettenreaktion entsteht [6][12]. Ablagerungen befinden sich nicht notwendigerweise an derselben Position, an welcher sie gebildet wurden. Beläge entstehen, wenn das Molekulargewicht der Oligomere, deren Konzentration und die Polarität der oxidierten Produkte ansteigen und/oder der Kraftstoff abkühlt. Unlösliche Ablagerungen wurden im Kraftstoff nachgewiesen, der bei 185 °C belastet wurde. Der Sauerstoff wurde hierbei vollständig umgesetzt [12]. Ein Teil dieser Ablagerungen haftet an der Werkstoffoberfläche, der andere verbleibt als Partikel im Kraftstoff [12]. Oxidationsprodukte, die durch hohe Temperaturen auf Metalloberflächen entstehen, konnten in Ablagerungen bereits identifiziert werden [6]. Wird die Oxidation vermieden, so geht die Ablagerungsmenge drastisch zurück [36].

Alterungsprodukte als innere Ablagerungen finden sich vorwiegend am Magnetventil des Injektors.

#### **I.3.1.3 Testverfahren**

Für die Untersuchungen zur Einsatztauglichkeit von Kraftstoffen, aber auch Motorkomponenten wie Förderpumpen und Injektoren und selbstverständlich auch zur Erforschung der wissenschaftlichen Zusammenhänge ist es von großer Wichtigkeit, eine geeignete Prüfmethode zur Verfügung zu haben, mit der die Tendenz zur Ablagerungsbildung von Kraftstoffen und Kraftstoffkomponenten in modernen Dieselmotoren untersucht werden kann

[24]. Hierzu steht aktuell für den Automobilbereich im Wesentlichen der motorische DW10-Test (CEC F-98-08) zur Verfügung. Dieser wurde im März 2008 vom „Coordinating European Council“ (CEC) als zertifizierte Prüfmethode zur Verfügung gestellt [48]. Der Name stammt von dem eingesetzten Motor, einem „DW10“-Motor des PSA-Konzerns. Der DW10-Test war ursprünglich als Nachfolger des XUD9-Tests (CEC DF 98-08) zur Untersuchung äußerer Injektorablagerungen („External Diesel Injector Deposits“, EDID) gedacht [24]. IDID können mit dem DW10-Test ebenfalls nachvollzogen werden. Aktuell wird die Variante „DW10c“, basierend auf einem DW10c-Motor von Peugeot, entwickelt. Im Vergleich zur Variante „DW10b“ werden Magnetventilinjektoren anstelle von Piezo-Injektoren verwendet. Für den im Test eingesetzten DW10c-Motor gibt es aus dem Feld Berichte über Probleme mit IDID. Aufgrund dieser Berichte wird vermutet, dass der DW10c-Test IDID realistischer nachbildet [50]. Die Versuchsdurchführung eines DW10-Tests ist sehr teuer, unter anderem, weil die Lebensdauer des Versuchsmotors nur 600 bis 1.110 Betriebsstunden beträgt und bei jedem Versuchslauf ein kompletter Satz Injektoren sowie ca. 700 bis 1.000 l Prüfkraftstoff benötigt werden [24].

Ein weiterer Test ist der XUD9-Test (CEC F-23-01) [45]. Dieser ist kostengünstig, schnell und erprobt, verwendet jedoch einen veralteten Nebenkammerdieselmotor. Er ist dennoch nach wie vor weit verbreitet und wird zur Untersuchung äußerer Ablagerungen eingesetzt.

Für den Bereich der Landmaschinen existieren keine genormten und/oder geeigneten Testverfahren. Neben der Problematik, dass die motorischen Prüfverfahren ohnehin nicht uneingeschränkt den Realbetrieb wiedergeben können, unterscheiden sich Motorkomponenten und Betriebsprofile im Landmaschinenbereich ebenfalls deutlich vom XUD9 und DW10 Test.

### **I.3.2 Einsatz von Pflanzenölkraftstoff**

Der Einsatz von Rapsölkraftstoff bietet das Potential den kraftstoffbedingten Treibhausgasausstoß landwirtschaftlicher Produktionsverfahren um 57 bis 91 % zu reduzieren. Ferner ist Rapsölkraftstoff biologisch schnell abbaubar und kann daher einen wesentlichen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz leisten [18]. Im Folgenden werden bisherige Erkenntnisse zur Kraftstoffqualität, zum Betriebsverhalten der Motoren, zur Ablagerungsbildung und Additivierung beim Rapsölkraftstoffeinsatz zusammengefasst.

#### **I.3.2.1 Kraftstoffqualität**

Grundvoraussetzung für einen zuverlässigen Motorbetrieb sind die Kenntnisse der Kraftstoffeigenschaften sowie die Einhaltung der Kraftstoffqualität [51]. Genormter Rapsölkraftstoff eignet sich auch für den Einsatz in modernen Motoren mit Abgasnachbehandlungssystemen, ist bereits am Markt verfügbar und kann dezentral hergestellt werden. Die aktuelle Norm DIN 51605 [9] für Rapsölkraftstoff legt die Grenzwerte für die kinematische Viskosität, die Dichte, den Heizwert, den Wassergehalt, die Gesamtverschmutzung, die Zündwilligkeit, den Flammpunkt, die Oxidationsstabilität, die Iodzahl und die Säurezahl fest. Die Elementgehalte der Aschebildner bzw. Katalysatorgifte sind bis auf eine

Konzentration an der jeweiligen Nachweisgrenze der Prüfverfahren von 3 mg/kg für Phosphor bzw. 1 mg/kg für Calcium und Magnesium limitiert [9].

Viele Kraftstoffparameter von Rapsölkraftstoff (DIN 51605) [9] und Pflanzenölkraftstoff (DIN 51623) [10] unterscheiden sich von herkömmlichen Kraftstoffen für Dieselmotoren, wie aus Tabelle 1 hervorgeht. Für die Auslegung des Kraftstoffsystems für Rapsölkraftstoff sind die Normparameter kinematische Viskosität, Dichte und Heizwert von wesentlicher Bedeutung. Die kinematische Viskosität von Rapsöl ist bei 40 °C höher als die von Dieselmotorkraftstoff und nimmt mit zunehmender Temperatur deutlich ab. Der volumetrische Heizwert von Diesel ist um ca. 3 bis 4 % höher als von Rapsölkraftstoff.

Auch die Normparameter von Dieselmotorkraftstoff (DIN EN 590), von paraffinischem Dieselmotorkraftstoff (DIN EN 15940) und von Fettsäuremethylester bzw. Biodiesel (DIN EN 14214) stimmen nicht mit den Anforderungen der Worldwide Fuel Charter (WWFC) überein. Die WWFC enthält nicht bindende Empfehlungen zur Kraftstoffqualität. Um die über die übliche Norm hinausgehenden Anforderungen zu erfüllen, werden beim Dieselmotorkraftstoff überwiegend Additive eingesetzt.

Tabelle 1: Vergleich der Anforderungen der WWFC mit den Normen

Parameter	WWFC Diesel, Kat. 4	DIN EN 590 Dieselkraftstoff	DIN 51605 Rapsöl-kraftstoff	DIN 51623 Pflanzenöl-kraftstoff	DIN EN 15940 paraffinischer Diesel-kraftstoff	DIN EN 14214 Fettsäure-Methylester
Dichte	820-840	820-845	910-925	900-930	765-800	860-900
Cetanzahl	min. 55	min. 51	min. 40 ACZ	ist anzugeben	min. 70	min. 51
Aschegehalt	max. 0,001 % m/m	max. 0,01 % m/m			max. 0,01 % m/m	max. 0,02 % m/m
Calciumgehalt			max. 1 mg/kg	max. 1 mg/kg		
Magnesiumgehalt			max. 1 mg/kg	max. 1 mg/kg		
Schmierfähigkeit (HFRR)	max. 400 µm	max. 460 µm			max. 460 µm	
Flammpunkt	min. 55 °C	min. 55°C	min. 101°C	min. 101°C	min. 55°C	min. 101°C
Viskosität @ 40°C	max. 4,0 mm <sup>2</sup> /s	max. 4,5 mm <sup>2</sup> /s	max. 36 mm <sup>2</sup> /s	max. 35 mm <sup>2</sup> /s (50°C)	max. 4,5 mm <sup>2</sup> /s	3,5-5,0 mm <sup>2</sup> /s
Injektorsauberkeit % XUD 9 / DW 10	85/2	./.				
Eisenkorrosion - Rating	Leicht	./.				
Kupferkorrosion -Rating	I	I			I	I
Koksrückstand	max. 0,2 % (m/m)	max. 0,3 % (m/m)			max. 0,3 % (m/m)	
Säurezahl	max. 0,08 mg KOH /g Fuel	max. 0,20 mg KOH /g Fuel	max. 2,0 mg KOH /g Fuel	max. 2,0 mg KOH /g Fuel		max. 30,0 mg KOH /g Fuel
Oxidationsstabilität	min. 35 h	min. 20 h	min. 6 h (DIN EN 14112)	min. 6 h (DIN EN 14112)	min. 20 h	min. 8 h (DIN EN 14112)
Oxidationsstabilität	max. 0,12 mg/g DTAN	./.				
Schaum	max. 100 ml; 15 s	./.				

### I.3.2.2 Motorbetrieb

Die Pflanzenöltraktoren unterscheiden sich in den technischen Lösungen, nach denen die Dieselmotoren für den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff optimiert sind. Die häufigsten mechanischen Eingriffe erfolgen im Niederdruckkraftstoffsystem. Die Viskositätsunterschiede im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff erfordern eine Anpassung des Kraftstoffsystems z. B. mit erhöhten Leitungsquerschnitten oder leistungsfähigeren Kraftstoffpumpen, um eine ausreichende Fördermenge sowie Zerstäubung des Rapsöls zu erreichen. Ferner haben Traktoren üblicherweise Vorwärmssysteme installiert. Beim Ein-Tank-System sind die Traktoren auf den alleinigen Betrieb mit Rapsölkraftstoff angepasst. Im Zwei-Tank-System werden zusätzlich zum Rapsölkraftstoff geringe Mengen an Diesel als Hilfskraftstoff im Kaltstart- bzw. Niedriglastbetrieb oder zur Regeneration der Abgasnachbehandlung eingesetzt. [13][14][16][18]

Bei modernen Motoren mit Common-Rail Einspritzsystemen (CR) ist bei gleichen Motoreinstellungen mit Pflanzenölkraftstoff eine geringere Motorleistung als mit Dieselmotorkraftstoff festzustellen. Im Pflanzenölbetrieb kann der Durchfluss im Injektor geringer sein als mit Dieselmotorkraftstoff, was einen insgesamt geringeren Masseneintrag je Zeiteinheit in den Brennraum verursacht. Der zusätzlich geringere volumetrische Energiegehalt von Rapsölkraftstoff führt zu einer Minderleistung von bis zu 20 %, die allerdings durch Anpassungen in der Motorsteuerungssoftware ohne mechanische Eingriffe ausgeglichen werden kann. Trotz der unterschiedlichen Kraftstoffzusammensetzung von Diesel- und Rapsölkraftstoff wurde in stationären Prüfzyklen mit Dieselmotoren ein vergleichbarer Wirkungsgrad der dieselmotorischen Verbrennung nachgewiesen. [13][14][16][18]

Das Betriebsverhalten moderner rapsölkraftstofftauglicher Traktoren wurde in einer Reihe von Forschungsarbeiten untersucht [16][18][17][46]. Neben dem Einsatz spezieller Pflanzenölmotoren bzw. geeigneter Umrüstmaßnahmen für die Vermeidung von Schäden ist vor allem eine ausreichende Pflanzenölkraftstoffqualität zu gewährleisten. Es wird auf einige Risiken beim Betrieb nicht geeigneter Motorsysteme mit Pflanzenölkraftstoff (im Vergleich mit Diesel) verwiesen (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Risiken und Praxiserfahrungen beim Pflanzenölbetrieb

Risiko: Kraftstoffeintrag ins Schmieröl / Motorölverdünnung		Umrüstung / Praxiserfahrungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Verkürzung der Ölwechselintervalle, aufgrund von Polymerisation von Pflanzenöl bei unsachgemäßen Betrieb und von sehr hohem Kraftstoffeintrag in das Motorölsystem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ erhöhte Wartungskosten, insbesondere bei den älteren Einspritzsystemen. Neue Common-Rail Einspritzsysteme haben die gleichen Ölwechselintervalle wie bei Dieselmotorbetrieb</li> <li>→ Unsachgemäße Wartung kann zu Schmierölverdickung / Motorschäden führen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Sowohl Ein- als auch Zwei-Tank Systeme können zuverlässig betrieben werden</li> <li>→ Abgasnachbehandlungssysteme funktionierten bei Feldversuchen ohne Störung</li> <li>→ Wenige Störungen beschränken sich meist auf das Niederdruckkraftstoffsystem (Undichtigkeiten, Umschaltventile, Vorwärmeinrichtung)</li> <li>→ Mit Rapsölkraftstoff ist bei moderner Common-Rail-Einspritztechnik eine geringe Motorölverdünnung bei gleichen Motorölwechselintervallen wie mit Diesel möglich</li> <li>→ Rapsöl-Diesel-Mischbetrieb ist ohne vom Hersteller freigegebene Umrüstung nicht empfehlenswert</li> <li>→ Schwachlast / Kurzstreckenbetrieb nicht empfehlenswert, ähnlich wie beim Diesel</li> </ul>
Risiko: Verkokung/ Ablagerungsbildung		Wirtschaftlichkeit
<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Verkokungen an Ventilen, an Kolbenringen und an Einspritzdüsen werden nicht als pflanzenölspezifisches Problem gesehen und es besteht Forschungsbedarf</li> <li>→ Verkokungen im AGR-Kühler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ hängende / undichte Ventile</li> <li>→ schlechte Zerstäubung</li> <li>→ Kolbenringschäden / Kolbenklemmer</li> <li>→ Forschungsbedarf besteht</li> <li>→ keine eindeutige Aussage möglich – Forschungsbedarf besteht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Höhere Kosten des Rapsöls im Vergleich zum Dieselmotor (incl. EnergieSt ca. 30 cent/l)</li> <li>→ In der Land- und Forstwirtschaft ist der Rapsölkraftstoff energiesteuerbegünstigt und daher auf einem ähnlichen Preisniveau wie Dieselmotor</li> <li>→ Umrüstung notwendig (Kosten bei Traktoren ca. 7.000 bis 12.000 €)</li> </ul>

### I.3.2.3 Ablagerungsbildung

Die bisher im ABM Projekt erzielten Ergebnisse zeigen, dass auch dezentral hergestellte Rapsöle der 2. Generation (d.h. mit Tonerden nachgereinigt, Anteile der untersuchten Aschebildner Ca, Mg, P, K, Na unterhalb der Nachweisgrenze von 0,5 ppm laut DIN 51605:2016-01) völlig unerwartet zu funktionsbeeinflussenden Ablagerungen in den Common-Rail-Einspritzdüsen (vor allem im Düsenloch) führen können. Der Vorgang der

Ablagerungsbildung bei Pflanzenölkraftstoff ist demnach nicht, wie bisher allgemein angenommen, den o.g. aschebildenden Stoffen geschuldet, sondern hauptursächlich in der Reaktionsfähigkeit des „Grundstoffs“ Pflanzenöl begründet. Zudem besteht bei der Ausprägung der Ablagerungen weiterhin eine Abhängigkeit vom Betriebspunkt/-profil und somit von den einwirkenden Drücken und maßgeblich auch von den vorherrschenden lokalen Temperaturen. Auch bei Dieselmotoren (DK) mit Biodieselanteilen treten temperaturinduzierte Ablagerungsbildungsmechanismen auf [34].

Da die Ablagerungen in den Düsenlöchern der CR-Injektoren unmittelbar zu einem Leistungsverlust führen und im weiteren Verlauf durch veränderte Spraycharakteristika von einer Verschlechterung der Abgasemissionen auszugehen ist, müssen diese unbedingt verhindert werden. Nur dann kann Pflanzenölkraftstoff in modernen Motoren (z.B. landwirtschaftlicher Maschinen) auch in Zukunft eingesetzt werden. Hierfür sollen im vorgeschlagenen Projekt „SAVEbio“ Ansätze zur Ablagerungsminderung/ -verhinderung erarbeitet und eingehend in den Grundlagen erforscht werden.

Nachdem im Vorgängerprojekt ABM die wesentlichen Wirkmechanismen erarbeitet werden konnten, sollen im SAVEbio Projekt unter anderem analytische Verfahren die entwickelten Thesen zum Verständnis der Ablagerungsbildungsmechanismen nachweisen. Wie sich zeigte, müssen auch die teils sehr komplexen chemischen und physikalischen Vorgänge und Wechselwirkungen bei der motorischen Verbrennung von Pflanzenöl weiter differenziert werden.

#### **I.3.2.4 Additivierung**

Es sind keine speziellen Additivierungspakete für Pflanzenölkraftstoff bekannt. Vielmehr werden, wenn überhaupt, bislang die marktüblichen Additivierungsstrategien für FAME / Diesel Blends angewendet. Als Additive für die Pflanzenölkraftstoffkomponente sind, parallel zum FAME-Einsatz, ein Antioxidans und ein Detergent die wichtigsten Wirkstoffe.

Konkrete Untersuchungen, ob sich tatsächlich die gleichen Wirkungen einstellen, oder ob sich unter Umständen positive oder auch negative Wechselwirkungen mit dem Pflanzenöl ergeben, sind nicht bekannt. Die Untersuchung von KASTL et al. (2011) [32] zur Ablagerungsbildung beim Einsatz von Pflanzenölkraftstoff kam zu dem Schluss, dass es nur wenige Veröffentlichungen zur Additivwirksamkeit in Pflanzenöl gibt. Deren Bewertung gestaltet sich zudem schwierig, da oft nicht klar beschrieben wird, um welche Qualität von Pflanzenölkraftstoff es sich handelt. Zudem zeigte sich, dass die Ergebnisse teilweise stark von der eingesetzten Untersuchungsmethode abhängig waren.

Das Thema „Einsatz der Pflanzenöle“ für die Verbrennungsmotoren wird in Deutschland primär durch TFZ (Projektpartner) untersucht. Eine weitere Forschungsstelle, die sich mit dem Thema aktiv befasst, ist die Universität Rostock. Die Ergebnisse dieser durch UFOP oder FNR finanzierten Studien sind i.d.R. frei verfügbar. Daher sollen diese Aspekte nicht der Bestandteil des experimentellen Programms sein.

Schwerpunkt der Literaturrecherche war der Einsatz der Additive und deren Einfluss auf solche Parameter wie:

- Oxidationsstabilität
- Kälteverhalten
- Zündwilligkeit
- Ablagerungsbildung

Durch weiterführende Literaturrecherche wurden folgende Aussagen identifiziert:

1. Temperaturerhöhung sowie Schwermetallspuren zeigten die schwerwiegendsten Auswirkungen auf die Oxidationsstabilität der Rapsölproben, d. h. die Stabilitäten der Kraftstoffproben wurden erheblich verringert. Da im Praxisgebrauch von Rapsölkraftstoff z. B. durch kupferhaltige Bauteile an der Einspritzpumpe bzw. kupferhaltige Leitungen eine Kontamination des Öls mit Kupferspuren eintreten kann, ist zur Gewährleistung der Rapsölqualität bzw. der geforderten Lagerstabilität eine frühzeitige Additivierung mit einem Antioxidationsmittel erforderlich [33].
2. Die Qualität von Rapsölkraftstoff, der im Motor hohen Temperaturen ausgesetzt ist, wird stark beeinträchtigt: der Kraftstoff sollte demzufolge vor dem Einsatz ausreichend mit einem Antioxidationsmittel stabilisiert werden [33].
3. Der Einsatz von Antioxidantien ist normkonform und sinnvoll, da dadurch die Schaffung einer Qualitätsreserve für Transport, Lagerung und Anwendung erfolgt. Die Untersuchungen wurden an einem kommerziell erhältlichen Additiv „Baynox® Plus durchgeführt (chemische Zusammensetzung / Struktur: 100 % m/m 6,6'-Di-tert.-butyl-2,2'-methylen-bis-p-kresol) [33].
4. Durch die Zugabe der marktüblichen Zündwilligkeitsverbesserer (Cetanzahlverbesserer) können die Zündverzögerungen maßgeblich reduziert werden, auch ohne Anpassung der Motorsteuerung auf den Rapsölbetrieb [9][10][51].
5. Durch die Zugabe der marktüblichen Kältefließverbesserer (CFI – Cold Flow Improver) können die Kälteeigenschaften der Pflanzenöle erheblich verbessert werden. Als wirksam haben sich jedoch nicht alle CFI gezeigt. TFZ hat für die Untersuchung des Kälteverhaltens eine eigene Testmethode entwickelt [9][10][51].
6. Die Zugabe von abgelagerungsmindernden Additiven war schwer zu bewerten und daher konnte bis jetzt keine Aussage zur Wirkung gemacht werden. Die Bewertung (optische Begutachtung) der Additivwirkung war erschwert durch die unterschiedliche Konsistenz und das Erscheinungsbild der Ablagerungen. Die Menge der Ablagerungen war unterschiedlich auf der Düsen Spitze und um die Düsenöffnungen und zeigte eine schlechte Reproduzierbarkeit [9][10][51].

Es gibt keine bekannten technischen Lösungen und/oder Konkurrenzverfahren, um die Ablagerungsbildung beim Einsatz von Pflanzenölkraftstoff zu vermindern oder zu vermeiden. Allerdings gibt es mehrere Verfahren und Lösungen, um den Einsatz von Pflanzenöl allgemein zu ermöglichen.

Die Firma Fendt nutzt im „RapsTrak200“ Programm ein 2-Tanksystem das über die BayWa Landmaschinenhändler vertrieben wird. Bei diesem wird mit Diesel gestartet und abgestellt.

Dieses System bietet zwar den Vorteil, dass für die schwierige Betriebsphase des Kaltstarts auf die Diesellösung zurückgegriffen werden kann, jedoch erfordert es einen Spülvorgang vor jedem Abstellen, es benötigt einen zusätzlichen Tank bzw. Betriebsstoff und kann die Vorteile von Pflanzenölkraftstoff nicht in vollem Umfang nutzen. Bezüglich der Verhinderung von Ablagerungen im Düsenloch werden keine Modifikationen durchgeführt.

John Deere hingegen bietet im Rahmen des „RapsTrak200“-Programms ein 1-Tanksystem ab Werk an. Dieses wurde auf Basis eines VWP Umrüstsystems unter dem Mitwirken der regineering GmbH entwickelt. Bezüglich der Verhinderung von Ablagerungen kann John Deere auf Erfahrungen aus Feldtests und aus dem ABM-Projekts zurückgreifen. Hier wurden bereits Strategien ausgearbeitet, die Motorsteuerung (ECU) zumindest für stationäre Betriebspunkte im Pflanzenölbetrieb ablagerungsmindernd anzupassen. Bezüglich der Düsenlöcher werden hier jedoch ebenfalls keine Modifikationen vorgenommen.

Ein weiteres wesentliches Problem bei der Nutzung von Pflanzenölkraftstoff ist die hohe Viskosität, insbesondere bei niedrigen Temperaturen, und die daraus resultierende schlechte Kaltstartfähigkeit eines nicht darauf abgestimmten Motors. Bei Motoren mit Sonderkraftstoffen (z.B. Pflanzenölmotoren) werden deshalb u.a. standardmäßig Düsenheizungen sowie Heizungen an peripheren Motorkomponenten verbaut. Grundsätzlich verstärkt das Vorwärmen von Kraftstoff allgemein jedoch die Ablagerungsbildung. Im Falle des Kaltstarts muss also sowohl der Startfähigkeit als auch nachgelagert der Ablagerungsverhinderung Rechnung getragen werden.

#### **I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Traktor(motoren)hersteller John Deere GmbH & Co.KG ETIC und Deutz AG sind schon in der Planungsphase zu diesem Vorhaben aktiv eingebunden worden. Beide Unternehmen haben zudem Einspritzsystemkomponenten in hohem Umfang unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Insbesondere konnte so der Investitionsbedarf für den nicht-motorischen Ablagerungsprüfstand am OWI signifikant reduziert werden. Weiterhin konnte der Bedarf an Versuchsträgern (Injektoren) durch Bereitstellungen gedeckt werden. Beide Unternehmen haben während der Projektlaufzeit an den regelmäßigen Projekttreffen teilgenommen und so aktiv zum Gelingen des Vorhabens beigetragen.

Weiterhin gilt der Dank der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP e. V.), die das Projekt finanziell unterstützt und im Zuge wertvoller fachlicher Diskussionen zum Projekterfolg beigetragen hat.

## II Ergebnisse

### II.1.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens sind die Bildung und Vermeidung von Ablagerungen in und auf Traktormotor-Injektoren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff untersucht worden. Die Untersuchungen fanden an idealisierten Prüfapparaturen, Traktoren- bzw. Motorprüfständen sowie im Praxiseinsatz statt und hatten zum Ziel, Pflanzenölkraftstoffe als Teil einer Multi-Fuel Einsatzstrategie zum Einsatz zu ertüchtigen. Hinsichtlich einer geeigneten Additivierungsstrategie war es notwendig, die Anwendbarkeit sowie die Wirksamkeit von in Frage kommenden Additiven zu prüfen.

Für zielgerichtete und beschleunigte Ablagerungstests sowie Untersuchungen zur Vermeidung von Ablagerungen bzw. Regeneration von Bauteilen wurde ein nicht-motorischer Injektorablagerungsprüfstand entwickelt und aufgebaut, der für den Heavy-Duty-Anwendungsbereich geeignet ist. Die verwendeten Einspritzsystemkomponenten stammen aus zwei pflanzenöлтаuglichen 6-Zylinder Traktormotoren der Abgasstufe IV. Es zeigte sich, dass mit diesem Prüfstand gezielt Ablagerungen an und in Injektoren erzeugt werden können, die nachgewiesenermaßen zu Funktionsbeeinträchtigungen führen können. Potenzielle Funktionsbeeinträchtigungen können eine verminderte Einspritzmenge oder die Verschiebung von Einspritztimings sein. Diese würden sich im motorischen Betrieb u. a. in Form eines Leistungsverlusts bzw. in erhöhten Abgasemissionen auswirken. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch einen geeigneten Additiveinsatz im nicht-motorischen Prüfstand sowohl die Bildung von Ablagerungen wirksam verhindert bzw. verlangsamt (*keep-clean*) werden konnte als auch vorhandene Ablagerungen entfernt (*clean-up*) wurden. Diese Ergebnisse hinsichtlich des Additiveinsatzes im nicht-motorischen Prüfstand wurden in praxisnahen Vollmotorstudien grundsätzlich bestätigt. Das Prüfkonzept des nicht-motorischen Ablagerungsprüfstands wurde zwischenzeitlich erfolgreich in eine kommerzielle Dienstleistung transferiert. In diesem Zuge wurde der mit wissenschaftlichem Fokus aufgebaute Prüfstand weiter vereinfacht, um die Investitionskosten zu reduzieren.

In den Versuchen am Vollmotor hinsichtlich der Vermeidung äußerer Injektorablagerungen stellte sich ein stark positiver Effekt bei Kühlung des Kraftstoffs im Bereich der Hochdruck-Einspritzleitung heraus. Die Leistungsfähigkeit des Injektors konnte damit aufrechterhalten werden. Mikroskopische Nahaufnahmen der Düsen lassen erkennen, dass sich im Falle der ungekühlten Düse eine ausgeprägte Schicht aus Aschebildnerbestandteilen wie Phosphor, Schwefel und Kalzium bildet, welche bei der gekühlten Düse nicht in der Form vorliegt, der Hauptanteil der Ablagerungen jedoch aus Kohlenstoff besteht und der kraftstoff-eigenen Kohlenwasserstoffstruktur geschuldet ist. Diese Kohlenstoffablagerung wiederum ist stark temperaturabhängig und kann durch Kühlung, vor allem am Eintritt des kühleren Kraftstoffs ins Düsenloch, geringgehalten werden. Zudem zeigte sich eine starke Abhängigkeit vom Motorbetriebspunkt, wobei im Volllastbereich eine geringere Ablagerungsbildung zu verzeichnen war. Übereinstimmend wurde am nicht-motorischen Prüfstand und am Vollmotorprüfstand festgestellt, dass höhere Drücke eine „reinigende“ Wirkung auf die Düsenlöcher haben, da es dabei zu kavitierenden Effekten im Düsenloch

kommt. Ebenso konnten in der Verwendung von Additiven teilweise positive Effekte festgestellt werden. Während ein *clean-up* Additiv sich eher negativ auswirkte (siehe auch Versuchsreihen am Traktorenprüfstand), konnten die Einspritzdüsen in einer *keep-clean* Strategie (zumindest im niedrigeren Lastbereich) „sauberer“ gehalten werden. Bei der Verwendung eines Motorschmieröls mit verringerten Anteilen an Additiven wie Zink und Kalzium konnten jedoch keine positiven Effekte hinsichtlich der Ablagerungsbildung festgestellt werden, da diese Bestandteile im Vergleich zur Kohlenstoffablagerung eher nebenursächlich sind.

Aus den Untersuchungen an pflanzenöлтаuglichen Traktoren im Praxiseinsatz und bei Leistungs- und Emissionsmessungen ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Im Praxiseinsatz treten an den getesteten pflanzenöлтаuglichen Traktoren der Abgasstufe IV Ablagerungen an drei Kraftstoffinjektorsätzen auf, welche zu einer geringfügigen Leistungsminderung von 6 % bis 10 % führen. Die Nutzbarkeit der Traktoren für landwirtschaftlichen Arbeiten im Feld und das Emissionsverhalten im Vergleich zum Neuzustand werden jedoch nicht signifikant beeinflusst. Der Zylinderdruckverlauf sowie Leistungs- und Emissionsmessungen eines rapsöлтаuglichen Traktors der Abgasstufe IIIA bestätigen die volle Funktionsfähigkeit der Injektoren nach einer Laufzeit von 5.600 Bh. Es traten keine schwerwiegenden Störungen oder längeren Ausfallzeiten auf, die im Zusammenhang mit dem Kraftstoffeinspritzsystem bzw. den -injektoren stehen.
- Die Ablagerungsbildung wird begünstigt durch gealterten Rapsölkraftstoff, z. B. aufgrund zu hoher Kraftstofftemperaturen im Traktortank oder durch katalytische Metalle im Kraftstoffsystem. Beide Ursachen können durch einfache bauliche Maßnahmen und die Wahl geeigneter Materialien ausgeschlossen werden.
- Üblicherweise machen sich äußere Ablagerungen am Injektor im praktischen Einsatz durch geringere Leistung bemerkbar, innere Ablagerungen durch geringere Leistung und eine verändertes Emissionsbild. Die Messungen am Traktorenprüfstand zeigen jedoch keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den limitierten Abgasemissionen und dem Ablagerungszustand der Injektoren. Die Abgasemissionen sind daher als zuverlässige Zeigergröße für die Ablagerungsbildung am Kraftstoffinjektor nicht geeignet. Wesentliche Zeigergröße ist daher die Leistung, die allerdings nur in einem vergleichsweise geringen Umfang sinkt, so dass der Effekt häufig im praktischen Betrieb nicht wahrgenommen wird.
- Der Einbau von Injektoren am Traktor, welche am Injektorprüfstand künstlich gealtert wurden, führte ebenso wie bei im Feld gealterten Injektoren zu einer Leistungsminderung im Vergleich zu neuen Injektoren. Die Ablagerungen, die an Injektoren von Traktoren beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff im praktischen Einsatz auftreten, unterscheiden sich jedoch in der Auswirkung auf die Einspritzmenge und den Wirkungsgrad von den Ablagerungen, die am OWI-Injektorenprüfstand erzeugt werden.
- Injektorablagerungen lassen sich durch die Verwendung von Biodiesel als Kraftstoff, z. B. in der Größenordnung einer Tankfüllung, reduzieren. Anschließend sollte jedoch

der Kraftstofffilter kontrolliert und gegebenenfalls gewechselt werden, falls durch Fettsäure-Methylester (FAME) weitere Ablagerungen im Kraftstoffsystem gelöst wurden. Herstellerseitig muss zudem erlaubt sein, das Motorsystem mit Biodiesel zu betreiben. Zum Einsatz von Additiven in Rapsölkraftstoff zur Verringerung von Ablagerungen lassen sich noch keine eindeutigen Aussagen treffen; weitere Untersuchungen sind erforderlich.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass im Rahmen des Vorhabens Betriebsbedingungen für den Einsatz von Rapsölkraftstoffen in Landmaschinen anhand verschiedener methodischer Ansätze untersucht und geeignete Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz identifiziert werden konnten. Eine Kraftstoffstabilisierung mit Antioxidantien hat sich als sinnvoll herausgestellt, um alterungsbedingte Ablagerungsbildung zu vermeiden. Damit einhergehend ist auf technischer Seite die Vermeidung hoher Kraftstofftemperaturen zu empfehlen. Im Zuge der motorischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Reinigung von Ablagerungen vorzugsweise in niedrigen Lastpunkten und möglichst über längere Betriebszeiten durchgeführt werden sollte. Hierfür sind prinzipiell beide untersuchte Detergents (1 und 2) geeignet; da im Feld überwiegend externe Ablagerungen an Kraftstoffinjektoren auftreten, erscheint eine Kombination von Detergent 1 und eines Oxidationsstabilisators zielführend. Hier ist aber anzumerken, dass durch den Einsatz wirkungsstarker Detergents bereits vorhandene Ablagerungen aus dem vorgelagerten Kraftstoffsystem ausgetragen und in die Kraftstoffinjektoren gespült werden können, was insgesamt doch zu einer Verschlechterung der Einspitzcharakteristik führen kann.

## II.1.2 Daten aus dem Realeinsatz (AP 1)

Zur Auswahl der Traktoren wurden am TFZ die Betriebsprofile von insgesamt 20 pflanzenötauglichen Traktoren geprüft, um geeignete Versuchsfahrzeuge für anstehende Messaufgaben zur Injektoralterung auszuwählen. Die Auswahl passender Injektorbaureihen erfolgte in Abstimmung mit dem Projektpartner OWI GmbH sowie der Deutz AG und John Deere GmbH & Co. KG. Ziel war zudem eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den Untersuchungen im Feld bzw. am Traktorenprüfstand des TFZ sowie am Injektorprüfstand des OWI herzustellen.

Die Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Injektoren (z. B. Motordrehzahl und -last, Temperaturen am Injektor) des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S) wurden über eine Saison mit einem Datenlogger aufgezeichnet und ausgewertet.

Die Ergebnisse der Messungen mit standardisierten Prüfzyklen am Traktorenprüfstand an den Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-Wö) wurden zudem für die Weiterentwicklung des nichtmotorischen Injektorprüfstands dem OWI zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel II.1.5.2). Nach Ausbau der Injektoren am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-Wö) waren bei allen Injektoren die Austrittskanten der Einspritzlöcher frei von äußeren Ablagerungen, so dass das Einspritzverhalten der Injektoren nicht oder nur wenig beeinträchtigt wurde (siehe Kapitel II.1.7.2). Die Injektoren aus dem Feldtest wurden am OWI vermessen und zeigten am Injektorprüfstand einen vergleichbaren Alterungszustand (siehe Kapitel II.1.5.5).

Im Praxiseinsatz treten an den getesteten pflanzenötauglichen Traktoren der Abgasstufe IV Ablagerungen an drei Kraftstoffinjektorsätzen auf, welche zu einer geringfügigen Leistungsminderung von 6 % und bis 10 % führen. Die Nutzbarkeit der Traktoren für landwirtschaftlichen Arbeiten im Feld und das Emissionsverhalten im Vergleich zum Neuzustand werden jedoch nicht signifikant beeinflusst. Es traten keine schwerwiegenden Störungen oder längeren Ausfallzeiten auf, die im Zusammenhang mit dem Kraftstoffeinspritzsystem bzw. den -injektoren stehen. Um der Ablagerungsbildung vorzubeugen, gilt es zukünftig vor allem die Kraftstoffalterung im Rapsölkraftstofftank des Zwei-Tank-Systems, z. B. durch Absenkung des Kraftstofftemperaturniveaus, möglichst zu verlangsamen (siehe Kapitel II.1.7.2).

Die Aufbereitung der Versuchsdaten aus dem ABM-Projekt ist unter II.1.3.1 beschrieben, weitere Recherchen u. a. zu typischen Lastprofilen und Einsatzbedingungen werden in den Abschnitten II.1.5.2 und II.1.6.1 behandelt.

## II.1.3 Äußere Ablagerungen: Beeinflussung der Ablagerungsbildung am Vollmotor (AP 2; reengineering GmbH)

### II.1.3.1 Aufbereitung von Versuchsdaten aus dem ABM – Projekt

Im Projekt „Ablagerungsbildungsmechanismen“ (kurz ABM, FNR FKZ 22005411: Projektkoordination, Teilvorhaben1: Versuche am Einzylinder-Prüfmotor) konnten bereits Abhängigkeiten vom Betriebspunkt bzw. Betriebsprofil festgestellt werden [65]. So wurde eine Korrelation der Düsen-Durchflussminderung mit der spezifischen Laufzeit je Startvorgang festgestellt. Werden innerhalb einer mehrstündigen Laufzeit mehrere Stopps mit entsprechend nachfolgenden Starts durchgeführt, sind durch diese vermehrten „soak in“ Phasen im Vergleich zum Dauerlaufbetrieb Verschlechterungen hinsichtlich der Injektordurchflussraten erkennbar. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht dieses Phänomen, wobei die prozentuale Durchflussminderung in Bezug auf die Laufzeit pro Startvorgang dargestellt ist. Der Betriebspunkt des Injektors lag jeweils bei 1.600 bar Einspritzdruck bei einer Öffnungsdauer der Düse von 800 Mikrosekunden.

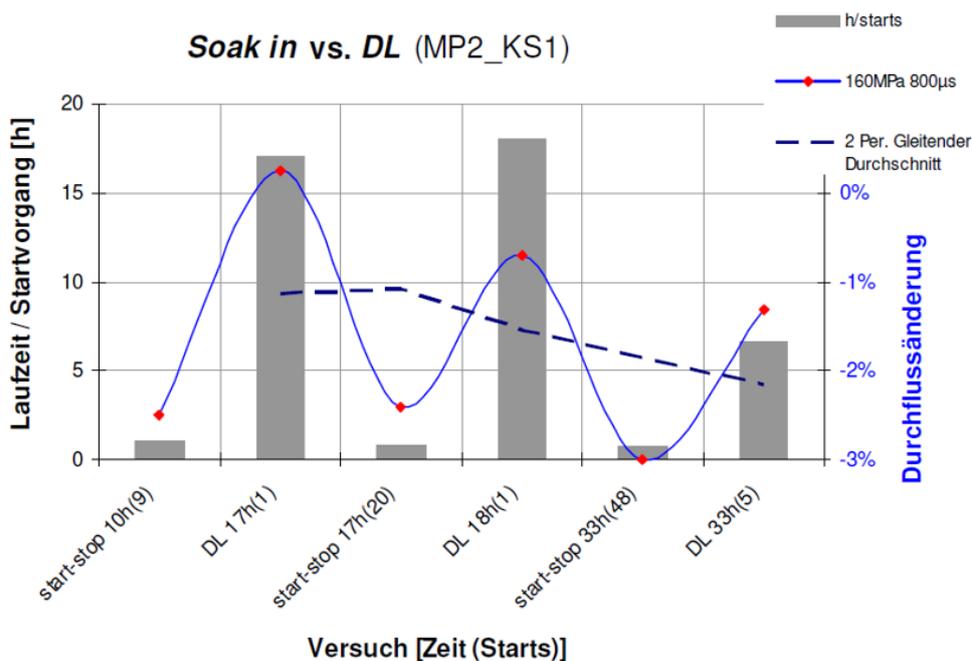


Abbildung 2: Prozentuale Durchflussminderung in Abhängigkeit von der Laufzeit pro Startvorgang

Die STEM - Analyse eines Ausschnitts aus dem Düsenloch (Abbildung 3 und Abbildung 4) zeigt im Belag Zink und Kalzium, womit aufgezeigt wurde, dass Aschebildner Einfluss auf die Ablagerungsbildung haben, welche hauptsächlich in den umgebenden Materialien und in herkömmlichen Motorschmierölen vorhanden sind. Bestandteile aus dem Motorschmieröl können durch Rezirkulation der Verbrennungsgase aus dem Brennraum ins Düsenloch eingetragen werden.

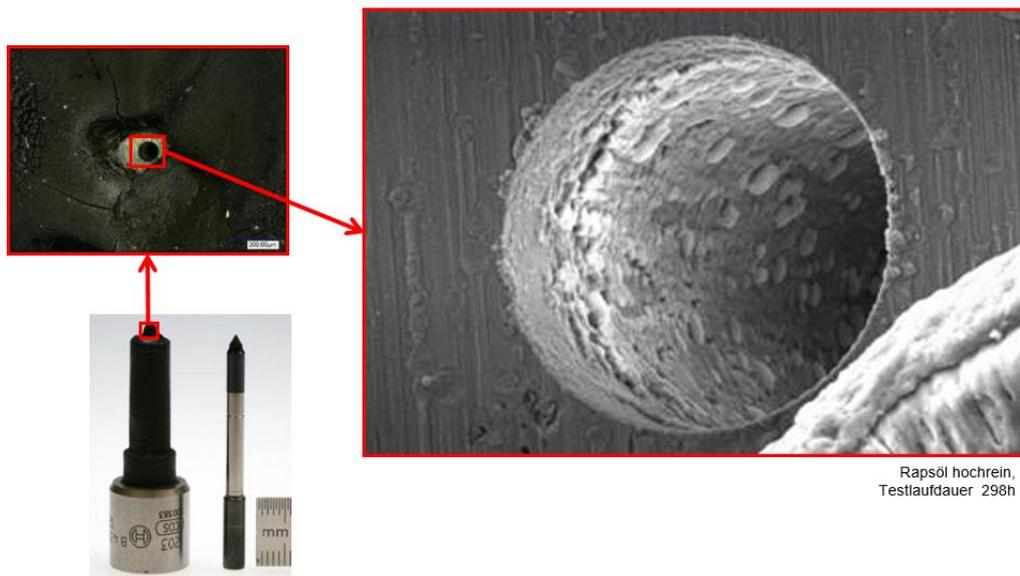


Abbildung 3: Aufnahme Düsenloch

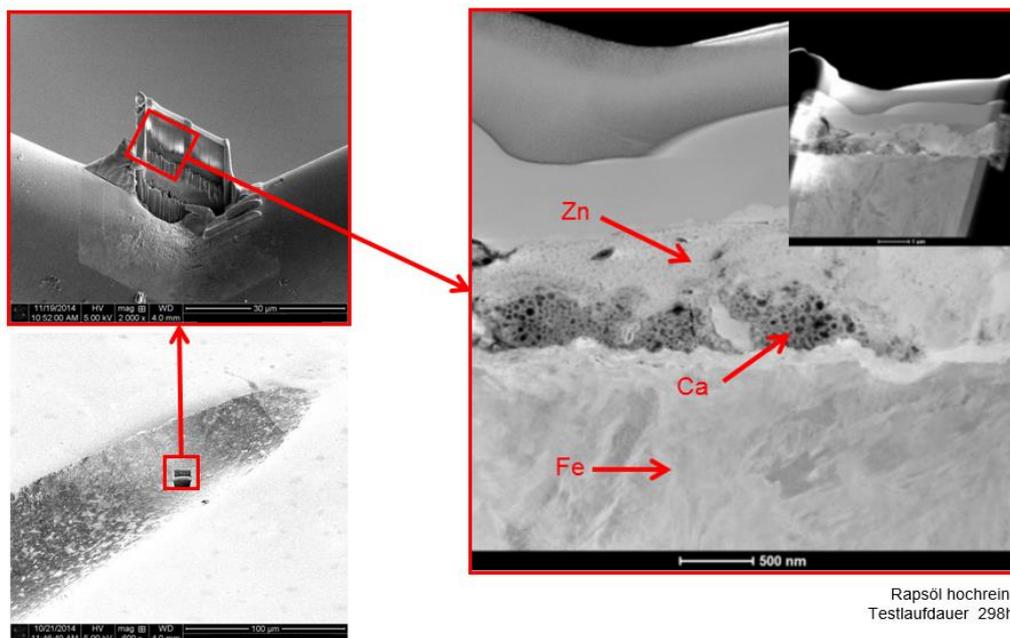


Abbildung 4: Aufnahme Ausschnitt aus Düsenloch

Der größere Effekt auf die Bildung von Ablagerungen ist jedoch den rapsöleigenen physikalisch-chemischen Effekten bzw. dessen Kohlenwasserstoffstruktur geschuldet.

Dabei hat das vorherrschende Temperaturregime großen Einfluss auf die Mechanismen der Ablagerungsbildung. Dazu konnte im ABM-Projekt mit einem Versuch, bei dem Rapsöl großer Hitze ausgesetzt wurde, aufgezeigt werden, dass sich die Ablagerungen (vermutlich hauptsächlich Pyrolysekoks) in einem bestimmten Temperaturfenster je nach Höhe der Temperatur verschieden ausbilden (siehe Abbildung 5).

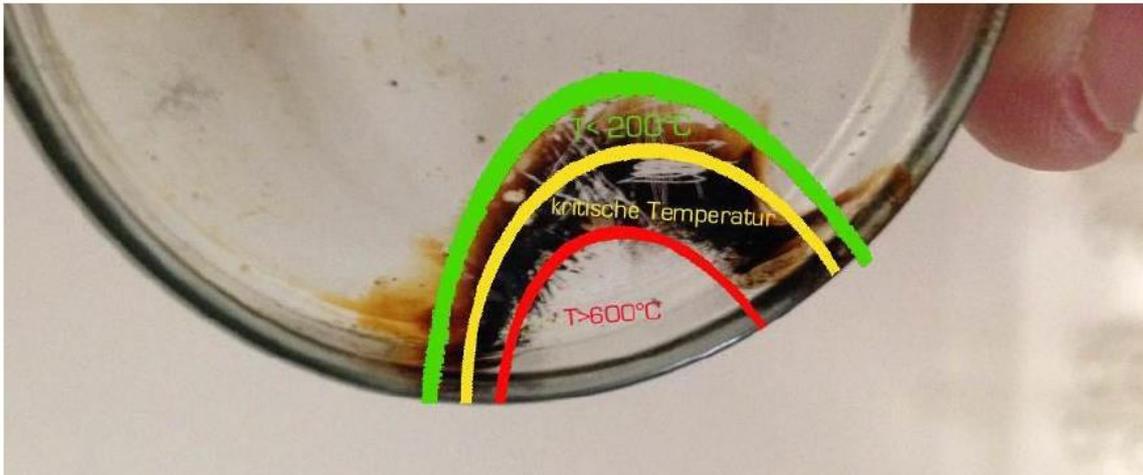


Abbildung 5: Temperaturbereiche zur Bildung von Ablagerungen

In folgender Versuchsdurchführung konnte diese Temperaturabhängigkeit in Form von Durchflussmessungen nachgewiesen werden. Neben den Nahaufnahmen der Düsenlöcher mittels SEM bzw. STEM Mikroskopie liefert die Messung der effektiven Einspritzmenge der Injektoren hierbei eine gute Alternative zur Detektion von äußeren Ablagerungen (EDID). Diese Durchflussmessungen werden an einem nichtmotorischen Einspritzprüfstand (Abbildung 6) durchgeführt, auf dem die Einspritzdüsen immer unter gleichen Bedingungen (Temperatur, etc.) mit einem speziellen Prüföl unter verschiedenen Drücken und Ansteuerzeiten getestet werden können. Abbildung 7 zeigt die unterschiedliche Durchflussabnahme in Abhängigkeit der Kraftstofftemperatur und des Motorbetriebspunktes. Bei diesem Versuch wurde der Kraftstoff in abwechselnden Intervallen aufgeheizt und abgekühlt, wobei ein entsprechender Wärmetauscher im Kraftstofftank installiert wurde. In den Kühlphasen ist eine deutlich geringere bzw. nahezu keine Abnahme zu verzeichnen. Ebenfalls auffällig ist die Abhängigkeit vom Betriebspunkt, in dem der Motor vor der Düsenvermessung betrieben wurde. So ist im Teillastbetrieb eine höhere Durchflussabnahme zu erkennen, was auf mehr Ablagerungen in diesem Betriebspunkt schließen lässt. Da der im Vergleich zum Material im Düsenloch kältere Kraftstoff prinzipiell eine kühlende Wirkung aufweist, ist die geringere Durchflussabnahme im Vollastbetrieb auf die Mehrmenge an eingespritztem Kraftstoff zurückzuführen. Zudem wird der Einspritzdruck im Vollastbetrieb des Motors höher, was aufgrund von kavitierenden Effekten eine „reinigende“ Wirkung aufweist.



Abbildung 6: Motorunabhängiger Einspritzprüfstand

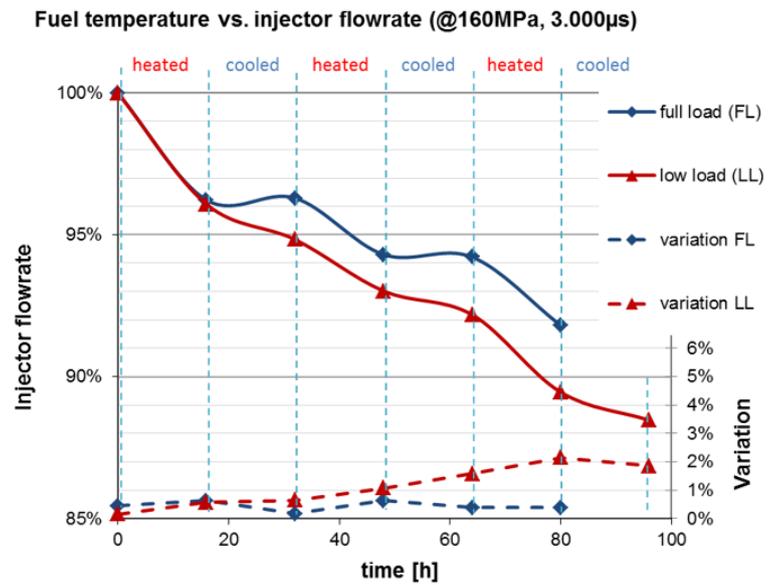


Abbildung 7: Durchfluss in Abhängigkeit von Kraftstofftemperatur und Betriebspunkt

Neben den Durchflussmessungen wurden die Ablagerungen mittels Nahaufnahmen detektiert bzw. lokalisiert. Die folgenden Abbildungen zeigen SEM (scanning electron microscope) Aufnahmen eines Loches einer mit Ablagerungen behafteten Einspritzdüse.

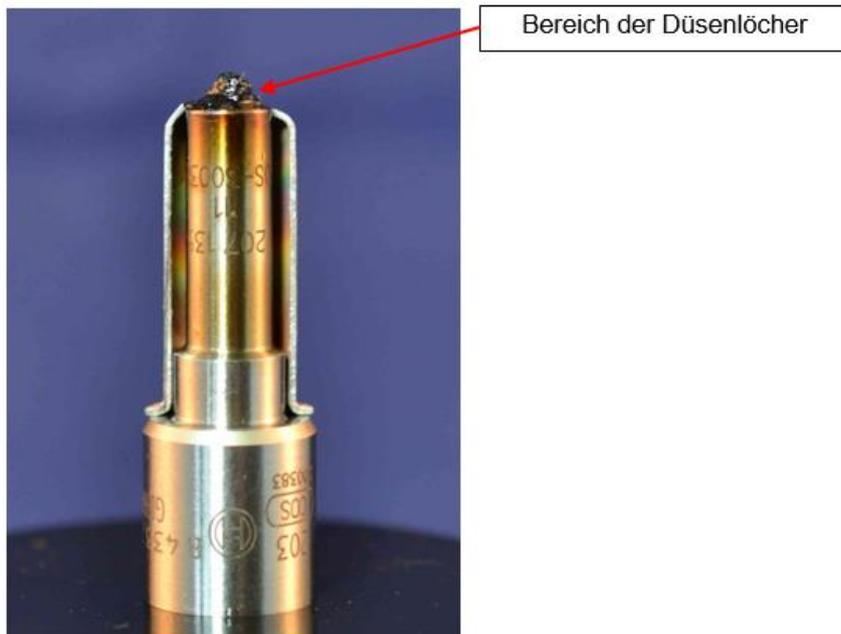


Abbildung 8: Ablagerungsbehaftete Einspritzdüse

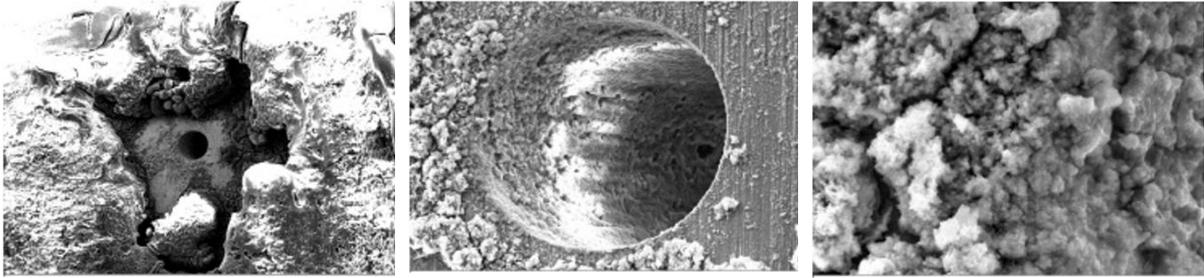


Abbildung 9: SEM Aufnahmen Düsenloch: Vergrößerung links: 150 fach, Mitte: 1.200 fach, rechts: 3.000 fach

Es ist zu erkennen, dass die Ablagerungen um das Einspritzloch herum deutlich ausgeprägter sind als direkt im Loch, was auf den kühlenden Effekt und das „Freischießen“ durch den Kraftstoff zurückzuführen ist. Bei Betrachtung der näheren Aufnahmen (mittleres und rechtes Bild) sind jedoch auch Ablagerungen an der Innenfläche des Düsenlochs erkennbar, welche den Lochquerschnitt verkleinern und so den Durchfluss und damit verbunden die Motorleistung verringern. Deshalb liegt großes Potential in der Kühlung des Kraftstoffs, um den beschriebenen Kühleffekt zu verstärken und so die Ablagerungen zu verringern bzw. nahezu zu vermeiden.

Die dargestellten Grundlagen aus dem Projekt ABM bilden einen hohen Erfahrungsschatz, auf den im gesamten Projektverlauf immer wieder zurückgegriffen werden konnte.

Zusammen mit diesen Erkenntnissen können so die Grundlagen in Einklang mit den im vorliegenden Projekt erarbeiteten Ergebnissen gebracht werden, woraus effektive Gegenmaßnahmen abgeleitet werden können.

### II.1.3.2 Grundlagenversuche am Vollmotor, Spezifizierung und Analytik

#### Temperaturmessung an der Einspritzdüsen Spitze

Wie erläutert besteht hohes Potential in der Kühlung des Kraftstoffs, um äußere Ablagerungen zu vermeiden. Dazu liegt großes Interesse in der Messung der Temperatur an der Düsen Spitze, um einerseits kritische bzw. ablagerungsfördernde Temperaturbereiche zu detektieren und um andererseits den Einfluss dieser Temperatur bzgl. gekühltem Kraftstoff zu analysieren. Dazu wurde die Einspritzdüse entsprechend modifiziert, um ein Thermoelement mit einem Durchmesser von 0,5 mm entlang des Düsenchafts bis zur Düsen Spitze bzw. -kuppe zu führen und dort anzubringen. Außerdem wurde der zu modifizierende Injektor zunächst mittels CAD konstruiert und simuliert, sodass mögliche Kollisionen, die eine Beeinträchtigung der Strahlgeometrie zur Folge hätten, ausgeschlossen werden können (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).



Abbildung 10: Konstruktion der modifizierten Düse

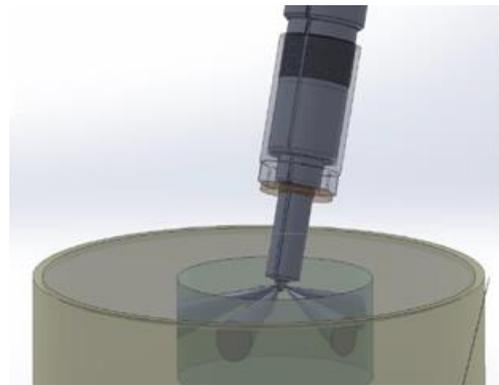


Abbildung 11: Simulation der modifizierten Düse

Nach der Konstruktion bzw. Simulation der Düse erfolgte die Umsetzung. Dazu wurde eine Fräsnut wie gezeichnet entlang des Düsenschafts eingearbeitet. An der Düsenkuppe wurde nahe der Einspritzlöcher eine kleine „Mulde“ eingebohrt, in welcher das Thermoelement eingepasst wurde, um einen möglichst guten und lochnahen Kontakt herzustellen. Als einen ersten Ansatz wurde das Thermoelement mittels Laserschweißverfahren an der Düsenspitze befestigt. Da es hierbei jedoch zum einen schwer möglich war eine stabile und damit beanspruchbare Verbindung zu schaffen und andererseits durch das Fügen mit dem Düsenmaterial die NiCr-Ni Messelektroden (Thermoelement Typ K) beeinflusst oder bei Durchbrand gar zerstört werden können, wurde die Variante des Einklebens des Thermoelements in Betracht gezogen. So wurde im nächsten Schritt das Thermoelement mittels eines hochtemperaturfesten Zweikomponentenklebstoffes an der Düsenspitze angebracht, wodurch auch die Fräsnut im Düsenkörper etwas angepasst werden musste. Mit diesem Vorgehen konnte das Thermoelement ohne Beschädigungen befestigt werden. In Abbildung 12 und Abbildung 13 ist die modifizierte Düse mit eingeklebtem Thermoelement dargestellt.



Abbildung 12: Für Temperaturmessung an der Düsen Spitze modifizierte Einspritzdüse



Eingeklebt  
Thermoelement

Abbildung 13: Düsen Spitze mit eingeklebtem Thermoelement

Nach jetzt erfolgreicher Anbringung des Thermoelements erfolgte zunächst der Einbau in den nichtmotorischen Einspritzprüfstand, wo die Düse auf ihr Einspritzverhalten ohne Verbrennungseinfluss wie simuliert erfolgreich getestet werden konnte. Abbildung 14 zeigt die Auswertung des Einspritzversuches.

Prüfschritt	Ansteuerdauer ( $\mu$ s)	Druck (MPa)	Messzeit (s)	Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /H)
Leak test	0	100	60	----
1050_11_50 0bar	745	50	90	11,43
1500_11_60 0bar	686	60	90	12,06
1500_15_60 0bar	805	60	90	16,8
2270_17,5_ 800bar	734	80	90	18,84
2270_20_90 0bar	750	90	90	22,4
1500_25_10 00bar	785	100	90	25,92
2400_25_10 00bar	812	100	90	27,51

Abbildung 14: EPS Auswertung nach Modifikation der Düse

In der linken Spalte „Prüfschritt“ ist jeweils der analoge Betriebspunkt für die in der Motorsteuerung des Prüfstands hinterlegten Daten. Beispielsweise entspricht die effektive Öffnungszeit des Injektors 745 Mikrosekunden, um bei einer Drehzahl von 1050 U/min und einem Raildruck von 500 bar eine Einspritzmenge von 11 mm<sup>3</sup> pro Hub zu erhalten. Die Ansteuerzeiten und Raildrücke verschiedener Betriebspunkte wurden auf den Einspritzprüfstand übertragen und die tatsächliche Einspritzmenge überprüft. Bei Betrachtung der rechten Spalte „Einspritzmenge“ wird ersichtlich, dass die Werte in jedem Betriebspunkt ihr Soll erfüllen, wodurch der Injektor wie simuliert seine vollständige Leistungsfähigkeit auch nach der Modifikation bzw. Bearbeitung bzgl. des Thermoelements aufweist. Nach den motorunabhängigen Versuchen am EPS konnte die modifizierte Düse ebenfalls erfolgreich im Motorbetrieb getestet werden. Dazu wurde ein Kraftstoffkühlsystem als Ablagerungsvermeidungsstrategie entwickelt, um den Einfluss von gekühltem Kraftstoff auf die Düsens Temperatur zu ermitteln. Die Beschreibung der Entwicklung und des Aufbaus des Kühlsystems mit anschließenden Versuchen ist unter II.1.3.3 „Konzepte gegen Ablagerungsbildung“ dargelegt. (Die Modifikation der Einspritzdüse mit anschließenden Versuchsdurchführungen wurde aus verschiedenen Gründen zunächst am Einzylinder-Forschungsmotor durchgeführt.

### Aufbau des Vollmotorenprüfstands

Da der verfügbare stationäre 4-Zyl-Prüfstand für dieses Projekt bzgl. seiner Betriebspunkte variabel einsetzbar sein muss, wurde er parallel zu den beschriebenen Arbeiten entsprechend modifiziert bzw. umgebaut und die Funktionsfähigkeit anhand erster Testläufe festgestellt. Bei der Maschine handelt es sich um ein Aggregat von Himoinsa mit einer elektrischen Maximalleistung von 68 kW. Der Generator UCI224G1 von Stamford wird vom 4-Zyl-Verbrennungsmotor Iveco NEF45TE2F, welcher über ein modernes

Common-Rail-Einspritzsystem von Bosch verfügt, angetrieben. Abbildung 15 zeigt die verwendete Maschine.



Abbildung 15: Verwendete Maschine für den Umbau zum Prüfstand

Bzgl. der Modifikation für dieses Projekt wurde eine variable Last- und Drehzahlsteuerung realisiert, mit der ein in landwirtschaftlichen Traktoren übliches Drehzahlband stufenlos von 850 U/min - 2.200 U/min unabhängig von der Motorleistung, welche ebenfalls variabel in 3 kW - Stufen bis zur maximalen Motorleistung von 68 kW einstellbar ist, dargestellt werden kann.

Für die Umsetzung der Drehzahlsteuerung wurden einige Änderungen und Umprogrammierungen bzw. Parametrierungen in den Datensätzen der entsprechenden Steuergeräte des Aggregats vorgenommen. Die Kommunikation bzw. Struktur der Steuergeräte ist in Abbildung 16 erkennbar, während in Abbildung 17 die Verdrahtung am Messmodul zur Realisierung des Drehzahlbereichs ersichtlich ist.

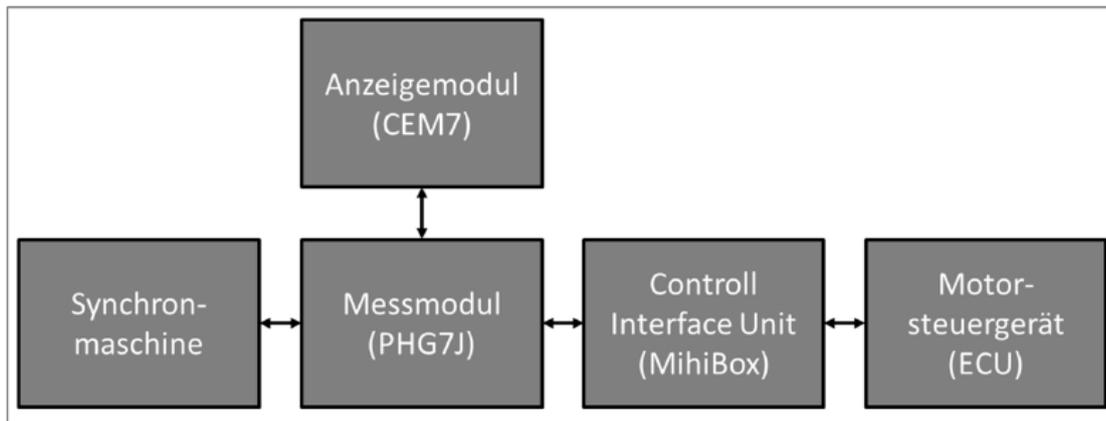


Abbildung 16: Steuergerätestruktur des Prüfstands

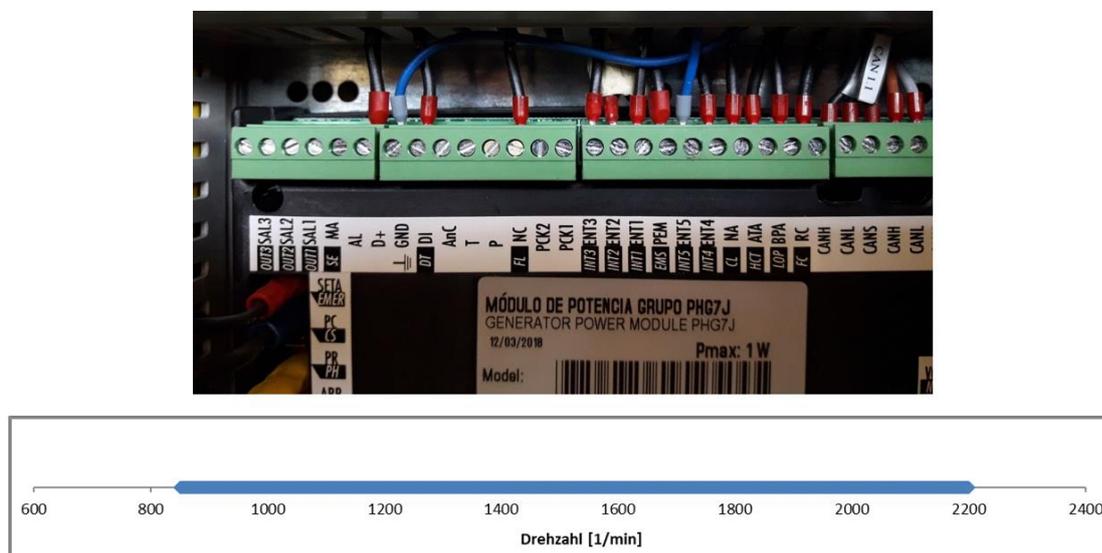


Abbildung 17: Verdrahtung Messmodul für die Drehzahlsteuerung

Zur Laststeuerung werden Heizelemente verwendet, welche das Wasser eines Wärmespeichers erwärmen. Da das Aggregat dadurch nicht an das elektrische Netz gekoppelt ist, kann die Frequenz abweichend der standardmäßigen stationären 50 Hz Netzfrequenz variiert werden, womit daraus resultierend beliebige Drehzahlen eingestellt werden können. Zur Darstellung verschiedener Leistungen werden je nach Bedarf mehr oder weniger Heizelemente zugeschaltet. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den elektrischen Schaltplan zur Ansteuerung der Leistungseinheit sowie einen Ausschnitt aus einem ersten Testbetrieb bei einer Drehzahl von 1.200 U/min und einer zugeschalteten Leistung von 17 kW.

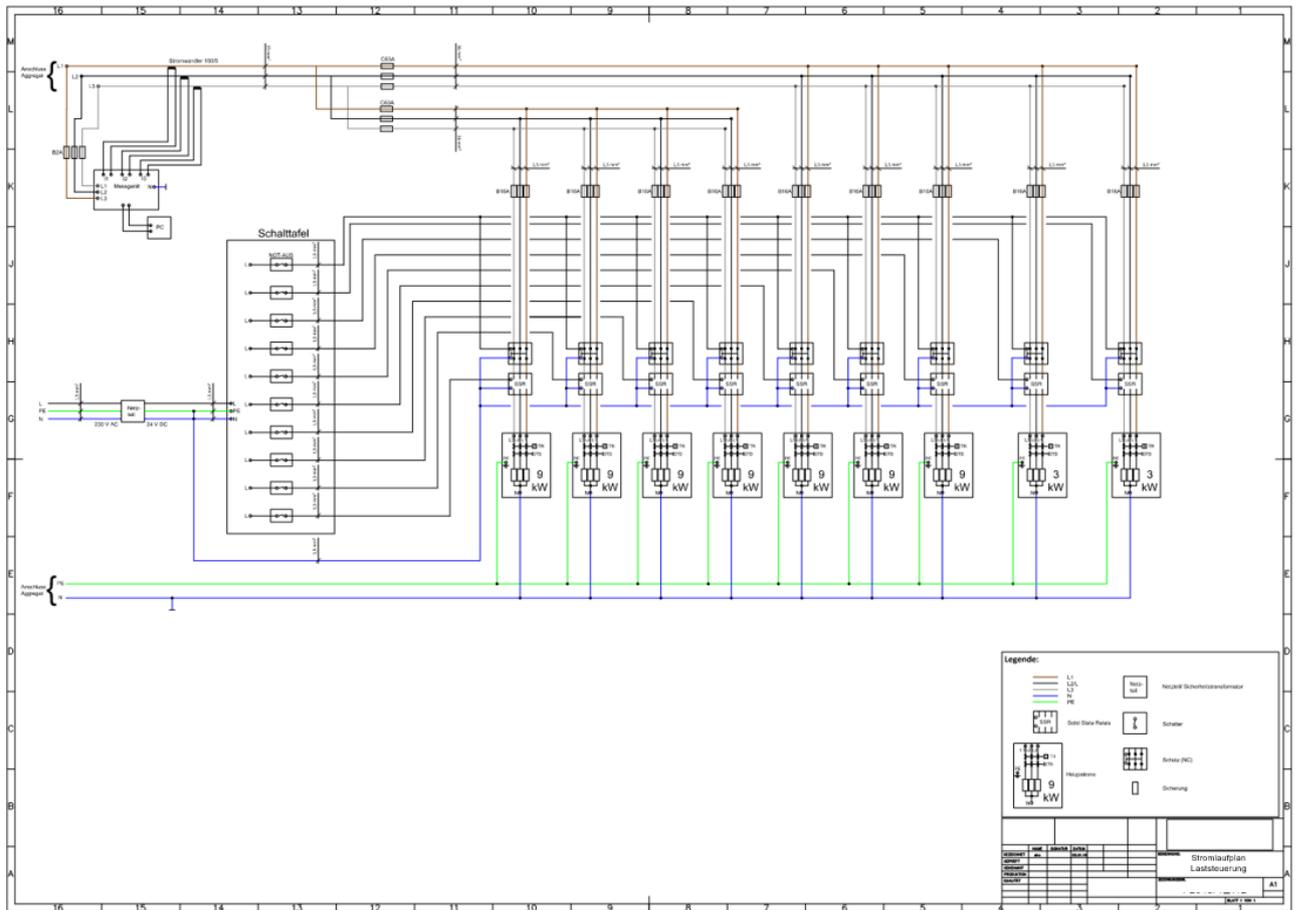


Abbildung 18: Elektrischer Schaltplan für die Laststeuerung



Abbildung 19: Testlauf zur Last- und Drehzahlsteuerung

Die Abwärme dieses Wärmespeichers wird zusammen mit der Abwärme des Motors in den am Aufstellort vorhandenen Pufferspeicher mit 5.000 Liter Fassungsvermögen eingespeist. Abbildung 20 zeigt dazu einen Ausschnitt aus dem Hydraulikschema zur Einbindung des Zusatzwärmespeichers.

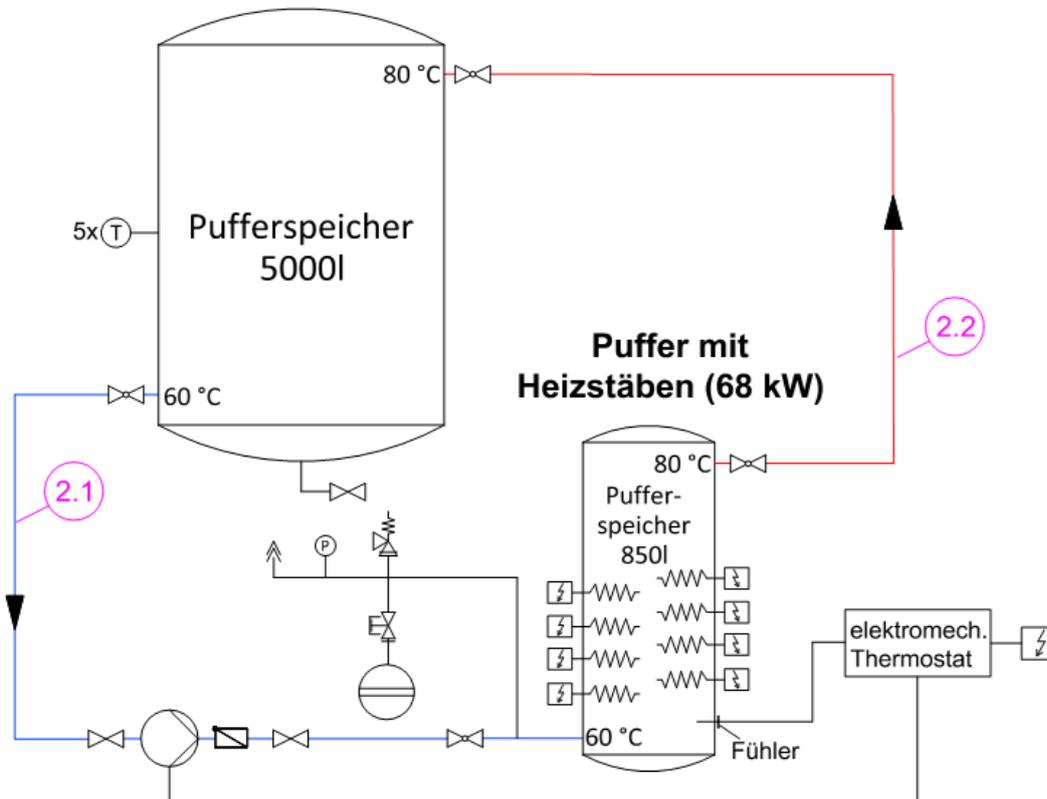


Abbildung 20: Hydraulikschema mit Einbindung des Zusatzwärmespeichers zur Laststeuerung

Nach erfolgreicher Modifikation und einigen Testläufen des Prüfmotors konnten die Versuche wie geplant am Vollmotor durchgeführt werden. Zur Vergleichbarkeit wurde für jeden Versuch ein Zeitfenster von 100 Motorbetriebsstunden ausgewertet.

- **Durchflussmessungen**

Die Durchflussmessungen der folgenden Versuchsreihen beziehen sich auf einen Einspritzdruck von 1.100 bar bei einer Ansteuerdauer von 2.100 Mikrosekunden. Die Messpunkte wiederum beziehen sich auf die „Neuwerte“ (100%) der Düsen, die jeweils vor dem Einbau in den Motor erfolgten. Um eventuelle Messungenauigkeiten zu minimieren, wurde der Durchfluss jeweils dreimal gemessen und der Mittelwert gebildet.

- **Kraftstoffkühlung am Vollmotor**

Die bereits erarbeitete Erkenntnis der Ablagerungsvermeidung durch Kühlung des Kraftstoffes wurde ebenfalls auf den Vollmotor übertragen. Dazu wurde der Kraftstoff im Bereich der Hochdruck - Einspritzleitung gekühlt. Abbildung 21 zeigt eine Auswertung von Durchflussmessungen, in welchen eine Einspritzdüse gekühlt und eine im Originalzustand betrieben wurde. Der Motor wurde hierbei bei Volllast (68 kW bei 1.500 U/min) betrieben.

**Hinweis:** Die Entwicklung des Kraftstoffkühlsystems ist unter II.1.3.3 „Konzepte gegen Ablagerungsbildung“ genauer dargestellt.

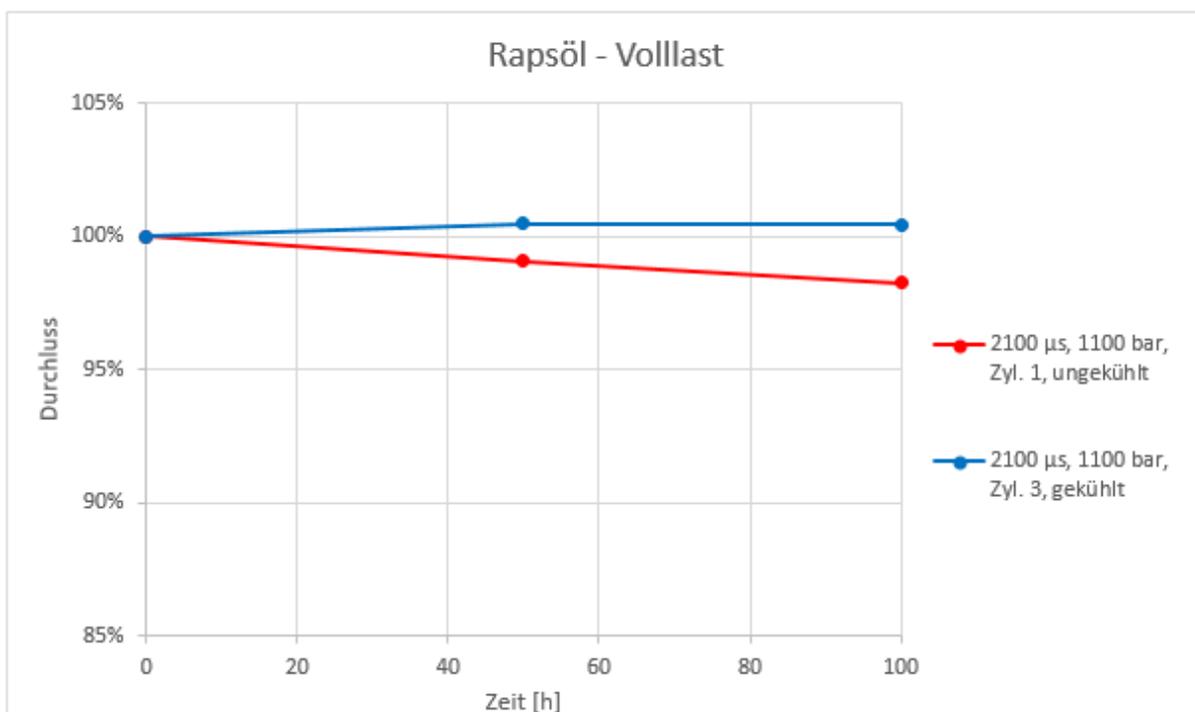


Abbildung 21: Durchflussmessung einer gekühlten und einer ungekühlten Düse

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der gekühlten Düse der Durchfluss im Rahmen der Messgenauigkeit über die gesamte Laufzeit konstant bleibt, wohingegen die originale Düse einen abnehmenden Verlauf aufweist. Um genauen Aufschluss über die Entwicklung der Ablagerungsbildung in Abhängigkeit der Motorlaufzeit zu erhalten, wurden die beiden Düsen auch bereits nach 50 Betriebsstunden vermessen. Dadurch ist zu erkennen, dass der Düsendurchfluss linear (im Falle der originalen Düse) über die Motorlaufzeit abnimmt. Zusammenfassend stellte sich auch am Vollmotor eine positive Abhängigkeit der Kraftstoffkühlung auf eine Ablagerungsbildung heraus. Neben den dargestellten Durchflussmessungen der Einspritzdüsen wurden die beiden verbleibenden Düsen, von denen ebenfalls eine gekühlt und die andere im Originalzustand betrieben wurde, im Labor mikroskopisch untersucht. In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind SEM Aufnahmen aller jeweils acht Düsenlöcher der ungekühlten und gekühlten Düse dargestellt.

SEM examination

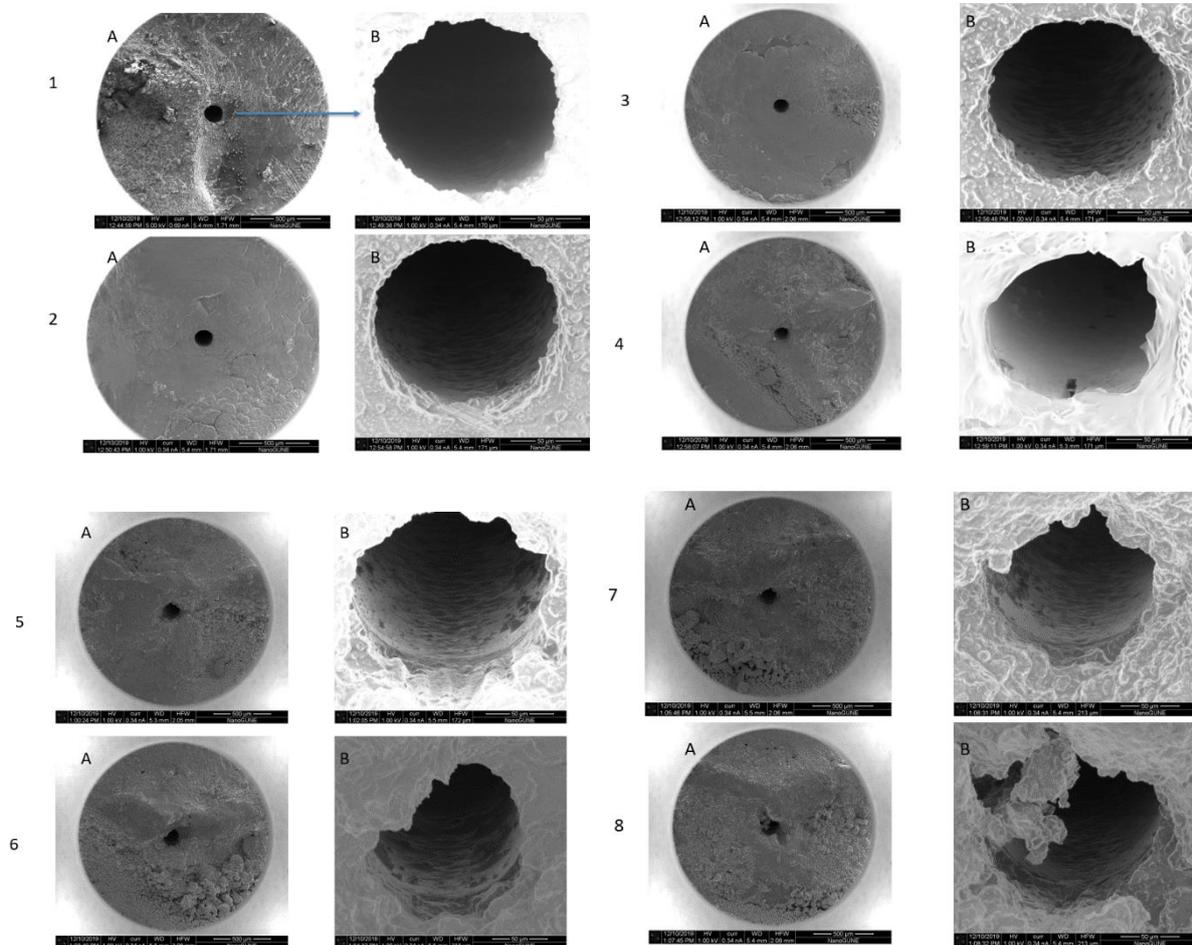


Abbildung 22: SEM Aufnahmen Düsenlöcher der ungekühlten Düse

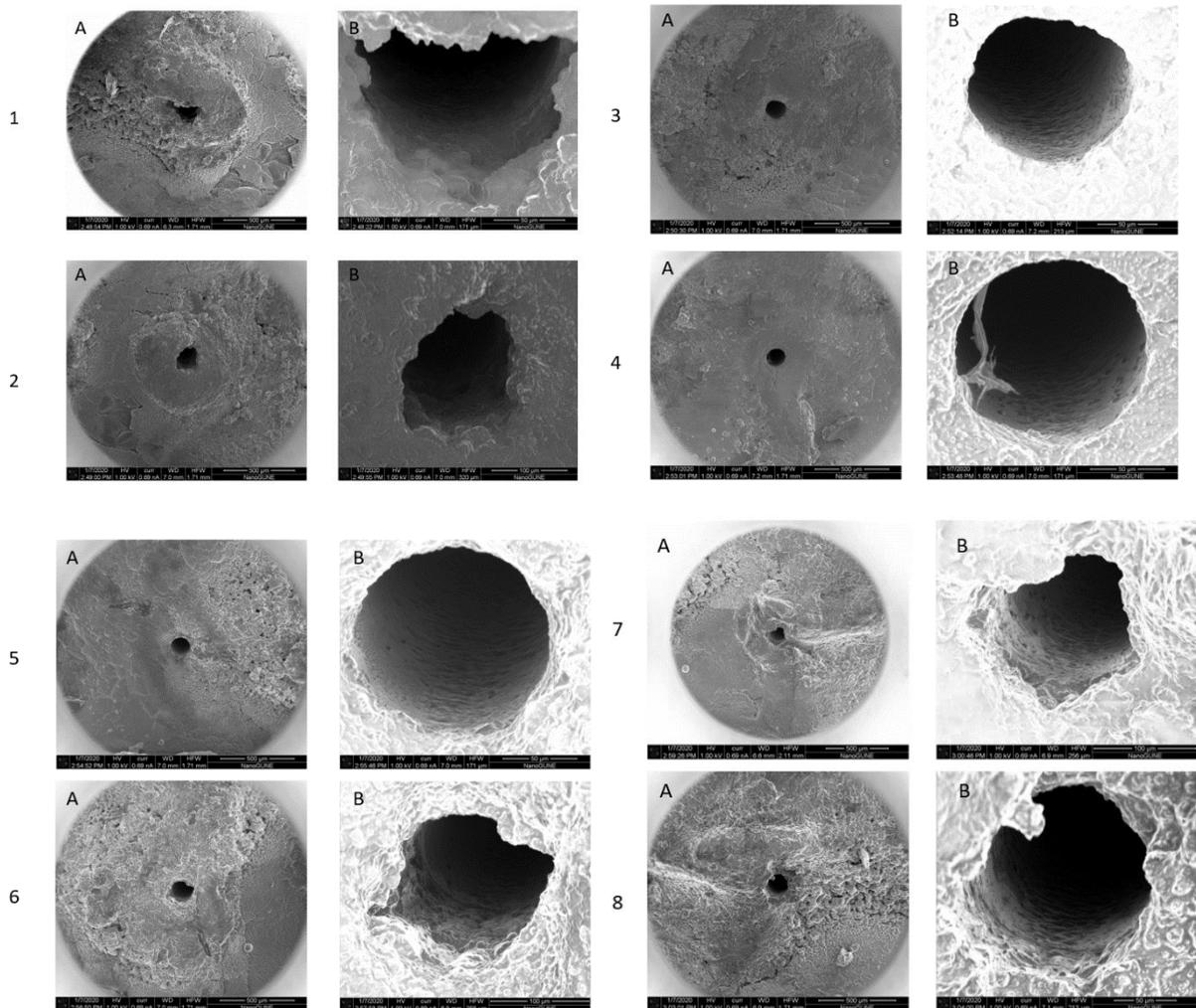


Abbildung 23: SEM Aufnahmen Düsenlöcher der gekühlten Düse

Hier sieht man beim Vergleich der beiden Düsen zunächst keine signifikanten Unterschiede, da sowohl bei der ungekühlten als auch bei der gekühlten Düse teils „schlechtere“ und teils „bessere“ Strukturen der Einspritzlöcher erkennbar sind. Um genaueren Aufschluss über die Struktur in den Ablagerungen zu erhalten, wurden aus den Düsen kleine Probeteilchen (Lamella) aus dem Düsenloch herausgeschnitten und deren Schichtaufbau untersucht. Abbildung 24 zeigt zunächst die Probenvorbereitung mit dem herausgeschnittenen zu untersuchenden Element. (Zum Vergleich: Der Durchmesser des Düsenlochs beträgt ca. 0,15 mm).

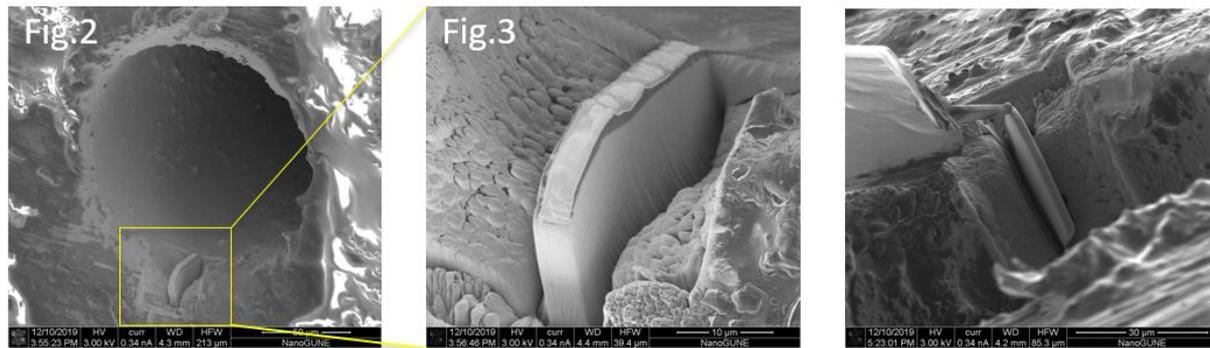


Abbildung 24: Probenausschnitt für die STEM Analyse

Im Folgenden wurden die chemischen Elemente in der Schicht der Proben untersucht. Abbildung 25 zeigt dazu die STEM Aufnahme der Probe der ungekühlten Düse im rot umrandeten Bereich (siehe linkes Bild). Der weiße Bereich stellt das Düsenmaterial, das hauptsächlich aus Eisen, Chrom und Nickel besteht da. Der schwarz dargestellte Bereich beinhaltet Ablagerungen, welche vorher im Motorbetrieb entstanden sind. (Die weiße Schicht über den Ablagerungen ist eine Platinschicht, welche bei der Probenvorbereitung aufgrund der benötigten Elektronentransmissionen des STEM Messprinzips aufgetragen wird).

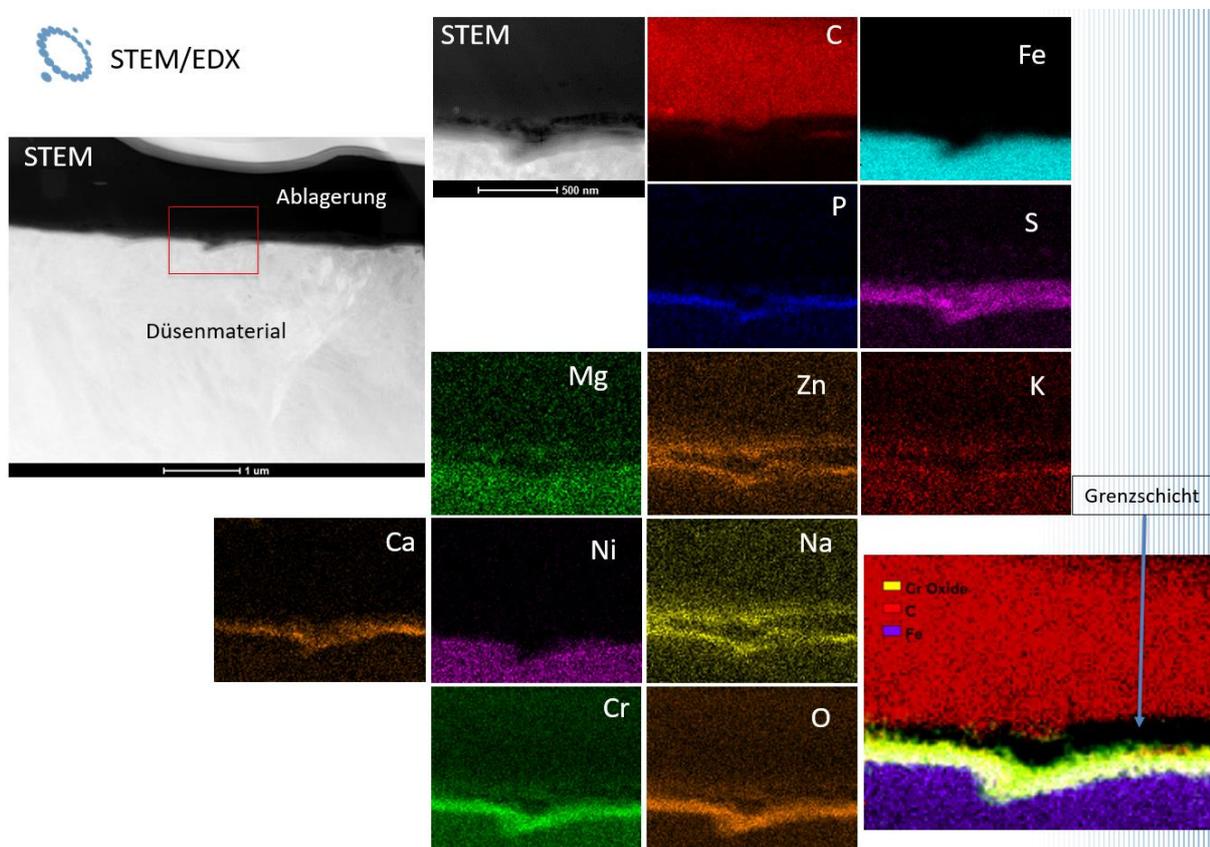


Abbildung 25: STEM Analyse der ungekühlten Düse

Es ist erkennbar, dass der Hauptbestandteil der Ablagerungen Kohlenstoff (siehe roter Bereich) ist, welcher sich wie eingangs beschrieben aus den Kohlenwasserstoffketten des Kraftstoffs abgelagert. Die weiteren Bestandteile sind Spurenelemente bzw. stammen aus Reaktionen mit dem Kraftstoff und dem Motorschmieröl. Oberhalb des Düsenmaterials ist zudem zunächst eine Chromoxidschicht zu erkennen. Auffallend ist eine Grenzschicht (siehe schwarzes Feld im Bild rechts unten) noch vor der Kohlenstoffablagerung, in welcher hauptsächlich die Bestandteile Phosphor (P), Schwefel (S) und Kalzium (Ca) zu verzeichnen sind, welche wiederum als Aschebildner im Rapsölkraftstoff oder als Additive im Motorschmieröl vorzufinden sind. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 26 nochmal dargestellt, in der der Aufbau der Grenzschicht detaillierter betrachtet wurde.

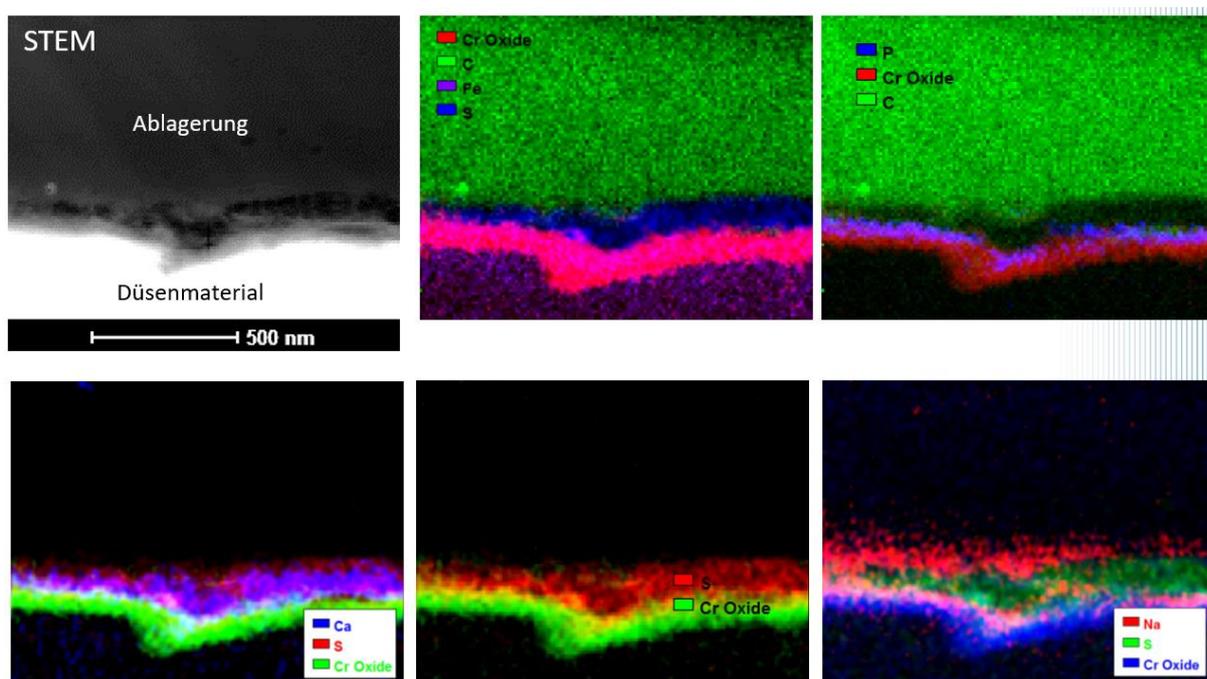


Abbildung 26: STEM Analyse der Grenzschicht der ungekühlten Düse

In folgender Abbildung ist zum Vergleich die STEM Auswertung der gekühlten Düse dargestellt.

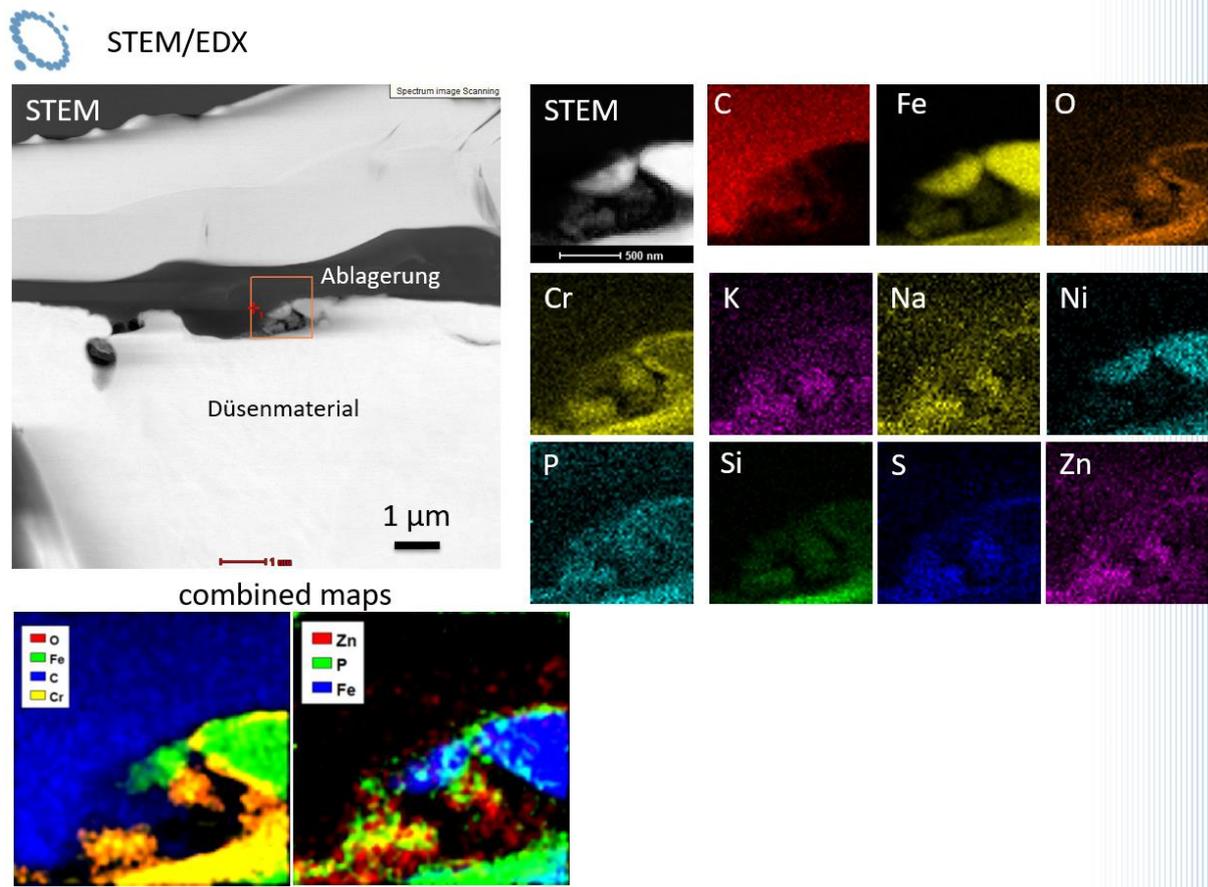


Abbildung 27: STEM Analyse der gekühlten Düse

Es ist wieder deutlich die Kohlenstoffschicht als Hauptanteil der Ablagerung erkennbar. Jedoch ist die ausgeprägte Grenzschicht hier nicht zu verzeichnen. Die Bestandteile wie Phosphor und Schwefel sind lediglich, wie auch bei der ungekühlten Düse, in geringerer Ausprägung teils im Material und teils in den Ablagerungen verteilt. Somit ist zu vermuten, dass sich diese Bestandteile vorzugsweise bei höherem Temperaturniveau an den Düsenlöchern ablagern. Auch die Bildung der Kohlenwasserstoffablagerung ist stark temperaturabhängig und kann durch Kühlung, vor allem am Eintritt des kühleren Kraftstoffs ins Düsenloch, geringgehalten werden, was sich wiederum positiv auf die Leistungsfähigkeit des Injektors (siehe Abbildung 21) auswirkt.

### Dieselreferenzversuch

Als Vergleich zu den Untersuchungen mit Rapsöl nach DIN 51605 wurde die Ablagerungsbildung ebenfalls in Dieselreferenzversuchen untersucht, da aufgrund einer ähnlichen chemischen Struktur von Dieselkraftstoff [64] [65] auch im Dieselbetrieb Ablagerungen zu erwarten sind.

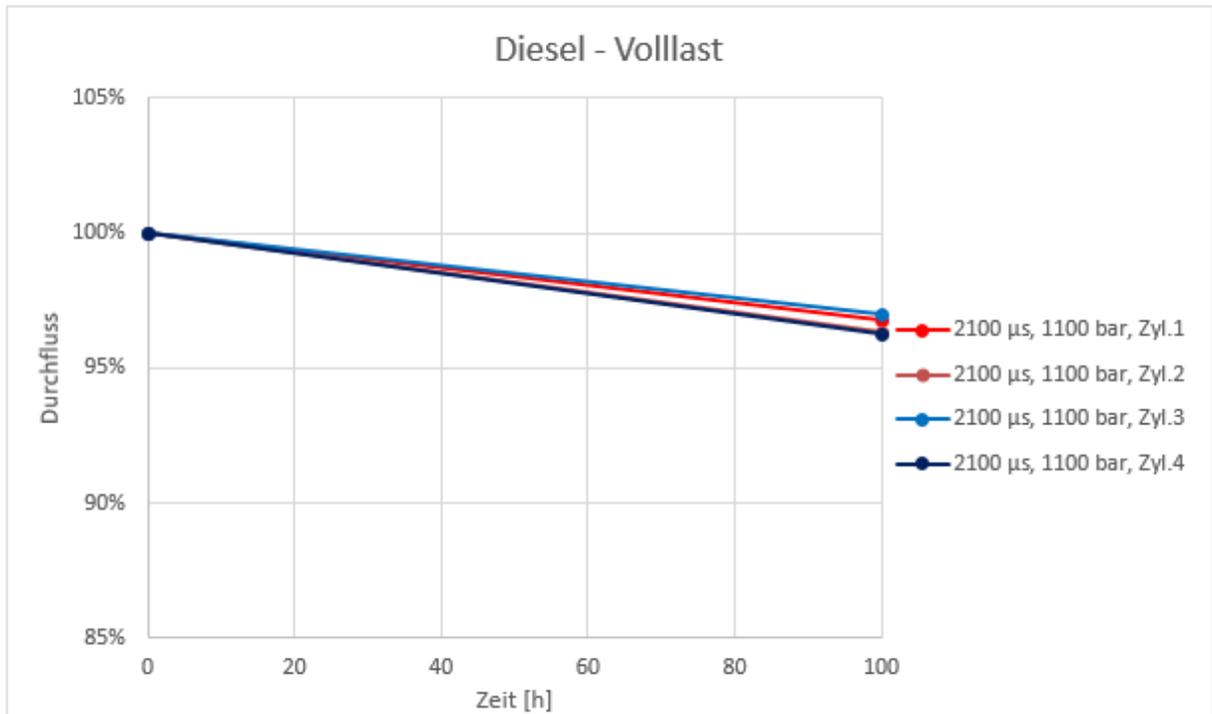


Abbildung 28: Durchflussmessung der Injektoren im Dieselbetrieb

Auch im Dieselbetrieb ist eine Durchflussabnahme der Düsen erkennbar. Eine Kühlung des Kraftstoffs könnte dadurch auch beim Betrieb des Vollmotors mit Dieselkraftstoff von Interesse sein.

### **Einfluss des Motorschmieröls**

Um den vermuteten Einfluss des Motoröls hinsichtlich der darin und in den Ablagerungen nachgewiesenen Elemente wie Kalzium und Zink zu untersuchen, wurde in einer weiteren Versuchsreihe ein Motorschmieröl mit verringerten Anteilen dieser Additive verwendet. Dazu wurden anfänglich Motorölproben des frischen Öls im Vergleich zu einem in den anderen Versuchen verwendeten herkömmlichem Schmieröl analysiert. Abbildung 29 zeigt, dass hier die Anteile Ca und Zn, welche in den Ablagerungen nachgewiesen wurden, bei diesem Motorschmieröl geringer sind.

ÖLZUSTAND				ÖLZUSTAND			
Viskosität bei 40°C	mm <sup>2</sup> /s		90.85	Viskosität bei 40°C	mm <sup>2</sup> /s		95.97
Viskosität bei 100°C	mm <sup>2</sup> /s		14.16	Viskosität bei 100°C	mm <sup>2</sup> /s		14.26
Viskositätsindex	-		161	Viskositätsindex	-		153
Oxidation	A/cm		1	Oxidation	A/cm		1
Nitration	A/cm		0	Nitration	A/cm		1
Sulfation	A/cm		0	Sulfation	A/cm		0
Schmutztragevermögen	%		100	Schmutztragevermögen	%		100
ADDITIVE				ADDITIVE			
Kalzium	Ca	mg/kg	2473	Kalzium	Ca	mg/kg	3674
Magnesium	Mg	mg/kg	11	Magnesium	Mg	mg/kg	11
Bor	B	mg/kg	3	Bor	B	mg/kg	14
Zink	Zn	mg/kg	820	Zink	Zn	mg/kg	1091
Phosphor	P	mg/kg	700	Phosphor	P	mg/kg	967
Barium	Ba	mg/kg	0	Barium	Ba	mg/kg	0
Molybdän	Mo	mg/kg	0	Molybdän	Mo	mg/kg	4
Schwefel	S	mg/kg	2292	Schwefel	S	mg/kg	4600

Abbildung 29: Motorölanalysen: links: Shell Rimula R6 LM 10W40 (verringerte Additive), rechts: Eurolub Formel 2 10W40 (Standardmotoröl)

Folgende Auswertung zeigt wieder den Einspritzdüsendurchfluss nach 100 Stunden Motorbetrieb im Volllastpunkt unter Verwendung des „reineren“ Motorschmieröls.

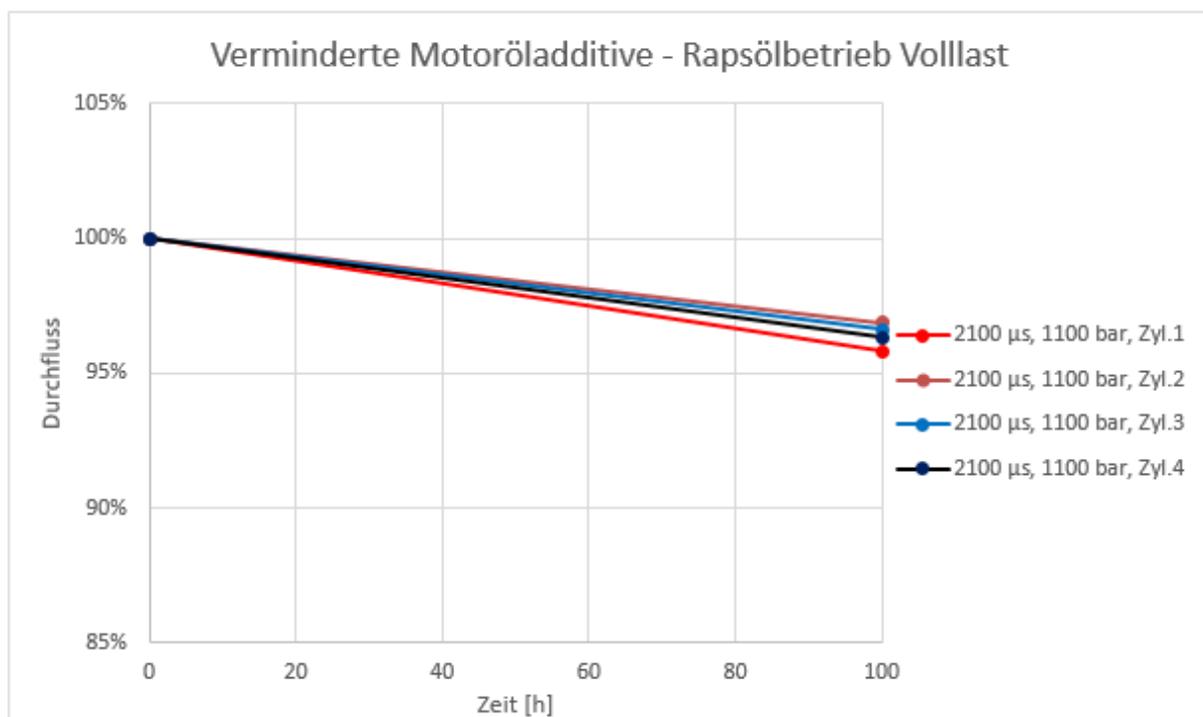


Abbildung 30: Durchflussmessung bei Einsatz von Motorschmieröl mit geringeren Anteilen an Ca und Zn

Durch den Einsatz des speziellen Motorschmieröls zeigt sich keine Änderung des Verhaltens bzgl. der Durchflussabnahme. Dadurch bestätigt sich die Theorie, dass die Ablagerungen nicht primär durch „Fremdbestandteile“ wie Aschebildner oder in Motorschmierölen vorhandenen Additiven hervorgerufen werden, sondern hauptsächlich der Kohlenwasserstoffstruktur des Kraftstoffs, vor allem bei kritischen Temperaturbereichen, geschuldet sind.

### Einfluss des Betriebspunktes

Eine weitere Untersuchung soll Aufschluss über eine Abhängigkeit der Ablagerungsbildung vom Betriebspunkt geben. Dazu wurde der Vollmotor bei 50 % Last betrieben (vergleiche auch II.1.7, Tabelle 10).

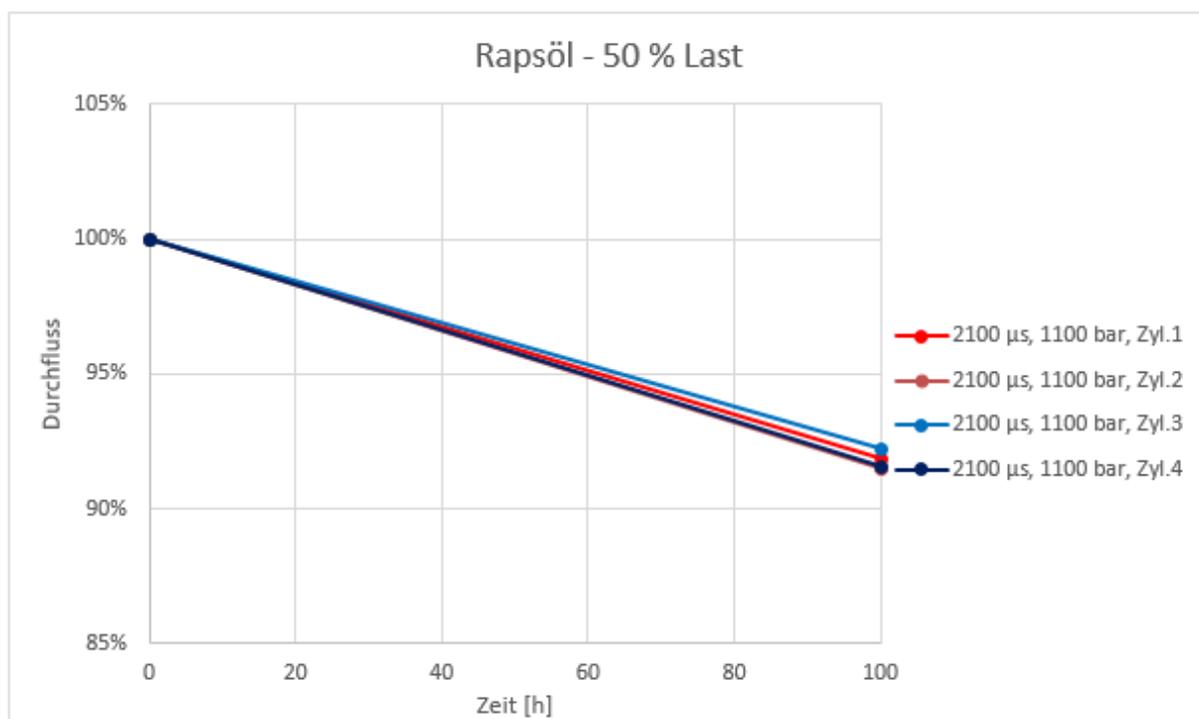


Abbildung 31: Durchflussmessung Rapsöl bei 50 % Last

Beim Motorbetrieb im geringeren Lastpunkt ist eine deutlich stärkere Durchflussabnahme im Vergleich zum Volllastpunkt zu verzeichnen. Zwar sind die Brennraumtemperaturen im Volllastbetrieb höher, wodurch auch die Düsenspitze höheren Temperaturen ausgesetzt ist, jedoch hat die Mehrmenge an eingespritztem Kraftstoff eine stärkere kühlende Wirkung, wodurch die Einspritzlöcher im Inneren stärker gekühlt werden. Zum anderen ist der Einspritzdruck im Volllastbetrieb höher, was kavitierende Effekte in den Düsenlöchern zur Folge hat, bei denen die Ablagerungen teilweise wieder abgetragen werden.

## Einfluss der Ablagerungsbildung durch Additivierung

Über Additivierung des Kraftstoffs lassen sich dessen chemische und physikalische Eigenschaften beeinflussen. In weiteren Versuchsreihen war das Ziel, dadurch wiederum die Ablagerungsbildung zu beeinflussen. Hierbei wurden zwei Strategien verfolgt. Zum einen sollte ein Additiv als „clean up“ Lösung dem Rapsölkraftstoff beigemischt werden, um die Leistungsbereitschaft bereits gealterter Düsen wieder zu erhöhen. In einer „keep clean“ Strategie war es das Ziel, durch den Additiveinsatz die Leistungsbereitschaft der Düsen von Beginn an aufrechtzuerhalten. Folgende Abbildung zeigt die Auswertung eines „clean up“ Versuches, bei welchem das Additiv für 50 Stunden unter Volllast im Einsatz war. Dabei wurden die gealterten Düsen aus dem Kühlversuch auf den Zylindern 1 und 3 verwendet. Auf den Zylindern 2 und 4 wurden neue Düsen eingesetzt. Folgendes wurde dazu unter Empfehlung des Projektpartners ERC Additiv GmbH dem Rapsölkraftstoff beigemischt: 500 mg/kg Detergent 1 plus 500 mg/kg Antioxidantienpaket (Additivbezeichnungen, siehe Tabelle 8). Um die Prüfstandergebnisse mit den Daten der Projektpartner vergleichen zu können, wurden gleiche Konzentrationen bzgl. der Beimischung verwendet.

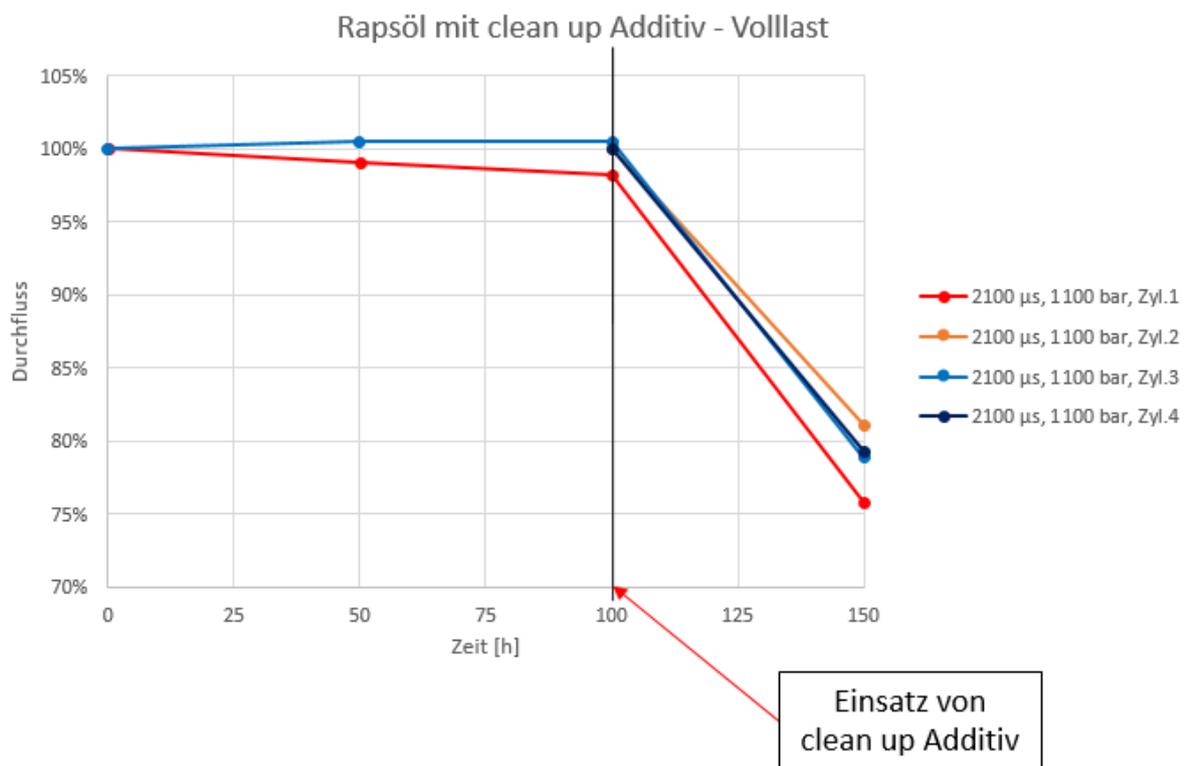


Abbildung 32: Durchflussmessung nach 50 h clean up Additiv bei Volllast

Es ist bei allen vier Düsen eine deutliche Abnahme des Durchflusses nach Einsatz des Additivs erkennbar. Während des Motorbetriebs war bereits auffällig, dass die Motorleistung phasenweise immer wieder „eingebrochen“ ist und der Betriebspunkt nicht dauerhaft stabil gehalten werden konnte. Ein möglicher Grund für eine derartige Leistungsabnahme

der Einspritzdüsen könnte sein, dass durch die Bestandteile im Additiv Stoffe aus den kraftstoffführenden Leitungen gelöst werden, welche die Düsenlöcher zusetzen. Sehr auffällig war das Ergebnis der Motorölprobe nach dem clean up Versuch.

VERUNREINIGUNG			
Silizium	Si	mg/kg	35
Kalium	K	mg/kg	0
Natrium	Na	mg/kg	5
Titan	Ti	mg/kg	1
Wasser	%		< 0.10
IR-Glykol	-		negativ
Pflanzenöl	%		> 20.00
Dieselmotorkraftstoff	%		< 0.3
Rußgehalt	%		2.3

Abbildung 33: Motorölanalyse nach 50 h clean up Additiv unter Vollast

Im Motorschmieröl war eine sehr hohe Konzentration an Pflanzenöl (> 20%) enthalten. Typischerweise werden in landwirtschaftlichen Maschinen Werte von < 5% beim Wartungsintervall nach 500 Betriebsstunden angestrebt. Hohe Pflanzenölanteile im Motoröl haben meist die Ursache falscher Werte bzgl. des Einspritztimings. Auch dieser Effekt würde hier erklären, dass das Additiv die chemischen Eigenschaften des Kraftstoffs so verändert hat, sodass die Öffnungs- und Schließzeiten sowie die Strahlgeometrie der Düsen negativ beeinflusst wurden. Eine Leistungsabnahme wurde auch im Praxiseinsatz (siehe II.1.7) des Projektpartners TFZ beim Einsatz dieses Additivs beobachtet. Um das Phänomen jedoch genauer beurteilen zu können, wurde der Versuch nochmal wiederholt. Einzige Änderung lag im Betriebspunkt. So wurden gleiche Additive im gleichen Mischungsverhältnis bei 50% Motorlast eingesetzt. Da das Additiv einen „clean up“ Effekt aufweisen soll, wurden dazu die gealterten Düsen aus dem vorangegangenen Versuch mit 50% Motorlast im Rapsölbetrieb verwendet.

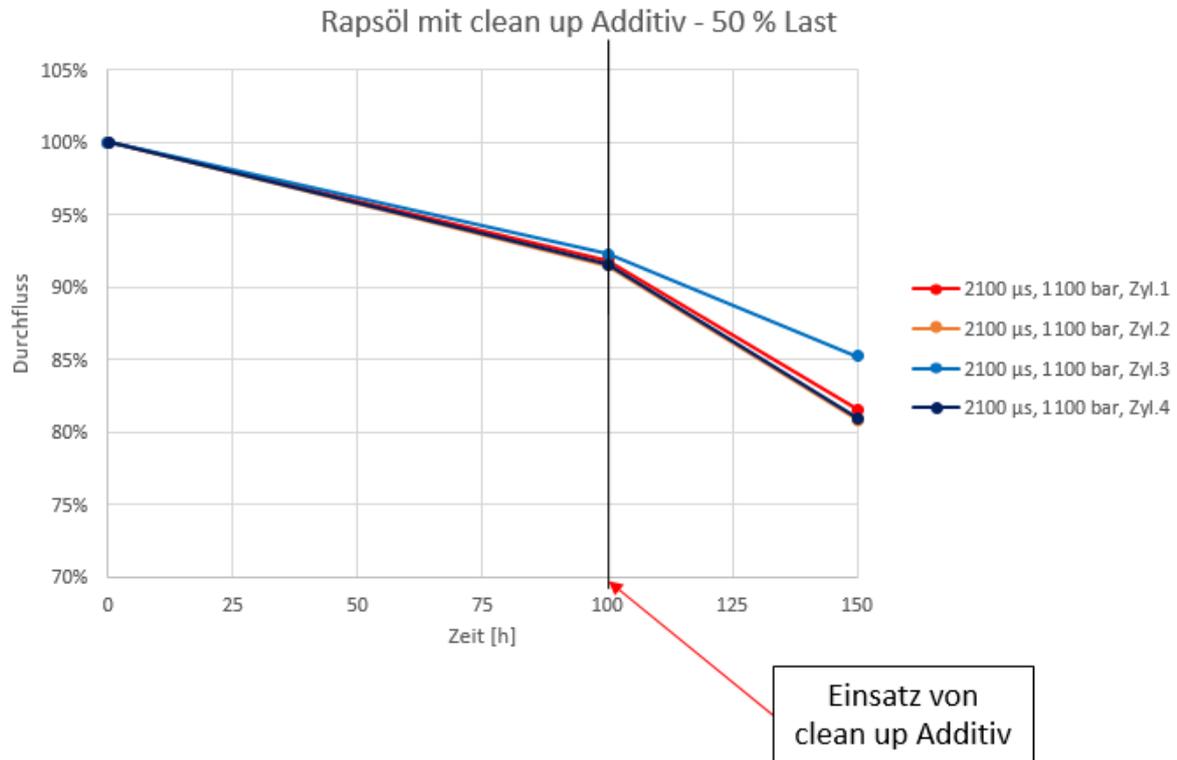


Abbildung 34: Durchflussmessung nach 50 h clean up Additiv bei 50 % Last

Auch im Teillastbereich liegt beim Einsatz des clean up Additivs eine deutlich stärkere Durchflussabnahme vor. In diesem geringeren Lastbereich ist zwar weniger Leistungsverlust der Düsen wie im Volllastbetrieb zu verzeichnen (Beim Motorbetrieb ohne Additiv war der Effekt umgekehrt), jedoch wirkt sich zusammengefasst das Additiv Detergent 1 als clean up Strategie am verwendeten Prüfmotor im Rapsölbetrieb eher negativ auf den Düsendurchfluss und damit verbunden auf die Ablagerungsbildung aus. Die Motorölanalyse aus dem Teillastbetrieb mit Additiveinsatz zeigt zwar auch einen erhöhten Pflanzenölanteil bezogen auf die Laufzeit von 50 Stunden, jedoch ist er deutlich geringer als im Volllastbetrieb, woraus sich schließen lässt, dass sich das Einspritzverhalten beim Additiveinsatz mit größerer Leistung negativer auswirkt.

VERUNREINIGUNG			
Silizium	Si	mg/kg	18
Kalium	K	mg/kg	0
Natrium	Na	mg/kg	0
Titan	Ti	mg/kg	1
Wasser	%		< 0.10
IR-Glykol	-		negativ
Pflanzenöl	%		3.70
Dieselmotortreibstoff	%		< 0.3
Rußgehalt	%		0.4

Abbildung 35: Motorölanalyse nach 50h clean up Additiv unter 50 % Last

Um den Einfluss der „keep clean“ Strategie zu untersuchen wurde unter Absprache mit der ERC Additiv GmbH das Additiv Detergent 2 zusammen mit dem Antioxidantienpaket eingesetzt, da die Wirkfähigkeit des eigentlich zur Kontrolle der inneren Ablagerungen entwickelten Additivs auch hier untersucht werden sollte. Zur Vergleichbarkeit wurden auch hier jeweils 500 mg/kg beigemischt. Das Ziel war es den Motor hierbei unter Volllast zu betreiben. Es zeigten sich jedoch schon kurz nach Versuchsbeginn ähnliche Phänomene wie im „clean up“ Versuch hinsichtlich eines unruhigen Motorlaufs mit starken Leistungsschwankungen. Dadurch konnte der Dauerlauf nicht wie geplant umgesetzt werden. Um trotzdem eine Aussage über das Additiv treffen zu können, konnte der Motor auf dem 50 % Lastpunkt weiterbetrieben werden. Es stellte sich folgendes Ergebnis dar.

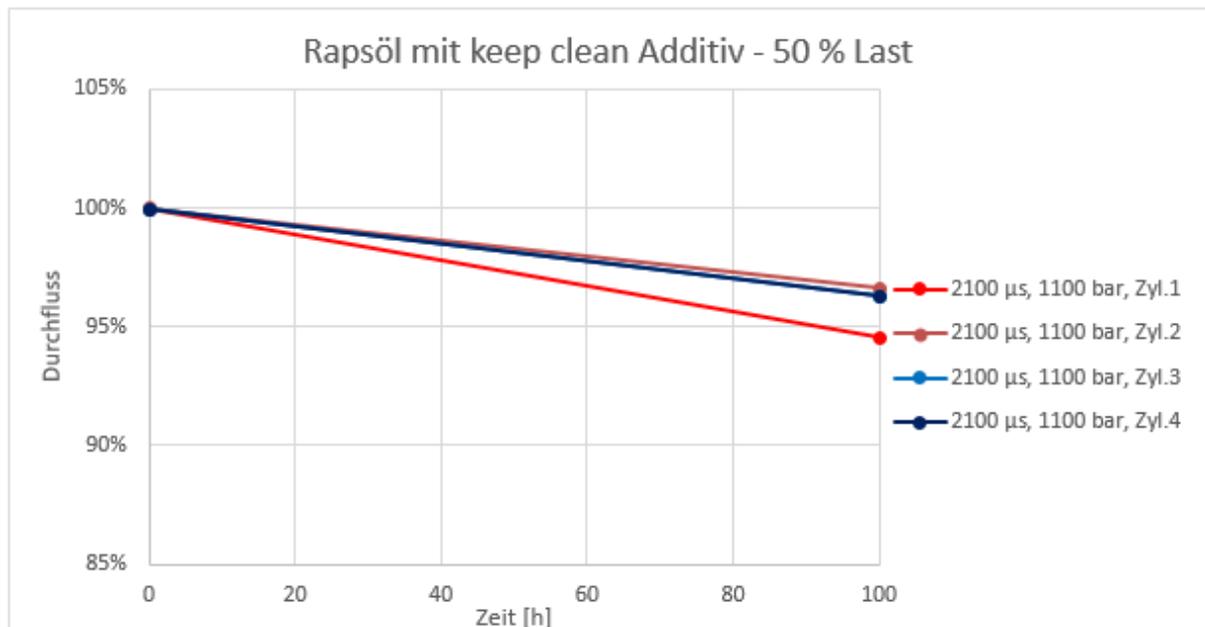


Abbildung 36: Durchflussmessung nach 100 h keep clean Additiv bei 50 % Last

Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Teillastbetrieb ohne Additiv (siehe Abbildung 31), so ist im Betrieb mit Additiv eine verminderte Durchflussabnahme erkennbar. Folglich zeigt im Gegensatz zum „clean up“ Detergent 1 - Additiv das vorliegende Detergent 2, zumindest im Teillastbetrieb, eine positive Wirkung.

### II.1.3.3 Konzepte gegen Ablagerungsbildung

Um wie in den Grundlagen erörtert den Kraftstoff als Ablagerungsvermeidungsstrategie effizient zu kühlen wurde zunächst ein Kraftstoffkühler entwickelt und aufgebaut, welcher den Kraftstoff in der Einspritzleitung direkt vor Eintritt in die Einspritzdüse abkühlt. Zum Einsatz kamen hier in einer ersten Entwicklungsphase Peltier-Elemente, mit denen es nach dem Peltier-Effekt mittels Stromfluss möglich ist, eine Temperaturdifferenz zu erzeugen, wodurch die Elemente auf einer Seite eine Absenkung und auf der anderen eine Erhöhung der Temperatur erfahren. Um die Wärme auf der „Heißseite“ abzuführen, sind weitere Kühlkörper angebracht, mit Hilfe derer die Wärme mittels Lüftern abgeführt wird. Dadurch arbeiten die Peltier-Elemente effizienter, wodurch niedrige Temperaturniveaus erreicht werden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen das zunächst als CAD - Modell entwickelte System sowie den tatsächlichen Aufbau am Prüfstand. Diese erste Entwicklung des Kühlers wurde ebenfalls zunächst am Einzylinder Prüfmotor durchgeführt, damit parallel zur Umrüstung des 4-Zyl.-Motors bereits erste Ergebnisse erzielt werden konnten.

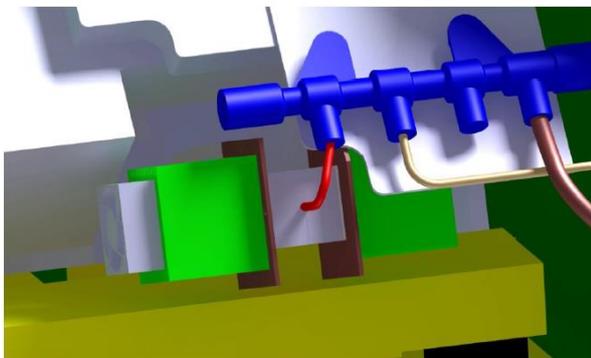


Abbildung 37: CAD - Modell des entwickelten Kraftstoffkühlers

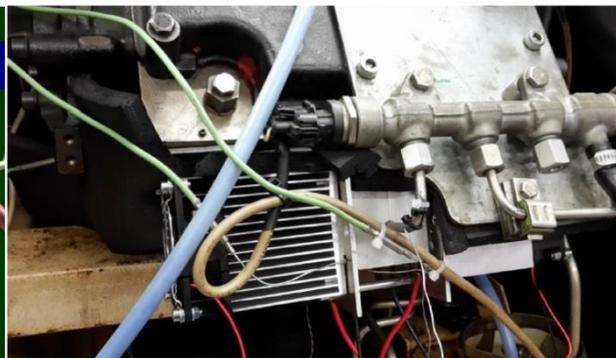


Abbildung 38: Aufbau des Kraftstoffkühlers am Prüfstand

Nun konnte die in den Grundlagenversuchen modifizierte Düse in Einklang mit dem Kraftstoffkühlsystem gebracht werden, um zu untersuchen, ob damit das Temperaturniveau an der Düsenspitze nahe der Einspritzlöcher gesenkt werden kann. Besteht hier ein Zusammenhang, können künftig Ablagerungen viel konkreter und fundierter mit kritischen Temperaturbereichen in Verbindung gebracht werden. Diese Temperaturabhängigkeit bei gekühltem im Vergleich zu ungekühltem Rapsölkraftstoff wird in den folgend beschriebenen Auswertungen der Prüfstandsversuche ersichtlich.

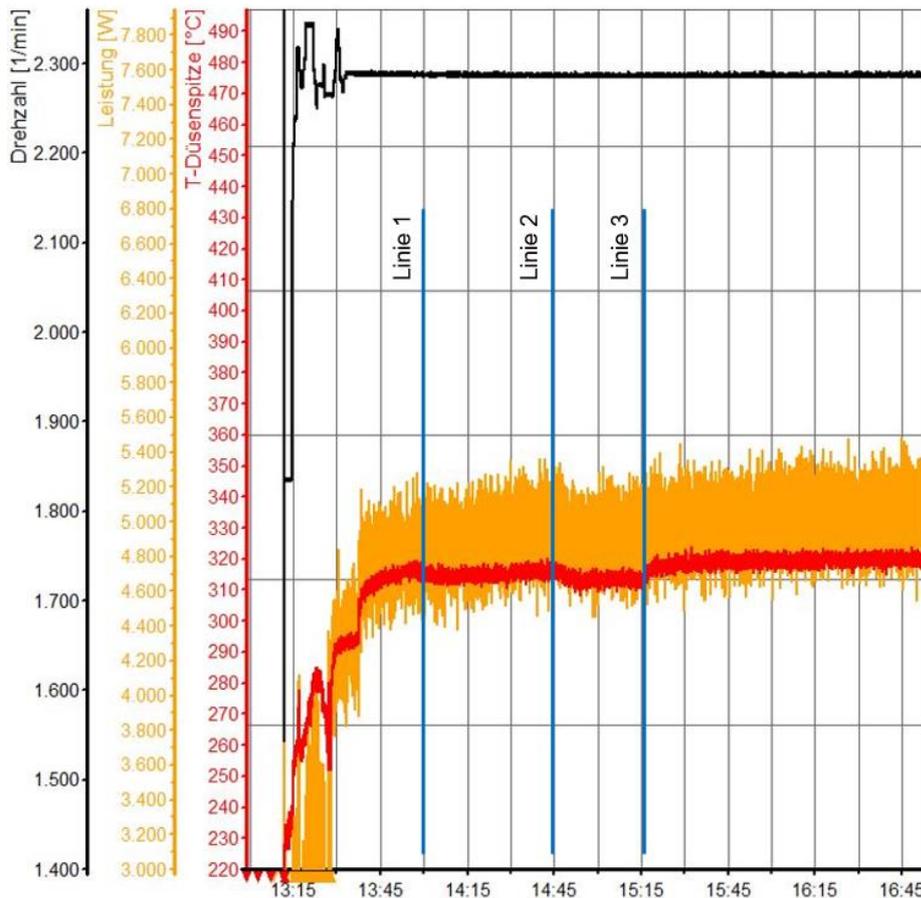


Abbildung 39: Auswertung Temperaturmessung an der Düsen Spitze mit gekühltem und ungekühltem Rapsölkraftstoff

Zunächst (links von Linie 1) erfolgte der Motorhoch- bzw. Warmlauf bis zum Erreichen des Motorvolllastpunktes bei maximaler Einspritzmenge von 30 mg pro Arbeitsspiel und einer Drehzahl von 2.270 U/min. In diesem Punkt erreicht der Motor seine Maximalleistung von ca. 5 kW. Ab der Linie 1 wurde das Kraftstoffkühlsystem aktiviert. Man erkennt einen leichten Temperaturabfall an der Düsen Spitze. Nach einer Verweilzeit in diesem Zustand wurden bis zur Linie 2 Optimierungen in der Einstellung des Kraftstoffkühlers vorgenommen. Dazu wurde die Leistung der Peltier-Elemente durch Einstellung von Spannung und Strom bis zum Optimum variiert. Zusätzlich konnte durch Einsatz eines weiteren externen Lüfters die Luftleistung und damit der Kühleffekt noch erhöht werden.

Dadurch war eine stärkere Absenkung der Temperatur an der Düsen Spitze zu verzeichnen. Ab dem Zeitpunkt an Linie 3 wurde das komplette Kühlsystem (Peltier-Elemente und Lüfter) abgeschaltet, wodurch das Temperaturniveau wieder gestiegen ist. Ein weiterer interessanter Aspekt ist die starke Abhängigkeit der Temperatur vom Betriebspunkt bzw. von der Leistung. Dies erkennt man beim Motorhochlauf links der Linie 1, wobei der Verlauf der Temperatur dem Leistungsverlauf „folgt“. In Abbildung 40 ist zudem der Temperaturverlauf der gekühlten Einspritzleitung ersichtlich.

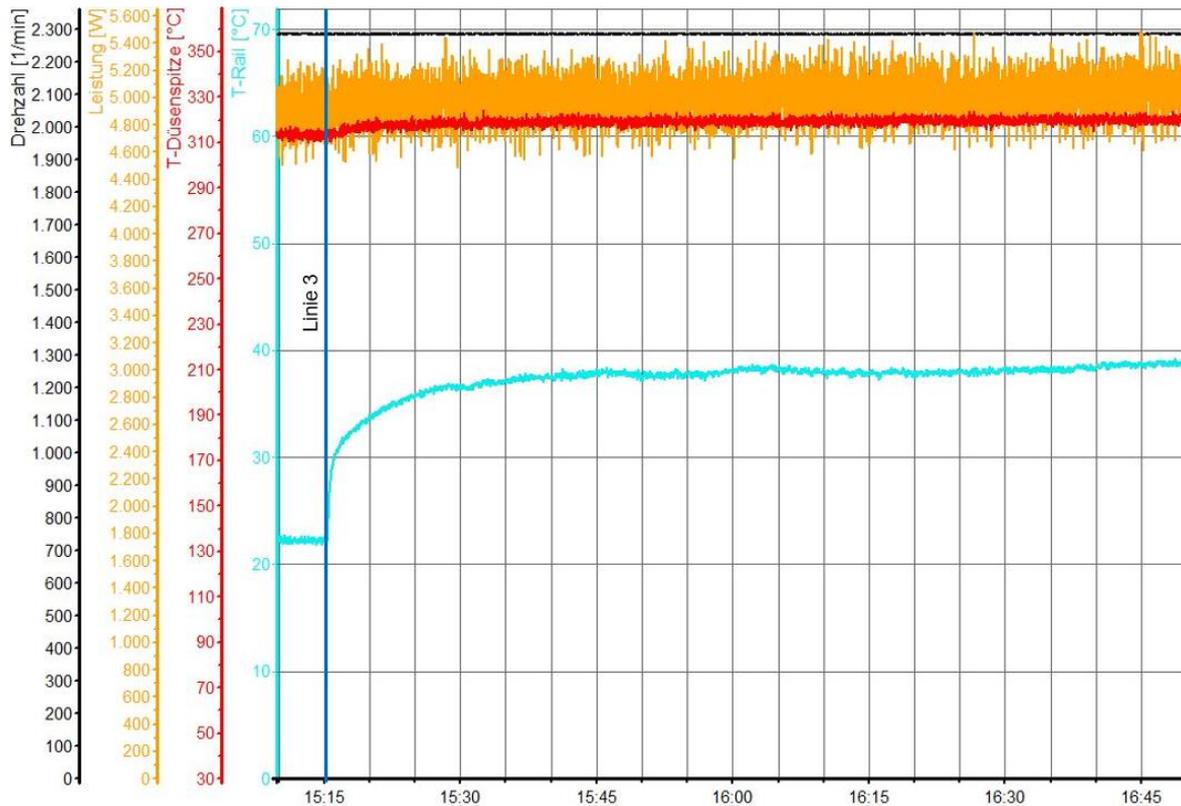


Abbildung 40: Temperaturverlauf der gekühlten Kraftstoffleitung

Um noch genaueren Aufschluss über das Temperaturverhalten an der Einspritzdüsen-  
spitze zu erhalten, wurde in einem weiteren Versuch der Motor bei analoger Drehzahl wie  
in den vorherigen Vollastversuchen im kalten Zustand (kein vorangegangener Motorbe-  
trieb) geschleppt, wobei keine Einspritzung von Kraftstoff und somit keine Verbrennung  
erfolgte. Es ist zu erkennen, dass sich dabei die Temperatur an der Düsen Spitze bei ca.  
183 °C eingestellt hat, während der Temperaturbereich der vorhergehenden Messungen  
beim Maximum von ca. 320 °C lag.

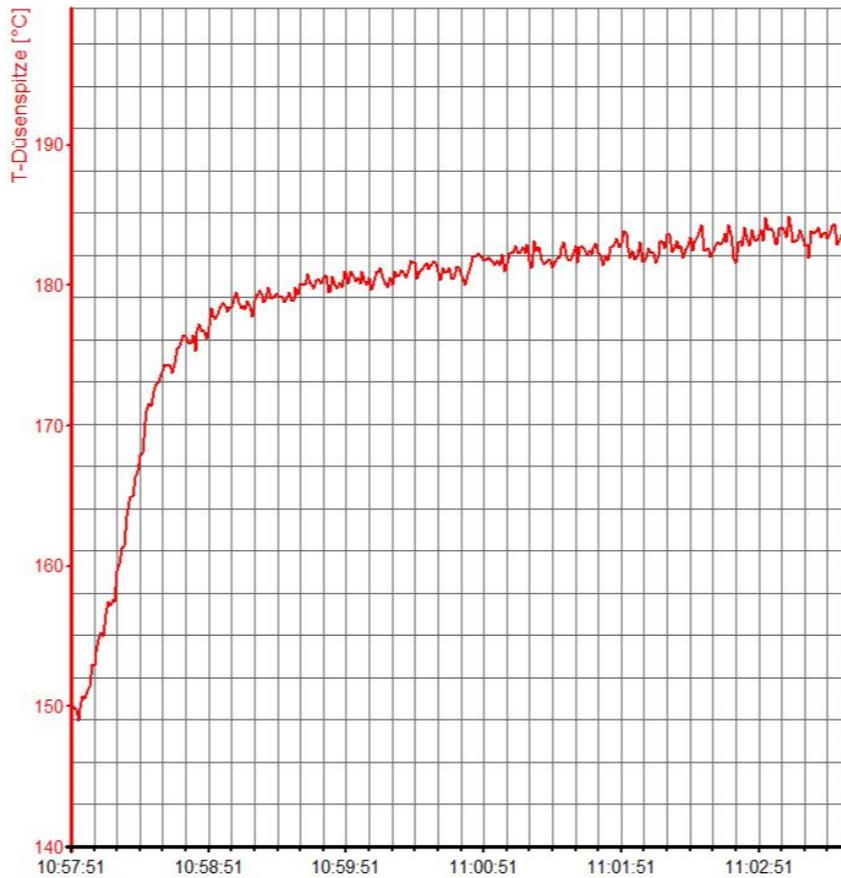


Abbildung 41: Ausschnitt Auswertung Schleppversuch

In einem abschließenden Versuch wurde das Thermoelement von der Spitze gelöst, so dass die Temperatur nahe dieser ohne direkte Anlage gemessen werden konnte.



Abbildung 42: Auswertung mit Temperaturmessung ohne direkten Kontakt des Thermoelements

An der gemessenen Temperatur von ca. 370 °C, welche sich nach einer gewissen Laufzeit eingestellt hat wird ersichtlich, dass der Kraftstoff eine kühlende Wirkung auf die Düsen Spitze nahe der Einspritzlöcher hat, da die Temperatur in den vorherigen Versuchen mit direkter Anlage des Thermoelements geringer gehalten werden konnte. Deshalb kann durch weitere Absenkung des Temperaturniveaus durch zusätzliche effektive Kühlung des Kraftstoffs dieser Effekt im Sinne der Ablagerungsvermeidung verstärkt werden.

Diese erarbeiteten Ergebnisse geben Aufschluss über die vorherrschenden Temperaturbereiche an der Düsen Spitze nahe den Einspritzlöchern. Zusammen mit den bereits im Vorprojekt ABM erarbeiteten, für eine Ablagerungsbildung kritischen Temperaturbereichen (siehe Abbildung 5), können so Maßnahmen getroffen werden, mit Hilfe derer diese Bereiche geringgehalten bzw. vermieden werden können. Denkbar wäre hier zusätzlich zur Kühlung des Kraftstoffes beispielsweise die Vermeidung von entsprechend kritischen Betriebspunkten.

Für den Einsatz am Vollmotor wurde das Kraftstoffkühlsystem, vor allem hinsichtlich anderer Platzverhältnisse und Umgebungsbedingungen, überarbeitet. Dazu wurden für eine direkte Vergleichbarkeit zwei Düsen gekühlt und zwei original belassen (Auswertungen der Kühlversuche, siehe II.1.3.2 unter „Kraftstoffkühlung am Vollmotor“). Zur Kühlung wurde eine Flüssigkeitskühlung im Gegenstromprinzip verwendet indem über den Hochdruck-Einspritzleitungen Rohre aus Edelstahl angebracht wurden, welche jeweils mit einem Ein- und Auslass für ein Kühlmedium ausgestattet sind (siehe Abbildung 43).

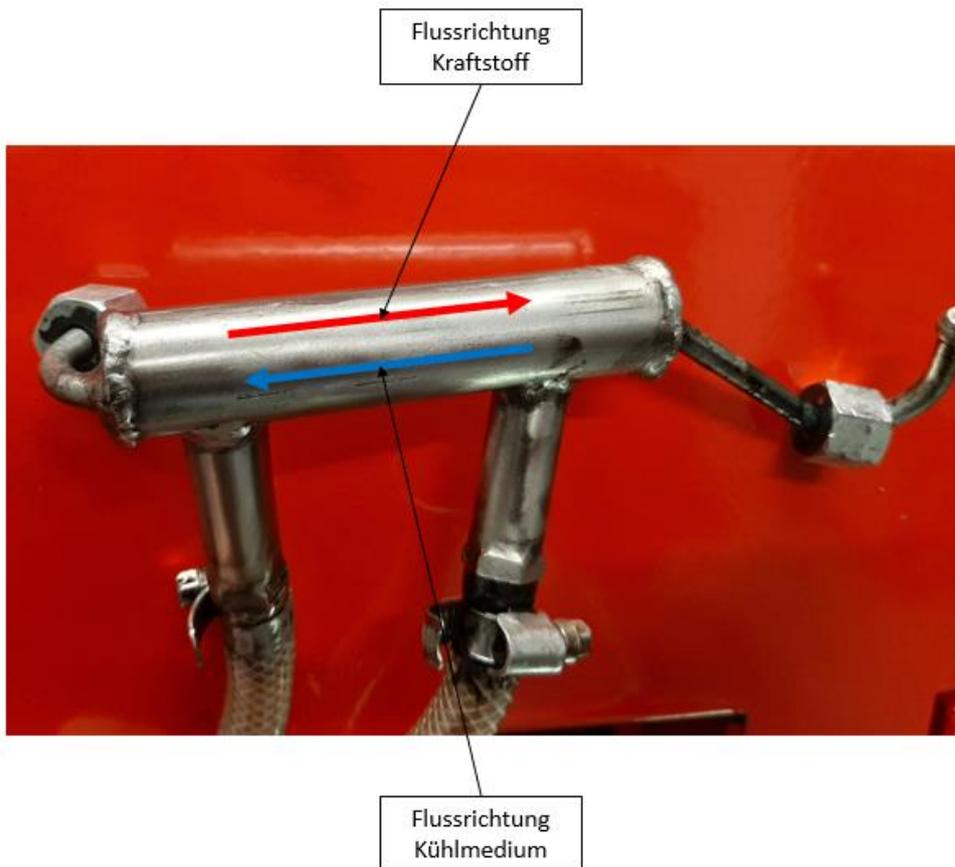


Abbildung 43: Gegenstrom Kraftstoffkühler zur Kühlung der Einspritzleitung

Als Kühlmedium dient Wasser, das in einem Durchlaufkühler (siehe Abbildung 44) auf 3-4 °C rückgekühlt wird. Dadurch konnte im Vollastbetrieb die Kraftstofftemperatur (gemessen mit Hilfe eines Anlegefühlers auf der Kraftstoffleitung) um 10 Kelvin abgesenkt werden, wodurch es möglich war, den Durchfluss der entsprechenden Einspritzdüse konstant zu halten (siehe Abbildung 21 in den Grundlagenversuchen).



Abbildung 44: Durchlaufkühler zur Kraftstoffkühlung

Nach Auswertung der Grundlagenversuche zeigte neben der Kühlung des Kraftstoffes der Einsatz eines „keep clean“ Additivs (Detergent 2) im Teillastbereich eine positive Wirkung. Der Durchfluss konnte zwar im Vergleich zur Kühlung nicht konstant gehalten werden, jedoch zeigte sich eine Verbesserung im Vergleich zum selben Betriebspunkt ohne Additiv. Da es im Volllastbetrieb jedoch zu Leistungsschwankungen während des Motorbetriebs kam, ist der Einsatz des Additivs fragwürdig.

Da zudem eine starke Abhängigkeit vom Betriebspunkt beobachtet wurde, wäre zusätzlich zur vorliegenden Entwicklung der Kraftstoffkühlung die Vermeidung kritischer Betriebspunkte durch intelligente Anpassung der Motorsoftware denkbar. Beispielsweise könnten auch im Teillastbereich höhere Einspritzdrücke realisiert werden, um die Düsenlöcher „frei“ zu halten und sie durch die Mehrmenge an Kraftstoff stärker zu kühlen.

## II.1.4 Äußere und innere Ablagerungen: Wirkfähigkeit von Reinigungsadditiven für den Einsatz von Pflanzenöl (AP 3; ERC Additiv GmbH)

### II.1.4.1 Experimentelle Bestimmung der physikochemischen Eigenschaften von alternativen Kraftstoffen (OMEx)

Die Aufgabe der Firma ERC Additiv GmbH als Additivhersteller innerhalb des Projektes bestand daran anhand der Erfahrungen aus dem Kraftfahrzeugsektor (PKW und LKW) potenzielle Additive zu auswählen, bereitzustellen und anhand der Ergebnisse auf den Pflanzenöleinsatz angepasste Additive zu entwickeln. Dafür wurde im Projekt eine Kraftstoffmatrix definiert, in der die zu untersuchenden Kraftstoffe aufgeführt sind und nach Prioritäten sortiert. Tabelle 3 zeigt die vorerst festgelegten erneuerbaren Kraftstoffe: Pflanzenöl (gesonderte Stellung hat dabei Rapsölkraftstoff), HVO (Hydrogenated vegetable oils), Fatty Acid Methyl Ester (FAME, Biodiesel), (gesondert soll Used Cooking Oil Methyl Ester UCOME betrachtet werden), Mischungen des konventionellen Diesels mit FAME und Pflanzenölkraftstoff, Oximethylenether (OMEx). Die Projektpartner haben aufgrund der Vorarbeiten bereits Zugriff auf den Großteil der physikochemischen Eigenschaften der aufgeführten Kraftstoffe.

Tabelle 3: Matrix der zu untersuchenden Kraftstoffe

<b>Kraftstofftyp</b>	<b>Kraftstoff / Normen / Mischungen</b>	<b>Verfügbarkeit Daten zu den Eigenschaften des Kraftstoffes</b>
<i>Pflanzenöl</i>	Rapsöl (gemäß DIN 51605)	Verfügbar
	Sonnenblumenöl oder anderes Pflanzenöl (DIN 51623)	Verfügbar
<i>Gemisch aus Tankstellendiesel</i>	... mit 30% bzw. 70 % Pflanzenöl	Verfügbar
	... mit 70 % RME / und 30 % SME	Verfügbar
<i>HVO</i>	gemäß EN 15490	Verfügbar
<i>Referenzdiesel (ohne FAME)</i>		Verfügbar
<i>Diesel (ohne Bioanteil)</i>		Verfügbar
<i>Diesel EN 590 ohne Performance-Additive (ggf. bis 7% FAME)</i>	EN 590 Tankstellendiesel	Verfügbar
<i>OMEx</i>		Werden vermessen (ERC)
<i>FAME</i>	Biodiesel gemäß EN 14214	Verfügbar
	UCOME	verfügbar

Die physikochemischen Eigenschaften des OME<sub>x</sub> sind z. Z. begrenzt verfügbar. Daher wurden bei der ERC Additiv GmbH Messungen durchgeführt, die die Datenbank und das Verständnis der Thematik „OMEx“ erweitern. Die Eigenschaften der OME<sub>3-5</sub> Fraktion, die z.Z. als vielversprechender Ersatz / Drop-on fuel für Dieselkraftstoff angesehen wird, wurden seitens ERC bereits im Rahmen des Kopernikus Power-to-X Projektes ausführlich untersucht. Daher wurde im Rahmen des Projektes SAVEbio der Fokus auf Einzelsubstanzen OME<sub>1</sub> bis OME<sub>5</sub> gelegt. Als Prüfparameter wurden die ausgewählten, normrelevanten (DIN EN 590) Eigenschaften getestet: Dichten, Viskositäten, Flammpunkt, CFPP, Cetanzahl und Schmierfähigkeit.

In der Tabelle 4 sind exemplarisch die Daten zusammengestellt (Messdaten und Literaturrecherche).

Im Laufe des Projektes wurde aufgrund der begrenzten Prüfstandkapazitäten OME<sub>x</sub> aus der Testmatrix rausgenommen.

Tabelle 4: Physikochemische Eigenschaften der OME<sub>3-5</sub> Fraktion und der Einzelsubstanzen OME<sub>1</sub> bis OME<sub>5</sub>

OME <sub>x</sub> mit x =	Dichte (15°C) / kg/m <sup>3</sup> (DIN EN ISO 12185)	Viskosität (40°C) / mm <sup>2</sup> /s (DIN EN ISO 3104)	Flammpunkt/ °C (DIN EN ISO 2719)	Schmierfähigkeit / µm (DIN EN ISO 12156-1)	Cetanzahl / - (DIN 51773)	CFPP / °C (DIN EN 116)
1	866	0,36877 (20°C)*	-32		50	<-54
2	975	0,56609	15			<-54
3	1034	0,86583	54		124	-54
4	1078	1,33225	88		148	-11
5	1110	2,00071	118		180	9
<b>3-6 Mix (Charge 1) RWTH</b>	1057	1,188	61,6	487	145,5	-18
<b>3-6 Mix (Charge 2) ASG</b>				736		-52

#### II.1.4.2 Untersuchungen zum Kältefließverhalten von Pflanzenölen und FAME

Die Standardmethoden zur Bestimmung der Filtrierbarkeitsgrenze (CFPP), des Cloud Points oder Pourpoints haben sich als nicht geeignet erwiesen: aufgrund der hohen Viskosität der Pflanzenöle ist das Filtrieren bereits bei Raumtemperatur unmöglich.

Das Kälteverhalten der bereitgestellten Pflanzenöle wurde bei ERC rheologisch untersucht (Kooperation mit FVTR GmbH). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 dargestellt. Demnach wird das Kaltstartverhalten durch den Additivzusatz nicht verbessert. Bei der Untersuchung handelt es sich um die Messung des Index zur Beschreibung des V-T-Verhaltens. Für das Pflanzenöl ohne und mit Additiv wurde ein Wert von 7P26 ermittelt.

Bedeutung 7P26: Bei 7°C erreicht das Pflanzenöl eine kinematische Viskosität von 150 mm<sup>2</sup>/s. Eine kinematische Viskosität von 26 mm<sup>2</sup>/s wird bei 50°C erreicht.

Tabelle 5: Index zur Beschreibung des V-T-Verhaltens von Pflanzenölkraftstoff

Produktbeschreibung	Viskosität 50°C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskosität 10°C [mm <sup>2</sup> /s]	Viskosität 0°C [mm <sup>2</sup> /s]	Index zur Beschreibung des
Pflanzenöl	25,692	127,36	218,65	7P26
Pflanzenöl + 10.000 mg/kg CFI	25,650	126,52	221,59	7P26

Aufgrund des möglichen FAME-Einsatzes als Zweitkraftstoff (und auch als mögliche Reinigungsstrategie) wurde auch das Kälteverhalten des FAME untersucht. Abbildung 45 zeigt die CFPP-Werte verschiedener FAME-Sorten (RapsöIME, SoyaöIME und UCOME (Used Cooking Oil Methyl Ester) mit und ohne Kältefließverbesserer (Cold Flow Improver (CFI): Additiv 1 und 2): das Additiv 2 zeigt demnach eine bessere Performance für UCOME und SME als Additiv 1.

ERC beobachtet den Markt der CFI und testet die neuen Produkte auch in Hinsicht auf ihre mögliche Wirksamkeit für die Pflanzenöle: so, die vielversprechende CFI für FAME können auch als Kältefließverbesserer in den Pflanzenölen eingesetzt werden (ggf. je nach Ursprung der Öle).

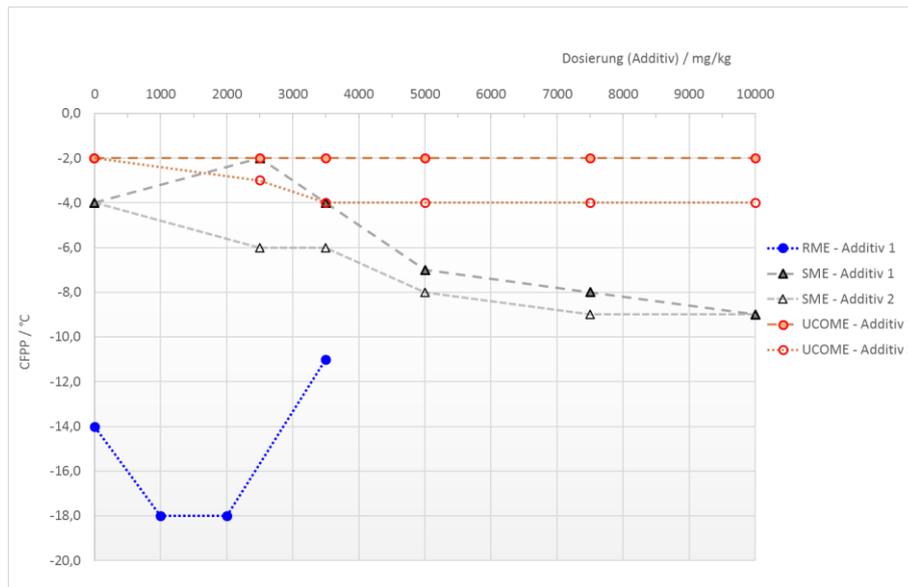


Abbildung 45: CFPP-Werte verschiedener Öle in Abhängigkeit von der Konzentration der eingesetzten Additive (CFI)

#### II.1.4.3 Löslichkeit der Additive in FAME und in Rapsöl

ERC GmbH stellt im Rahmen des Projektes verschiedene Additive zur Verfügung. Basierend auf der Literaturrecherche und eigenen Erfahrungen auf dem Gebiet der Additivierung wurde der Einsatz der Antioxidantien (als Präventive Maßnahme) und Detergentien als sinnvolle Strategie zur Ablagerungsminderung identifiziert. Die Auswahl der Additive erforderte als Erstes die Überprüfung deren Löslichkeit im Pflanzenöl. Die Löslichkeit wurde untersucht bei Raumtemperatur und bei stark erhöhten Konzentrationen.

Des Weiteren ist der Einsatz von FAME (Fatty Acid Methyl Ester = Biodiesel) zur Reinigung der Injektoren bekannt: Reinigende Wirkung des FAME wurde im Projekt „Kraftstoffveränderungen II“ gezeigt. Daher wurden auch die Löslichkeiten der Additive in FAME und die FAME-Löslichkeit im Rapsöl geprüft.

Auswirkungen auf die Motorleistung lassen die „externe“ Ablagerungen vermuten (im Gegensatz zu IDID (internal Diesel Injector Deposits)).

Daher wurden bei der Additivauswahl nicht nur moderne Additivtechnologien betrachtet (so genannten DW10-Detergentien, die als besonders wirksam gegen IDID sein sollen), sondern auch die Reinigungsadditive der „Vorgeneration“, die teilweise als XUD 9 -Detergentien bezeichnet werden.

Die Ergebnisse der Löslichkeitsversuche sind in Tabelle 6 dargestellt: alle Additive sind sowohl in FAME als auch im Rapsöl löslich. Alle Additive wurden für den Versuch extrem überdosiert.

Alle im Projekt eingesetzten Rapsölproben wurden von TFZ zur Verfügung gestellt.

Tabelle 6: Löslichkeit der Additive (Detergents und Antioxidantien) in FAME und Pflanzenöl

Löslichkeit im Rapsöl		
Name	Ergebnis	Konzentration / %
Detergent DW10 Technologie 1	löslich	3,3
Detergent DW10 Technologie 2	löslich	3,3
Detergent XUD 9 Technologie 1	löslich	3,3
Detergent XUD 9 Technologie 2	löslich	3,3
Guard 1220+ (31-4509) – Kombination aus Antioxidantien und Metalldeaktivatoren + Metallpassivatoren	löslich	3,3
FAME	löslich	40
Löslichkeit in FAME		
Guard 1220+ (31-4509) – Kombination aus Antioxidantien und Metalldeaktivatoren + Metallpassivatoren	löslich	2,5
Detergent DW10 Technologie 1	löslich	2,5
Detergent DW10 Technologie 2	löslich	2,5
Detergent XUD 9 Technologie 1	löslich	2,5
Detergent XUD 9 Technologie 2	löslich	2,5

#### II.1.4.4 Auswirkungen der Alterungsprozesse auf physikochemischen Eigenschaften der Pflanzenöle

Vermehrte Ablagerungsbildung und somit die im Pflanzenölbetrieb festgestellte Leistungsminderung hängt auch mit der Veränderung der Oxidationsstabilität des Kraftstoffes bei der Lagerung im Fahrzeugtank während der Testperiode. Die Verminderung der Oxidationsstabilität wurde sowohl bei der Beprobung des Fahrzeugtanks als auch über die Lagerungsdauer im Kraftstofflager festgestellt (TFZ).

Die Alterungsprozesse tragen zur Veränderung der physikochemischen Eigenschaften der Pflanzenöle, wie z.B. Dichte und Viskosität bei. Insbesondere die letzte kann sich sehr stark auf das Einspritzverhalten der Injektoren auswirken.

Aus diesem Grund wurde forcierte Alterung des Pflanzenölkraftstoffes durchgeführt: die Rapsölproben mit und ohne Additive wurden bei 160°C über 4 Tage im Ofen gelagert. Anschließend wurden Dichte und Viskositäten des Rapsöls vermessen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt: wie man sieht, steigen die Dichte und die Viskosität des Rapsölkraftstoffes durch die Alterung an, allerdings sind die additivierten Proben weniger beeinträchtigt und zeigen den geringeren Anstieg der beiden Parameter Dichte und Viskosität.

Tabelle 7: *Eigenschaften des Rapsölkraftstoffes nach Alterung*

	Rapsöl frisch	Rapsöl gealtert (blank)	Rapsöl gealtert (mit Additiv Guard 1220+)
Dichte / g/cm <sup>3</sup>	0,920	0,929	0,924
Viskosität (20°C) / mm <sup>2</sup> /s	77	130	94
Viskosität (40°C) / mm <sup>2</sup> /s	35	54	42

Des Weiteren wurde bei der Lagerung die Entstehung des Polymerfilmes auf der Oberfläche des Reagenzglases festgestellt (s. weißer Pfeil in Abbildung 46): sollte ein solches Phänomen auch im Fahrzeugtank oder im Einspritzsystem auftauchen, kann dies viele Folgeschäden verursachen, von Filterverstopfung bis zum Ausfall der Injektoren.

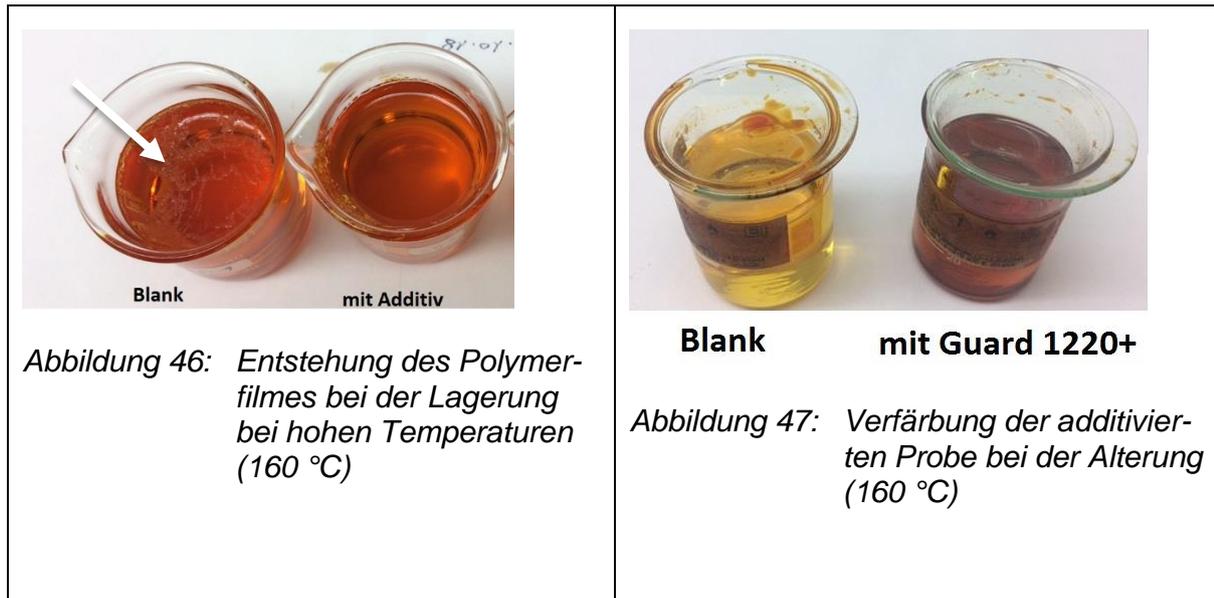
Im Laufe der Alterungsversuche wurde ein aus den FAME-Alterungsversuchen bekanntes Phänomen beobachtet: ausgesetzt den hohen Temperaturen, werden die Proben mit Antioxidantien zunächst dunkler als additivfreie Proben, im weiteren Verlauf der Lagerung ändert sich das aber wieder. Dies wird daran begründet, dass die Antioxidantien entsprechend ihrer Rolle als Erstes oxidieren und deren Produkte für dunkle Verfärbung sorgen (s. Abbildung 47).

Im Rahmen des Projektes 3 Additive für Biokraftstoffe wurden getestet:

- Guard 1220+
- OX 1220 Biofuel
- ein Additiv des Wettbewerbers.

Für die Motoren- und Prüfstandsversuche wurde das Additiv „OX1220 Biofuel“ ausgewählt und den Projektpartner zur Verfügung gestellt. Die Auswahl erfolgte aus folgenden Gründen:

- im Gegensatz zum Wettbewerberprodukt ist die Zusammensetzung bekannt.
- OX1220 Biofuel enthält nur Antioxidantien, während Guard 1220+ zusätzlich noch Buntmetallkorrosionsinhibitoren beinhaltet
- Wirksamkeit aller 3 Produkte war vergleichbar



#### II.1.4.5 Bereitstellung von Additiven für Untersuchungen der Projektpartner

Die Firma ERC Additiv GmbH stellte diverse Additive für die Motoren- und Prüfstandsversuche in den notwendigen Mengen zur Verfügung. Folgende Additive wurden jeweils an OWI, regineering und TFZ verschickt (Tabelle 8).

*Tabelle 8: Übersicht der im SAVEbio-Projekt eingesetzten Additive*

Bezeichnung im Text	Chemische Bezeichnung	Funktion
Detergent 1	PIBSI	XUD-9 Detergent (Kontrolle der externen Ablagerungen)
Detergent 2	DCA neuer Generation (Typ 1)	DW10 Detergent (Typ 1) (Kontrolle der internen Ablagerungen)
(wurde nicht verwendet)	DCA neuer Generation (Typ 2)	DW10 Detergent (Typ 2) (Kontrolle der internen Ablagerungen)
Antioxidantienpaket	„OX 1220 Biofuel“ - Kombination der Antioxidantien im Lösungsmittel	Erhöhung der Oxidationsstabilität

Die Durchführung der Motor- und Prüfstandsversuche wurde zwischen den Partner so abgestimmt, dass nach Möglichkeit die gleichen Additive oder Additivkombinationen eingesetzt wurden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

**II.1.4.6 Sicherheitsrelevante Informationen zu den Additiven**

Da der Einsatz der Pflanzenkraftstoffe in den landwirtschaftlichen und/oder ökologisch sensiblen Gebieten sinnvoll ist, sollten auch die Additive möglichst umwelt- und gesundheitsunschädlich sein.

Eine Aussage über das Gefährdungspotential von chemischen Stoffen und Gemischen auf Umwelt und Gesundheit geben die Gefahren und Sicherheitshinweise (H- und P-Sätze aus engl. hazard und precautionary), die im Rahmen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) verwendet werden.

Die Tabelle 9 gibt die Übersicht der Gefahrenhinweise für die im Rahmen des Vorhabens eingesetzten Additive. Wie man erkennt, wird die Kennzeichnung mit den H-Sätzen meistens durch das Lösungsmittel ausgelöst. Dies liegt daran begründet, dass als Detergentien die kennzeichnungsfreien Polymere eingesetzt werden. Nur bei den Antioxidantien werden beispielweise H361 und H410 durch die Wirkstoffe selbst ausgelöst. Würde man als Lösungsmittel z.B. den FAME (nach CLP-Verordnung kennzeichnungsfrei) einsetzen, würden viele Kennzeichnungen des Additivs entfallen.

*Tabelle 9: Übersicht der H-Sätze der eingesetzten Additive*

Additiv	H-Sätze	H-Sätze bedingt durch Lösungsmittel
XUD-9 Detergent	H226: Flüssigkeit und Dampf entzündbar. H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen. H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen.  H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	H226: Flüssigkeit und Dampf entzündbar. H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen. H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen.  H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.
DW10 Detergent (Typ 1)	H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.  H315: Verursacht Hautreizungen.  H319: Verursacht schwere Augenreizung.  H335: Kann die Atemwege reizen.  H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.  H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen.  H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.  H315: Verursacht Hautreizungen.  H319: Verursacht schwere Augenreizung.  H335: Kann die Atemwege reizen.  H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.  H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen.  H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.

DW10 Detergent (Typ 2)	<p>H226 Flüssigkeit und Dampf entzündbar.</p> <p>H319 Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H315 Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H332 Gesundheitsschädlich bei Einatmen.</p> <p>H335 Kann die Atemwege reizen.</p> <p>H412 Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.</p>	<p>H226 Flüssigkeit und Dampf entzündbar.</p> <p>H319 Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H315 Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H332 Gesundheitsschädlich bei Einatmen.</p> <p>H335 Kann die Atemwege reizen.</p> <p>H412 Schädlich für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.</p>
OX 1220 Biofuel" - Kombination der Antioxidantien im Lösungsmittel	<p>H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.</p> <p>H315: Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H319: Verursacht schwere Augenreizung.</p> <p>H361: Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen oder das Kind im Mutterleib schädigen.</p> <p>H410: Sehr giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung</p>	<p>H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.</p> <p>H315: Verursacht Hautreizungen.</p> <p>H319: Verursacht schwere Augenreizung.</p>
FAME	keine	keine

## **II.1.5 Innere Ablagerungen: Injektoralterung und Vermeidungsstrategien am Injektorablagerungsprüfstand (AP 4; OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH)**

### **II.1.5.1 Prüfstandskonzept und -aufbau**

Die Untersuchungen am OWI werden an einem nicht-motorischen Injektorprüfstand durchgeführt, dessen Konzept auf Erfahrungen aus dem ENIAK-Projekt beruht. Der ENIAK-Prüfstand wurde zur Untersuchung von Ablagerungsbildungsprozessen in PKW-Dieselinjektoren entwickelt.

Das grundlegende Konzept des Prüfstands ist es, ein vollständiges Common-Rail-System abzubilden, den eingespritzten Kraftstoff zu sammeln und im Kreis zu fahren. Hierdurch reduzieren sich die Anforderungen an die Laborinfrastruktur deutlich, da kein Motor und entsprechend notwendige Nebenaggregate betrieben werden müssen. Zudem können Einspritzbedingungen eingestellt werden, die im motorischen Betrieb nicht realisierbar sind, zum Beispiel eine geringe Einspritzfrequenz bei hohem Raildruck. Dadurch können betriebsbedingte Einflüsse einzelner Parameter auf die Injektorablagerungsbildung unabhängig voneinander untersucht werden. Der Fokus liegt auf internen Ablagerungen; externe Ablagerungen treten aber ebenfalls auf. Im Rahmen des ENIAK-Projektes erfolgte bereits eine Korrelationsanalyse der Ablagerungsbildung am Prüfstand mit Ergebnissen der verbreiteten motorischen Ablagerungstests XUD9 und DW10. Es konnte festgestellt werden, dass eine prinzipielle Übertragbarkeit gewährleistet ist. Das Konzept wird daher in weiten Teilen für dieses Vorhaben übernommen.

Der Kraftstoff wird von einer Vordruckpumpe über einen Kraftstofffilter zur Hochdruckpumpe gefördert, die von einem leistungsstarken und drehzahlgeregelten Elektromotor angetrieben wird. Die Hochdruckpumpe fördert den Kraftstoff in den Kraftstoffverteiler (Rail), in dem u. a. der Raildrucksensor verbaut ist. Am Kraftstoffverteiler können bis zu sechs Injektoren angeschlossen werden, deren Spitze beheizbar ist. Die Injektoren spritzen den Kraftstoff in je eine separate Kammer ein. Der Kraftstoff wird anschließend mit einem Rührbündel-Wärmetauscher auf Temperaturen unter 50 °C gekühlt und in das Vorlagegefäß zurückgeführt. Der Rücklauf aus der Hochdruckpumpe und die Steuermengen der Injektoren werden ebenfalls gesammelt und in das Vorlagegefäß zurückgeführt. Dadurch entsteht ein geschlossener Kraftstoffkreislauf. Eine schematische Darstellung des Prüfstands ist in Abbildung 48 gezeigt.

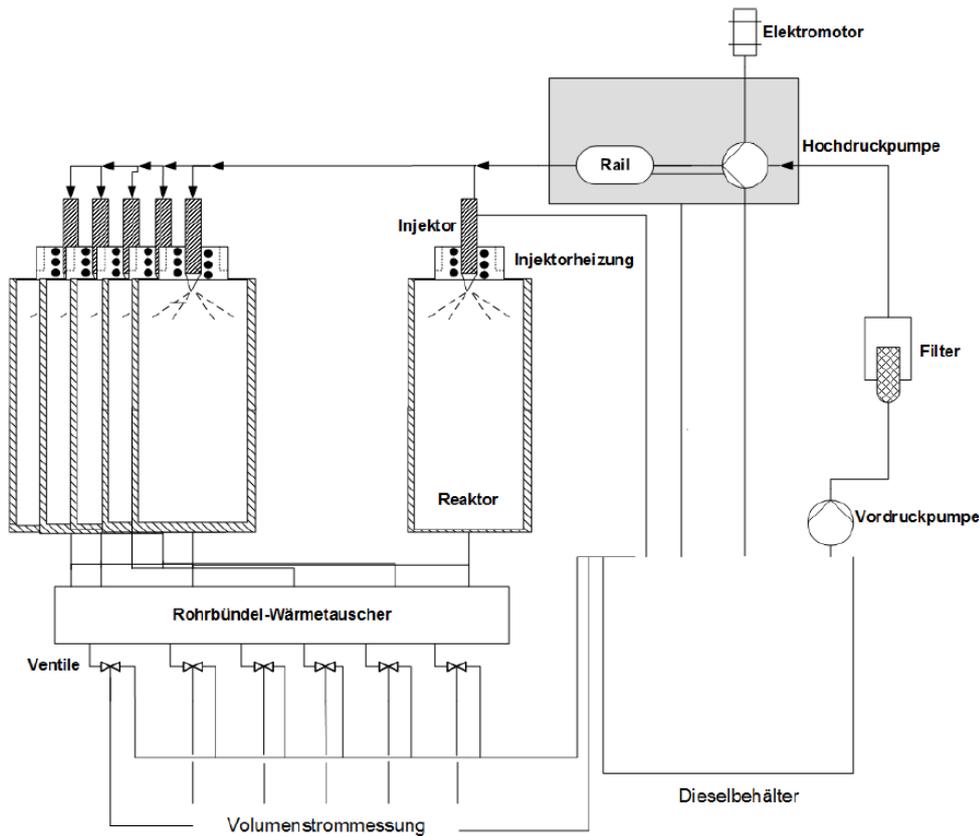


Abbildung 48: Skizze des nicht-motorischen Injektorablagerungsprüfstands

Gegenüber der Betriebsweise im Projekt „ENIAK“ steht im vorliegenden Projekt „SAVEbio“ die forcierte Bildung von Ablagerung ohne absichtlich hinzugefügte Kontaminanten wie Zinkneodecanoat oder DDSA + Natrium im Vordergrund. Zinkneodecanoat wird als Promotor im motorischen Test XUD9 eingesetzt (äußere Ablagerungen); DDSA + Natrium dient als Promotor im motorischen Prüfverfahren DW10 (innere Ablagerungen). Da beide Kontaminanten in der Realität quasi nicht (mehr) vorkommen, ist die Entwicklung eines Prüfverfahrens, welches ohne künstlich hinzugefügte Substanzen auskommt, voranzutreiben. Die Ablagerungsbildung erfolgt im Projekt „SAVEbio“ daher allein durch absichtliche und forcierte Degradation des Kraftstoffs, welche durch eine bewusst kritische Betriebsweise hervorgerufen wird.

Die Ableitung eines anwendungsrelevanten, aber dennoch kritischen Lastprofils erfolgt in Absprache mit dem Partner TFZ anhand von genormten Prüfzyklen und aufgezeichneten Betriebsdaten aus Feldtests. Berücksichtigt werden hierbei ebenfalls Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Projekt „ENIAK“. Beispielsweise wurden im Rahmen der Methodenentwicklung insbesondere Betriebsweisen untersucht, welche die Bildung von inneren Injektorablagerungen (IDID) begünstigen können. Wichtige Elemente sind demnach der zyklische Betrieb, d. h. Warm- und Abkühlphasen, und insbesondere die Wahl der Temperatur der Injektorspitze. Eine untergeordnete Rolle spielte in den früheren Untersuchungen der Druck im Kraftstoffverteiler sowie die Einspritzfrequenz und die Öffnungsdauer der Injektoren.

In den Einspritzkammern am Injektorprüfstand herrscht Umgebungsdruck, da die im ENIAK-Projekt durchgeführten numerischen Berechnungen darauf hindeuten, dass die zur Bildung von äußeren Injektorablagerungen notwendigen Strömungsbedingungen vorwiegend durch den Einspritzvorgang selbst indiziert werden. Eine zusätzliche Verwirbelung der Ladung oder eine Kompression ist nicht erforderlich, um den Ablagerungsbildungsprozess in geeigneter Weise nachzustellen.

Aufgrund der vergleichsweise hohen technischen Komplexität der Komponenten des Kraftstoffsystems von Landmaschinen gegenüber dem existierenden PKW-System kann der am OWI vorhandene ENIAK-Prüfstand nicht für dieses Vorhaben genutzt werden. Daher wird am OWI ein neuer Prüfstand explizit für den Heavy-Duty-Einsatz konzeptioniert und aufgebaut. Zum Einsatz kommen originale Einspritzsystemkomponenten, die von den eingebundenen Unternehmen John-Deere und Deutz zur Verfügung gestellt worden sind, um ein möglichst realitätsnahes Abbild des Kraftstoffsystems zu erreichen.

Die Konstruktion und der Aufbau des Prüfstands werden am OWI durchgeführt. Der Prüfstand wird zunächst vollständig in CAD (Abbildung 49) vorgeplant und anschließend modular aufgebaut. Die wesentliche technische Änderung gegenüber früheren Einspritzprüfständen betrifft die eingesetzte Kraftstoff-Hochdruckpumpe (HDP) zur Druckerzeugung. Die Verwendung einer originalen Kraftstoff-Hochdruckpumpe ist unvermeidlich, um die erforderliche Kraftstoffmenge für sechs Injektoren bereitstellen zu können. Die bislang verwendeten, technisch einfacheren PKW-Hochdruckpumpen können dies nicht leisten. Die Fa. John-Deere hat dem OWI hierfür ein typisches Landmaschinen-Aggregat HP6-0021 (RE564861) zur Verfügung gestellt. Diese HDP besitzt zwei Druckkolben mit Magnetventilsteuerung, die drehwinkelgesteuert geöffnet und geschlossen werden müssen, um den Kraftstoff auf den gewünschten Druck zu verdichten und in den Kraftstoffverteiler zu fördern.

Die Hochdruckpumpe ist im Vollmotor 1:1 mit der Kurbelwelle verbunden, sodass die bekannten Drehzahlangaben der Landmaschinen (vgl. u. a. Abbildung 83) direkt auf die erforderliche Drehzahl der Pumpe übertragen werden können. Korrelierend hierzu ist aus dem Pumpenkennfeld zu entnehmen, dass der Arbeitsbereich der Pumpe im Drehzahlbereich zwischen 1.000 und 2.600 Umdrehungen pro Minuten liegt. Für die Auslegung des nicht-motorischen Prüfstands wird daher eine Drehzahl bis ca. 2.600 U/min herangezogen und ein 2-poliger E-Motor mit einer Nenndrehzahl von 2.920 U/min gewählt, um maximale Flexibilität zu gewährleisten.

Gegenüber den zumeist PWM-geregelten PKW-HDP stellt die drehwinkelgesteuerte Regelung der HDP eine große technische Herausforderung dar, weswegen eine externe Firma (Fa. VEMAC) mit der Auslegung eines separaten Steuergeräts zur Druckregelung beauftragt wird. Der umfangreiche Mehraufwand zur technischen Umsetzung der Pumpenregelung wurde erst im Verlauf der Projektbearbeitung ersichtlich, wodurch der Meilenstein zur Inbetriebnahme erst später erreicht wurde. Der Antrieb der Kraftstoff-Hochdruckpumpe erfolgt durch einen 3 kW-Elektromotor der Bauform B14A, der mit Hilfe eines geeigneten Frequenzumrichters drehzahl geregelt betrieben werden kann. Ein angeflanshtes 60-2-Zahnrad (Abbildung 49 rechts) dient zur Bestimmung der Drehzahl und

der Winkelposition, deren exakte Erfassung zur Druckregelung erforderlich ist. Die Verarbeitung der Signale des Hallsensors sowie die Druckregelung übernimmt das Steuergerät der Fa. VEMAC. Von diesem werden die Zustandsparameter mittels CAN-Bus an die OWI-Prüfstandssteuerung gesendet, die die übergeordnete Steuerung (Betriebszyklus, Temperaturregelung, Messdatenerfassung) sicherstellt.

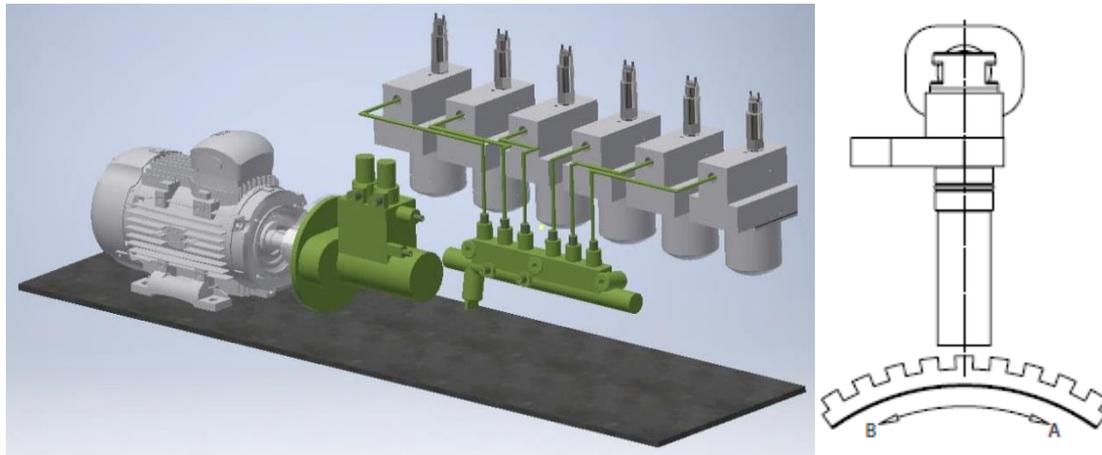


Abbildung 49: CAD-Ansicht der Antriebseinheit, Kraftstoffpumpe, Kraftstoffverteiler und Injektoren (links); Hallsensor mit 60-2-Zahnrad (rechts)

Der Kraftstoffverteiler stammt ebenfalls von John-Deere und leitet verdichteten Kraftstoff an die angeschlossenen Injektoren weiter. Deren Ansteuerung erfolgt durch das VEMAC-Steuergerät, da die Bestromungszeitpunkte (d. h. Kraftstoffdruckabbau durch die Injektoren) und die Bestromungszeitpunkte der Magnetventile der HDP aufeinander abgestimmt werden müssen. Andernfalls ist eine effektive und verlässliche Druckregelung nicht möglich. Um einen ordnungsgemäßen Betrieb zu gewährleisten, müssen entsprechende Kennfelder ermittelt und die Software aufwändig parametrisiert werden. Dies wird von Mitarbeitern des OWI mit Unterstützung der Fa. VEMAC durchgeführt.

### II.1.5.2 Entwicklung der Prüfmethodik

Ein Ziel des nicht-motorischen Prüfstands ist es, die vollmotorischen Bedingungen soweit wie nötig nachzustellen, um die Phänomenologie der Bildung von (inneren) Ablagerungen untersuchen zu können. Vereinfachungen des Gesamtsystems sind nur dann zulässig, sofern ein direkter Einfluss auf die Ablagerungsbildung nicht zu erwarten ist. Um die thermische Belastung der Injektoren während des motorischen Betriebs nachzubilden, ist es daher erforderlich, die Injektoren im nicht-motorischen Prüfstand von außen zu beheizen. Zur Beheizung der Injektoren werden am OWI Heizblöcke konstruiert, in die neben den elektrischen Heizpatronen auch der Hochdruck-Kraftstoffanschluss sowie ein Kanal für den Steuermengenabfluss integriert sind (Abbildung 50). Die heißeste Position an den Injektordüsen ist in Abbildung 51 deutlich zu erkennen und befindet sich in einem Bereich mit geringen Spaltmaßen ( $\sim 4 \mu\text{m}$ ), der hinsichtlich IDID als besonders kritischen

angesehen wird. Es können Temperaturen bis ca. 200 °C an der Injektordüse eingestellt werden. Damit entsprechen die vorherrschenden Temperaturen in etwa denen beim motorischen Betrieb.

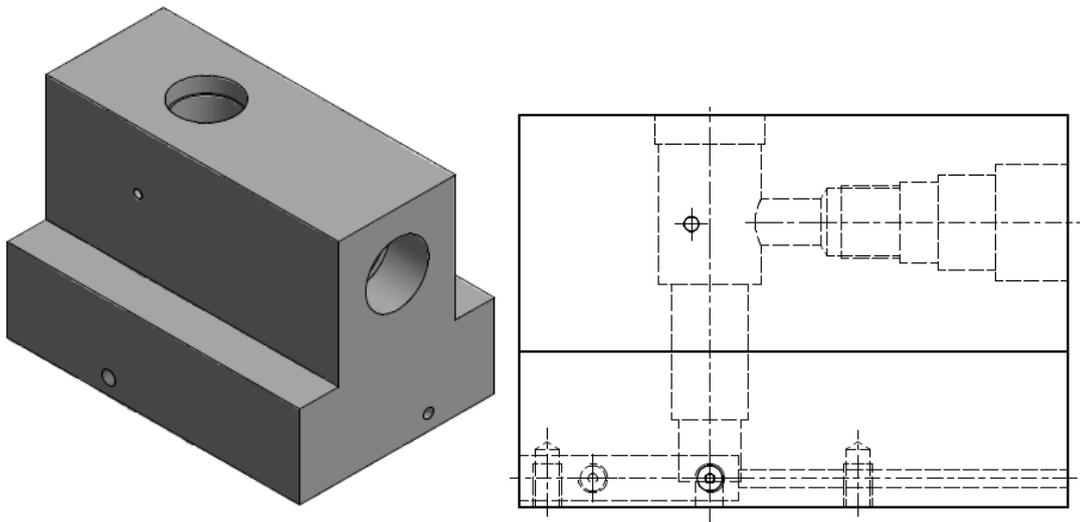


Abbildung 50: Konstruktion der Injektoraufnahme mit Druckstutzen und Heizpatrone

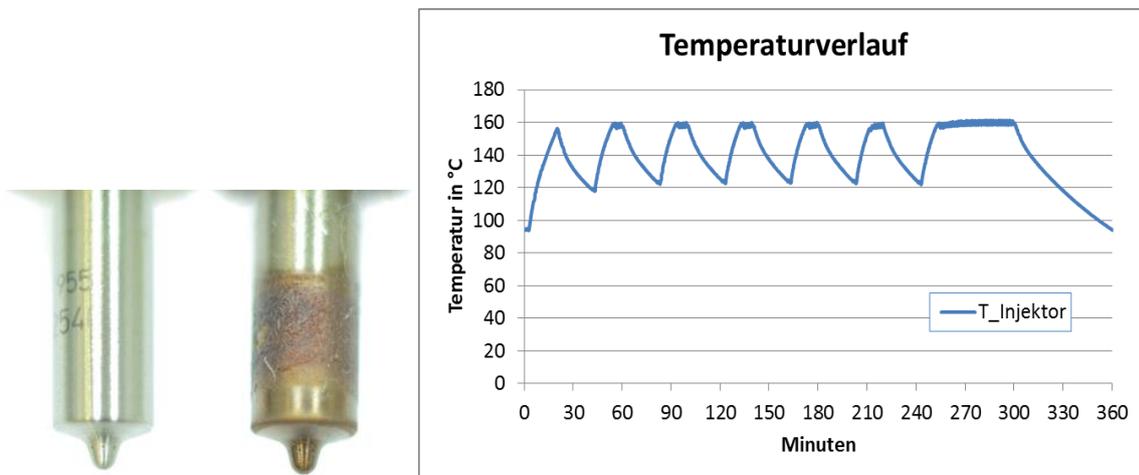


Abbildung 51: Darstellung der Injektordüse vor und nach einem Prüflauf (links): die heißeste Stelle mit sichtbaren Kraftstoffrückständen befindet sich etwa 10 mm oberhalb der Düsenkuppe; Temperaturmessung an der Düse während eines Prüflaufs (Ausschnitt) (rechts)

### II.1.5.2.1 Einspritzbedingungen am nicht-motorischen Prüfstand

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass der Druck im Kraftstoffverteiler sowie die Einspritzfrequenz und die Öffnungsdauer der Injektoren keinen direkten Einfluss auf die Ablagerungsbildung haben. Entsprechend entstehen hierdurch bei der Konzeption der Prüfmethode für den nicht-motorischen Prüfstand einige Freiheiten, weil der Einspritzvorgang nicht notwendigerweise für den Motorbetrieb geeignet sein muss. Dennoch ist im

Zuge der Methodenentwicklung darauf zu achten, dass die Übertragbarkeit in die reale Anwendung weiterhin gegeben ist. Um dieses zu erreichen, werden zusätzlich zu den vorhandenen Daten aus den Feldtests und dem NRSC (TFZ) die Prüfpunkte eines Injektordiagnosegeräts am OWI ausgewertet. Das Diagnosegerät DISU 6000 der Fa. Autotestgeräte Leitenberger GmbH wird am OWI unter anderem zur Prüfung der Injektorfunktion und Bewertung der Einspitzcharakteristik verwendet (vgl. II.1.5.3). Die Prüfung erfolgt vollautomatisch mit entsprechend der Herstellerangaben hinterlegten Betriebsdaten (Kraftstoffdruck, Bestromungsdauer, etc.), d. h., dass in diesem Gerät für jeden Injektortyp relevante Betriebspunkte hinterlegt sind, welche für die Entwicklung der Methode herangezogen werden können. Um den Bezug zur realen Anwendung nicht zu verlieren, hat sich OWI gemeinsam mit den Partnern TFZ und regineering auf einen relativ niedrigen Raildruck von ca. 800 bar und eine Bestromungszeit von 920  $\mu$ s verständigt. Diese Bedingungen entsprechen zum einen einem vom Injektorhersteller definierten Prüfpunkt im Diagnosegerät („TP4“). Zum anderen entspricht dieser Prüfpunkt nahezu den Bedingungen des NRSC Phase 8 („Leerlauf“, bzw. „Niedriglastpunkt“) hinsichtlich Kraftstoffdruck und Bestromungszeit. Dies geht aus den protokollierten Prüfstandsdaten des Partners TFZ hervor.

#### **II.1.5.2.2 Ableitung des Prüfzyklus des nicht-motorischen Injektorprüfstands**

Es wurden einige Vortests zur Ermittlung einer geeigneten zyklischen Betriebsweise zur forcierten Ablagerungsbildung durchgeführt. Wie oben bereits erwähnt, ist der Betriebszyklus maßgeblich für die Kraftstoffdegradation und somit für die potentielle Ablagerungsbildung verantwortlich. Aus der Literatur ist bekannt, dass kurze Intervalle mit Temperaturwechseln am bzw. im relevanten Bauteil die hier bewusst herbeizuführende Ablagerungsbildung begünstigen. Insbesondere innere Ablagerungen, deren Bildung zentraler Untersuchungsgegenstand am OWI ist, treten unter diesen Bedingungen vermehrt auf. Aus diesem Grund basiert auch der auf innere Ablagerungen abzielende motorische CEC-Test DW10c auf Kaltstartvorgängen und Vollastphasen. Der schlussendlich am Injektorprüfstand eingesetzte Prüfzyklus basiert auf publizierten Realdaten, den vom Partner TFZ aufgezeichneten Betriebsdaten der Feldtests und der NRSC sowie der Erfahrungen aus dem ENIAK-Projekt und weiterer Forschungsaktivitäten des OWI im Bereich der Brenn- und Kraftstoffanwendung [22][43]. Er setzt sich im ersten Teilbereich aus kurzen „AN“-Zuständen und „Aus“-Zuständen im Wechsel zusammen, beinhaltet im Teilbereich II eine längere, kontinuierliche Betriebsphase und abschließend eine längere Betriebspause (Abbildung 52). Der Zyklus besitzt eine Laufzeit von 360 Minuten (6 Stunden) und wiederholt sich fortlaufend bis die maximale Versuchszeit von etwa 180 Stunden erreicht ist.

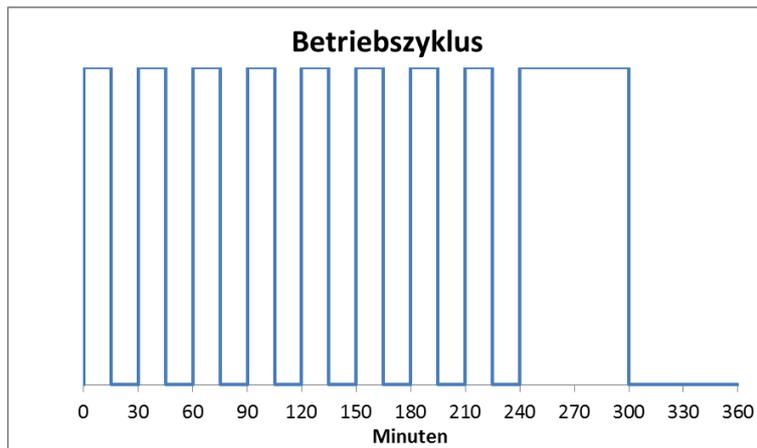


Abbildung 52: *intermittierender Betriebszyklus am nicht-motorischen Ablagerungsprüfstand*

### II.1.5.3 Bewertungsmethodik für die Injektorfunktion

Ablagerungen an (extern; EDID) oder in (intern; IDID) Dieselinjektoren führen potentiell zu Fehlfunktionen. IDID führen zu einer trägeren Reaktion oder komplettem Versagen des Magnetventils und/oder der Düsennadel, was zu einem verzögerten Öffnen und/oder Schließen oder Ausfall des Injektors führt. Die Folge ist eine Verschiebung des Einspritzzeitpunkts, gegebenenfalls einhergehend mit einer Reduzierung oder Erhöhung der eingespritzten Kraftstoffmenge, insbesondere bei niedriger Last und im Leerlauf (vgl. II.1.6.1).

Die Bewertung der Injektorfunktion erfolgt am OWI im Rahmen dieses Vorhabens hauptsächlich mit Hilfe eines vollautomatischen Injektorprüfgeräts der Fa. Autotestgeräte Leitenberger GmbH mit dynamischer Einspritzmengenmessung. Zusätzlich bietet das Gerät Modell DISU 6000 (Abbildung 53) die Möglichkeit der Bestimmung der Einspritzverzögerung relativ zum Bestromungszeitpunkt (Reaktionszeit; response time; RSP) und gibt daher auch Hinweise auf ein verzögertes (oder beschleunigtes) Öffnen des Injektors.



Abbildung 53: Injektorprüfgerät DISU 6000 der Fa. Autotestgeräte Leitenberger GmbH

Aufgrund des hochkomplexen Injektordesigns mit Spaltmaßen im Bereich weniger Mikrometer und entsprechenden Fertigungstoleranzen, ist es zur Bewertung der potentiellen Beeinträchtigung der Injektorfunktion (Einspritzmenge, Reaktionszeit) wichtig, jeden untersuchten Injektor zunächst im Neuzustand zu vermessen. Diese Messung dient als individuelle Nullreferenz, mit der alle weiteren Messreihen des jeweiligen Injektors verglichen werden können. Anhand der Änderung von eingespritzter Kraftstoffmenge bei einem bestimmten Prüfpunkt oder der Reaktionszeit erfolgt die Bewertung der Funktionsbeeinträchtigung. Beispielhaft seien im Folgenden die Bewertungsroutinen „Einspritzmenge“ und „Reaktionszeit“ erläutert.

**Einspritzmengenmessung:** Das Injektorprüfgerät misst im Anschluss an eine definierte Konditionierungsroutine vollautomatisch die Einspritzmenge pro Ventilhub in verschiedenen Prüfpunkten (Kraftstoffdruck, Bestromungszeit und Einspritzfrequenz), die vom Injektorhersteller als Referenzpunkte angegeben sind. Aus Screeningversuchen zu Beginn des Projekts ist bekannt, dass eine aussagekräftige Bewertung der potenziellen Einspritzmengenvarianz durch Ablagerungen aus dem Volllasttestpunkt („VL“) oder dem Niedriglastpunkt („LL“) abgeleitet werden können. Die Mengenmessung im Volllasttestpunkt wird bei dem im Projekt eingesetzten Injektortyp der Fa. Denso (verbaut in John-Deere Traktoren) bei 1.600 bar Kraftstoffdruck, 1.350  $\mu$ s Bestromungsdauer und einer Einspritzfrequenz von 200 pro Minute durchgeführt. Die Injektoren der Fa. Bosch (verbaut in Deutz-Traktoren) werden bei 1.600 bar Kraftstoffdruck, 1.600  $\mu$ s Bestromungsdauer und einer Einspritzfrequenz von 100 pro Minute geprüft. Das Prüfprogramm sieht zehn (Denso) bzw. vier (Bosch) Einspritzungen vor, deren jeweilige Einzelmengen aufgezeichnet und wie in Abbildung 54 links dargestellt werden können.

**Reaktionszeit (response time; RSP):** Neben der Änderung der Einspritzmenge ist die Änderung der Reaktionszeit des Injektors von Bedeutung, um mögliche Beeinträchtigungen zu detektieren und zu bewerten. Die entsprechende Messung wird bei allen Injektoren bei 850 bar Kraftstoffdruck, 750  $\mu$ s Bestromungsdauer und einer Einspritzfrequenz von

1000 pro Minute durchgeführt. Das Prüfprogramm zeichnet hier 50 Einspritzvorgänge auf (vgl. Abbildung 54 rechts). Die Reaktionszeit ist ein relativer Parameter, zu dem vom Injektorhersteller keine Grenzwerte vorgegeben sind.

Zur Bewertung der potenziellen Funktionsbeeinträchtigung eines Injektors werden die Mengenmessungen sowie die ermittelten Reaktionszeiten im Neuzustand und die entsprechenden Messungen nach Belastung des Injektors im SAVEbio-Prüfstand gegenübergestellt. Die Belastung im nicht-motorischen Prüfstand mit dem Ziel der Ablagerungsbildung wird als „dirt-up“-Prüflauf bezeichnet. Zur Berechnung der jeweiligen Abweichungen gegenüber dem Neuzustand werden die jeweiligen Mediane verglichen, um den Einfluss einzelner Ausreißer zu minimieren. Die Abweichungen werden im Folgenden in Prozent angegeben.

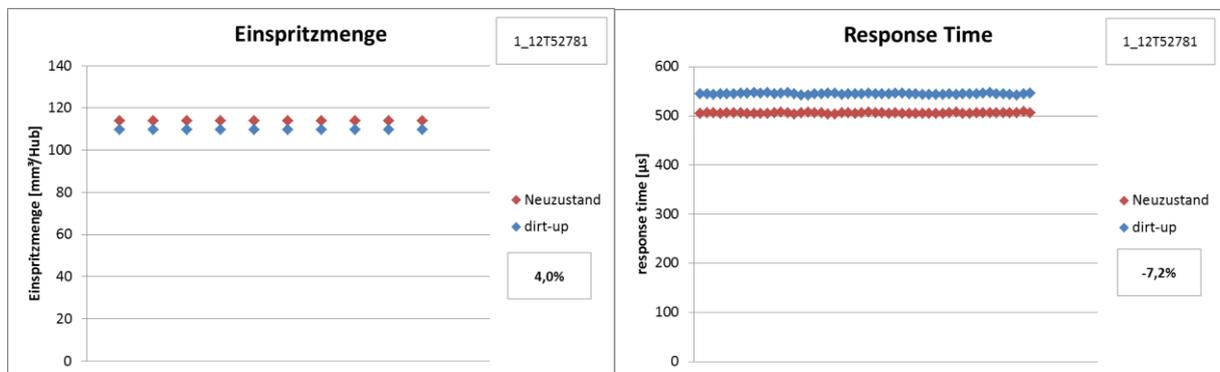


Abbildung 54: Darstellungen der Ergebnisse der Einspritzmengenmessung (links) und der Reaktionszeit (rechts) am Beispiel des Injektors 12T52781

Im angeführten Beispiel ist zu erkennen, dass die Einspritzmenge (links) nach dem „dirt-up“-Prüflauf niedriger ist im Vergleich zum Neuzustand. Die Änderung beträgt aber lediglich etwa 4 %. Die fertigungsbedingte Streuung der Einspritzmengen von neuen Injektoren beträgt im VL-Punkt etwa 2 %. Diese Angabe beruht auf einer Auswertung aller Einspritzmengenmessungen (von neuen, baugleichen Injektoren), die am OWI im Rahmen des Projekts durchgeführt worden sind. Im PKW-Bereich sind Abweichungen gegenüber dem Neuzustand bis ca. 15 % tolerabel und durch das Motorsteuergerät ausgleichbar. Eine Abweichung von 4 % stellt somit eine messbare und relevante Abweichung dar, die jedoch für den Heavy-Duty-Bereich hinsichtlich des motorischen Betriebs als nicht kritisch eingestuft wird.

Die Reaktionszeit des beispielhaft angeführten Injektors, d.h. die Zeit zwischen Bestromung und Einspritzbeginn, erhöht sich nach dem „dirt-up“-Prüflauf um etwa 7,2 %. Die Abweichung liegt knapp außerhalb der typischen, fertigungsbedingten Streuung (bis 7 % Abweichung). Es ist somit davon auszugehen, dass eine Beeinträchtigung der Injektorfunktion gegeben ist.

Zusammenfassend führen diese beiden Beobachtungen zu dem Schluss, dass innere Ablagerungen in diesem Beispiel vorhanden sind und zu eingeschränkter Agilität der Injektornadel führen (verzögertes Öffnen). Die relativ geringe Abweichung der Einspritzmenge, kann ebenfalls auf verzögertes Schließen und/oder reduzierte Querschnitte in der Injektordüse aufgrund von äußeren Ablagerungen hindeuten. Eine weitere Aufschlüsselung der Effekte ist mit den zur Verfügung stehenden Injektorprüfständen am OWI jedoch nicht möglich. Hier wäre eine Einspritzratenmessung geeignet, die den exakten zeitlichen Verlauf der Einspritzung aufzeichnet (vgl. Abbildung 69).

#### **II.1.5.4 Materialien und Methoden**

##### **II.1.5.4.1 Kraftstoffe und Additive**

Der Dieselmotorkraftstoff nach EN 590 wurde bei dem regionalen Kraftstoffhändler Bischoff & Vielhauer GmbH zentral beschafft. Für die Laboruntersuchungen der Partner OWI, TFZ und reengineering steht somit eine identische Kraftstoffqualität zu Verfügung. Der Rapsölmotorkraftstoff nach DIN 51605 wurde ebenfalls zentral beschafft.

In den Untersuchungen zur Ablagerungsreinigung bzw. zu Vermeidungsstrategien werden folgende Additive vom Partner ERC bereitgestellt und in den Untersuchungen am OWI eingesetzt:

- Detergent 1: wirkt bevorzugt gegen äußere Ablagerung am Injektor (EDID) und wurde für den XUD9-Ablagerungstest konzipiert
- Detergent 2: zielt auf die Reinigung interner Injektorablagerungen (IDID) ab und wurde für den DW10-Ablagerungstest optimiert
- Antioxidantienpaket "OX 1220 Biofuel": dient zur Stabilisierung insbesondere der biogenen Komponenten wie Biodiesel oder Pflanzenöl

Das Detergent 1 mit dem Wirkstoff Polyisobutylensuccinimid (PIBSI) wird im nicht-motorischen Prüfstand in den Konzentrationstufen 250 mg/kg und 500 mg/kg im Rapsölmotorkraftstoff eingesetzt. Es wird kombiniert mit dem Oxidationsstabilisator OX 1220 Biofuel in gleichen Konzentrationen, um zusätzlich zur Reinigungswirkung den Kraftstoff zu stabilisieren.

Das Detergent 2 wird sowohl im Rahmen einer „keep-clean“-Additivstrategie als auch einer „clean-up“-Strategie eingesetzt. Untersucht wird die Wirkung des Additivs in einer relativ hohen Konzentration von 1000 mg/kg im Kraftstoff.

##### **II.1.5.4.2 Injektoren**

Für die Versuche am nicht-motorischen Ablagerungsprüfstand werden pflanzenöлтаugliche Magnetventil-Injektoren der Hersteller Denso und Bosch eingesetzt. Diese werden in Landmaschinenmotoren der Firmen John-Deere (Denso) und Deutz (Bosch) eingesetzt. Die Denso-Injektoren sind bei John-Deere unter der Referenznummer RE549641 zu finden. Die Bosch-Teilenummer lautet 04514650. Für die im Vorhaben geplanten

Untersuchungen am nicht-motorischen Prüfstand stehen 12 Denso-Injektoren und 60 Bosch-Injektoren zur Verfügung.



Abbildung 55: Heavy-Duty-injektoren; Denso (oben); Bosch (unten)

Identische Injektoren werden in den Versuchstraktoren am TFZ eingesetzt. Im Rahmen des Vorhabens werden Betriebserfahrungen und Injektoren zwischen den beiden Forschungsstellen OWI und TFZ ausgetauscht, um ergänzende Untersuchungen oder Bewertungen der Funktionalität vorzunehmen.

#### II.1.5.4.3 Untersuchungsvarianten

- Ablagerungsbildungsversuche

Die Injektoren werden für ca. 180 Betriebsstunden bei den in Abschnitt II.1.5.2.1 genannten Einspritzbedingungen von 800 bar Raildruck und einer Bestromungszeit von 920  $\mu$ s betrieben. Diese Bedingungen führen zu Einspritzmengen von etwa 30 mm<sup>3</sup> pro Ventilhub. Bei einer typischen Drehzahl im Niedriglastpunkt von ca. 1.600 U/min beträgt die insgesamt pro Prüflauf durch einen Injektor strömende Kraftstoffmenge in etwa 250 Liter. Angewendet werden Betriebszyklus und Lastpunkt wie in Abschnitt II.1.5.2.2 beschrieben, um den Kraftstoff bewusst zu degradieren und Ablagerungsbildung zu forcieren. In Prüfläufen mit dem Ziel der Ablagerungsbildung werden dem Kraftstoff keine Additive zugegeben. Die Injektoren werden vor und nach dem Prüflauf einer Funktionsprüfung (vgl. Abschnitt II.1.5.3) unterzogen.

- Reinigungs- und Vermeidungsstrategien am nicht-motorischen Prüfstand

Die Strategien „clean-up“ und „keep-clean“ unterscheiden sich grundsätzlich in ihrer Methodik. Bei der Versuchsvariante „clean-up“ sollen bereits vorhandene Ablagerungen am (EDID) oder im (IDID) Injektor entfernt werden, um die Funktionalität

des Injektors möglichst dem Neuzustand anzunähern. Dagegen verfolgt die Strategie „keep-clean“ den Ansatz, dass schon die Bildung von Ablagerungen vermieden werden soll und somit die Funktionalität des Injektors erhalten bleibt. Im Rahmen dieses Vorhabens werden am OWI beide Varianten untersucht.

Entsprechend der differenzierten Methodik wird die „keep-clean“-Strategie am nicht-motorischen Prüfstand mit identischen Bedingungen wie die Ablagerungsbildungsversuche durchgeführt. Hierbei soll bewertet werden, inwieweit die eingesetzten Additive bei diesen bewusst kritischen Betriebsbedingungen eine Ablagerungsbildung vermeiden können. Die Laufzeit beträgt 180 Betriebsstunden; eingesetzt werden neue Injektoren.

Im Gegensatz dazu beträgt die Betriebszeit für Untersuchungen der „clean-up“-Strategie nur etwa 64 Stunden, da bei diesen Untersuchungen das Reinigungspotential eines kurzzeitigen Additiveinsatzes im Vordergrund steht. Die Kraftstoffbelastung der Injektoren beträgt hier etwa 90 Liter. Eingesetzt werden Injektoren, die nach einem zuvor durchgeführten Ablagerungsbildungsversuch eine Funktionsbeeinträchtigung gezeigt hatten.

Zur Bewertung der Additivwirksamkeit werden die Injektoren anschließend einer entsprechenden Funktionsprüfung am Injektorprüfgerät unterzogen.

- Reinigung verschmutzter Injektoren aus Feldtests am Prüfgerät

Neben den oben beschriebenen Strategien zur Reinigung verschmutzter Injektoren am Prüfstand, wird auch die Reinigungsfunktion des Injektorprüfgeräts hinsichtlich der Wirkung geprüft. Die Reinigungswirkung dieser Methode wird mit der Reinigungswirkung der entwickelten Strategien am nicht-motorischen Prüfstand verglichen.

### **II.1.5.5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen am OWI**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Injektorfunktionsprüfungen der jeweiligen Prüfläufe am nicht-motorischen Prüfstand dargestellt und ausgewertet. Die durchgeführten Prüfläufe unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Injektoren und Kraftstoffe sowie der Zielsetzung.

#### **II.1.5.5.1 Prüfläufe zur forcierten Ablagerungsbildung**

Die hier beschriebenen Prüfläufe werden zur forcierten Ablagerungsbildung unter den zuvor in Abschnitt II.1.5.2 genannten Bedingungen durchgeführt. Da von John Deere nur eine begrenzte Anzahl an neuen Denso-Injektoren zur Verfügung gestellt werden konnte werden die Versuche nicht mit je sechs Injektoren, sondern nur mit je zwei Injektoren gefahren. Hierdurch ist die geplante Variationsbreite (Betriebsbedingungen, Kraftstoffe)

umsetzbar, jedoch nicht mehr mit der ursprünglich geplanten statistischen Absicherung versehen.

### Untersuchungsreihe mit Injektoren der Fa. Denso (verbaut in John-Deere-Motoren)

- **Dieselmkraftstoff EN 590; Denso-Injektoren #12T53190 und #12T52781**

Beide Injektoren zeigen eine geringe Reduzierung der Einspritzmenge (Abbildung 56). Es ist daher davon auszugehen, dass Ablagerungen in geringem Maße erzeugt wurden. Der Anstieg der Reaktionszeit des Injektors #12T52781 beträgt 7,2% und ist somit größer als die übliche Streuung und die Messtoleranz des Testgeräts. Der verzögerte Einspritzbeginn bei gleichzeitig nur geringer Mengenabweichung deutet auf innere Ablagerungen hin. Die ermittelten Abweichungen fallen insgesamt aber gering aus und stellen für den Motorbetrieb vermutlich kein Problem dar. Die Injektorfunktion des Injektors #12T53190 ist als unkritisch zu bezeichnen, wobei auch hier Tendenzen zu verzögerter Öffnung vorliegen.

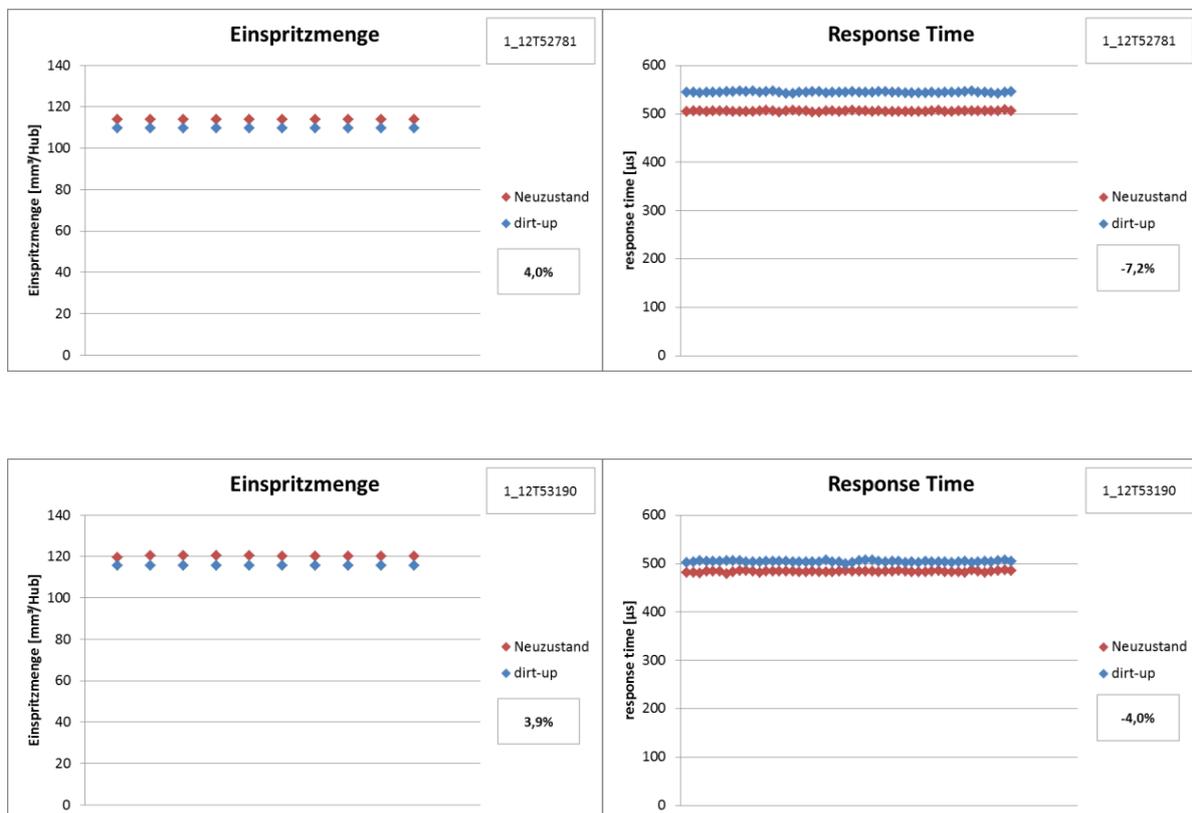


Abbildung 56: Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Denso-Injektoren #12T53190 und #12T52781; Betrieb mit Dieselmkraftstoff

- **Dieselmkraftstoff EN 590; Denso-Injektoren #12T53234 und #12T53759**

Die Einspritzmenge des Injektors #12T53234 reduziert sich nach Beanspruchung um etwa 4 %. Gleichzeitig wird eine Erhöhung der Reaktionszeit beobachtet (4 %), was zusammenfassend auf Ablagerungen im Inneren und ggf. auch auf externe Ablagerungen schließen

lässt. Die Abweichungen sind insgesamt aber relativ gering und für den Motorbetrieb vermutlich unkritisch. Der parallel betriebene Injektor #12T53759 zeigt hingegen keinerlei Anzeichen einer Ablagerungsbildung. Weder die Einspritzmenge noch die Reaktionszeit weisen Abweichungen beim Kontrolltest nach diesem Prüflauf auf. Mutmaßlich steht dies mit dem Ausfall einer Heizpatrone in Zusammenhang, wodurch die Spitztemperatur nicht erreicht worden ist. Der Injektor #12T53759 wird daher als Referenz für den durchzuführenden „no-Harm“-Test herangezogen. Beide Injektoren wurden im späteren Verlauf einer Reinigungsprozedur unterzogen, um das Potential eines Additivs zur Regeneration zu prüfen (vgl. Abschnitt II.1.5.5.2).

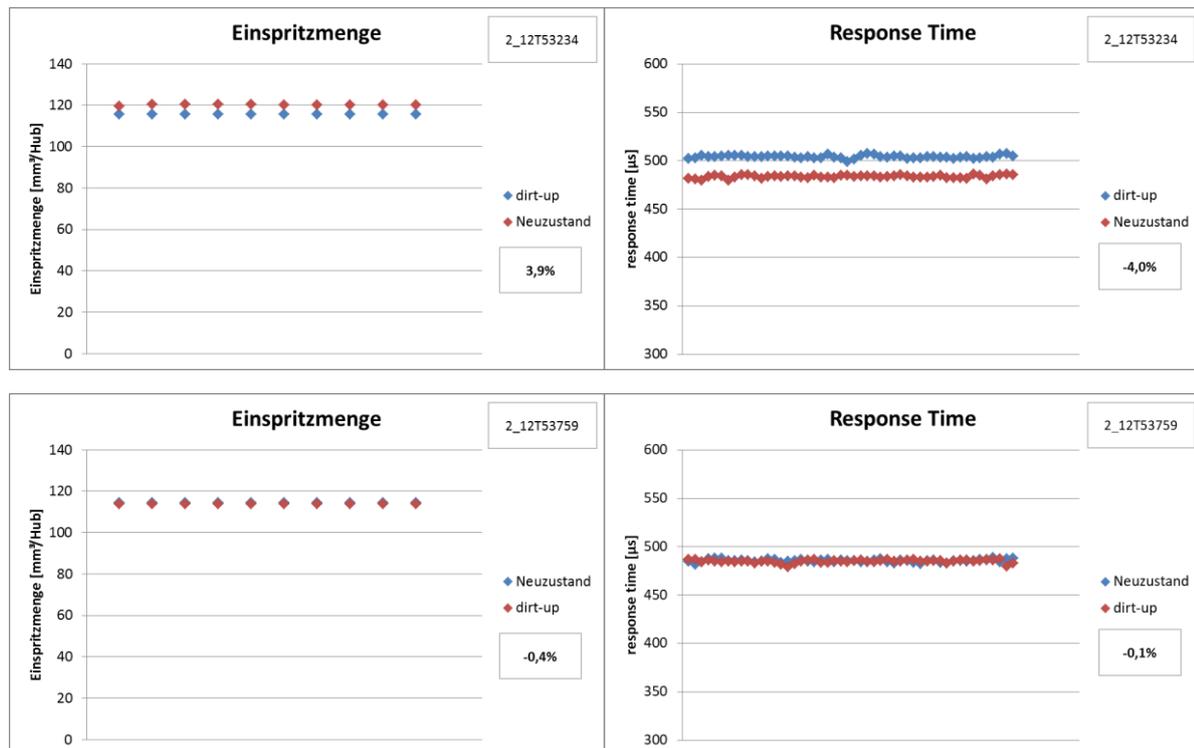


Abbildung 57: Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Denso-Injektoren #12T53234 und #12T53759; Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff

- **Rapsölkraftstoff DIN 51605; Denso-Injektoren #12T53190 und #12T52781**

Für diesen Prüflauf zur Ablagerungsbildung werden die Injektoren aus dem ersten Prüflauf wiederverwendet. Diese sind zu diesem Zeitpunkt keiner gravierenden Beeinträchtigung der Funktion unterworfen. Ziel dieses Versuchs ist es, eine weitere Veränderung (Verschlechterung) der Einspritzcharakteristik durch den Einsatz mit Rapsölkraftstoff zu forcieren.

Der Injektor #12T52781 zeigt eine weitere Verringerung der Einspritzmenge von gut 3 % nach der Belastung mit Rapsölkraftstoff. Damit einhergehend erhöht sich die Reaktionszeit des Injektors um weitere 7,5 %. Insgesamt sprechen diese Daten für eine Kombination aus inneren und externen Ablagerungen.

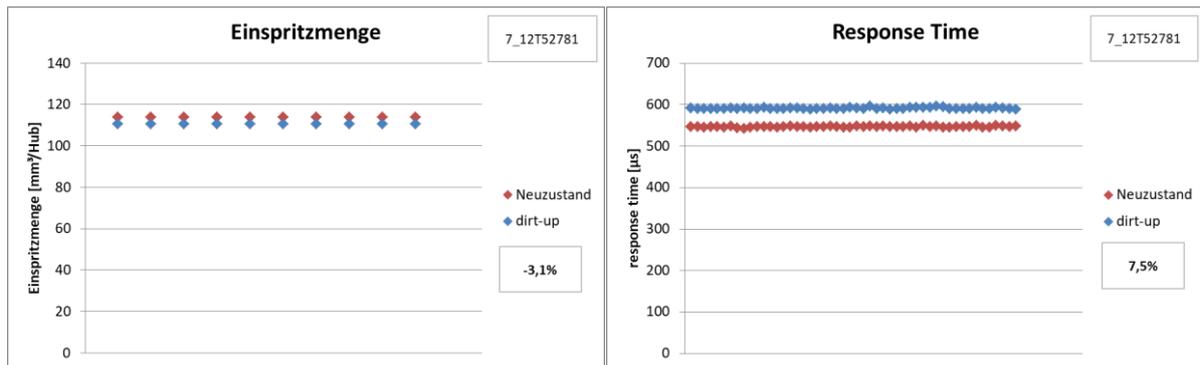


Abbildung 58: Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Denso-Injektors #12T52781; Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Zum Injektor #12T53190 liegen keine Daten vor. Der Injektor ist vermutlich während des Ausbaus irreparabel beschädigt worden, sodass eine Prüfung sowie die weitere Verwendung nicht mehr möglich waren.

### Zusammenfassung der Versuchsreihen mit John-Deere-Injektoren

Die folgende Abbildung 59 fasst die durchgeführten Versuchsreihen mit Denso-Injektoren zusammen. Es ist deutlich zu erkennen, dass vier der fünf Injektoren Funktionsbeeinträchtigungen zeigen. Der fünfte Injektor (#12T53759) zeigt keine Auffälligkeiten, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die defekte Heizpatrone in diesem Prüflauf zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 57). Somit kann an dieser Stelle geschlussfolgert werden, dass der nicht-motorische Prüfstand bei ordnungsgemäßen Betriebsbedingungen zur Bildung von Injektorablagerungen führt. Die teilweise signifikanten Abweichungen in der Reaktionszeit sprechen darüber hinaus auch für die Bildung von inneren Ablagerungen.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Kraftstoffen Dieselkraftstoff und Rapsölkraftstoff ist nicht zu erkennen, allerdings erlaubt die geringe Datenverfügbarkeit keine umfassende Aussage.

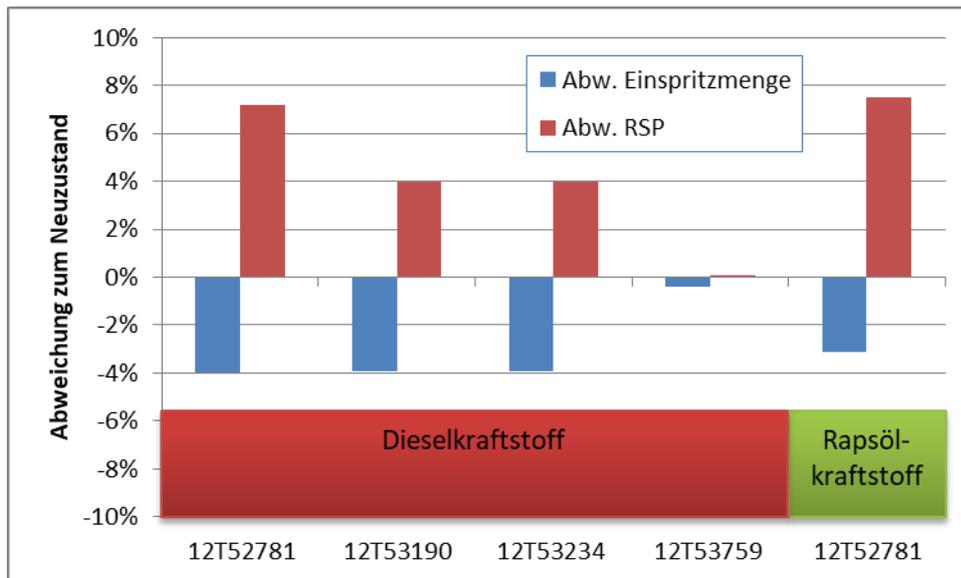


Abbildung 59: Übersicht über die festgestellten Veränderungen der Einspritzcharakteristik der hinsichtlich der Bildung von Ablagerungen untersuchten Denso-Injektoren

### Untersuchungsreihe mit Injektoren der Fa. Bosch (verbaut in Deutz-Motoren)

Im Verlauf des Vorhabens wurde eine Vielzahl an Bosch-Injektoren eingesetzt, daher werden im Sinne der Übersichtlichkeit lediglich exemplarische Ergebnisse der Versuche zur forcierten Ablagerungsbildung detailliert gezeigt. Eine Zusammenfassung ist weiter unten angegeben.

- **Dieselmotoren EN 590; Bosch-Injektor #5502**

Der Injektor #5502 wird einem Prüflauf zur gezielten Ablagerungsbildung unterzogen. Er weist nach der Beanspruchung eine deutlich reduzierte Einspritzmenge (-9,0 %) und eine nicht signifikante Änderung der Reaktionszeit auf (Abbildung 60). In dieser Kombination spricht diese Befundung für das Auftreten von äußeren Ablagerungen, die bspw. den Düsenquerschnitt verringern und so zu einer Reduzierung der Durchflussmenge führen können. Die im gleichen Prüflauf eingesetzten Injektoren zeigen ähnliche Ergebnisse in geringfügig anderer Ausprägung.

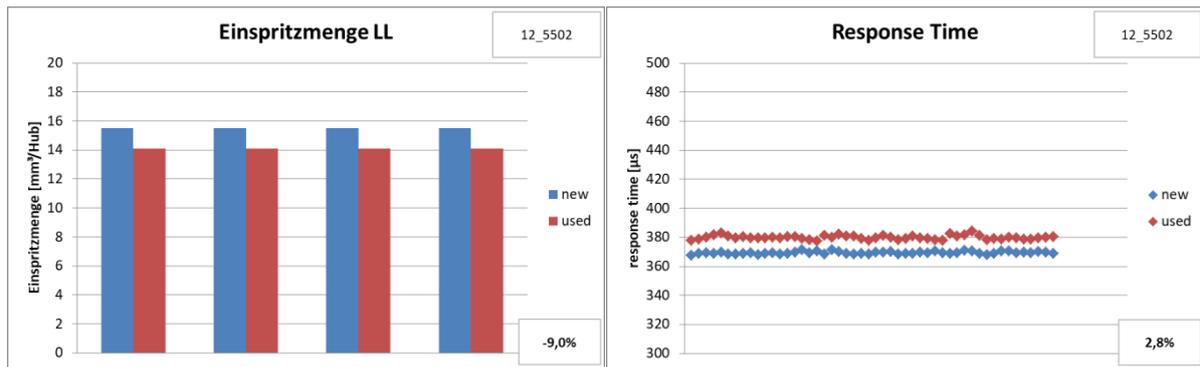


Abbildung 60: Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Bosch-Injektors #5502; Betrieb mit Dieselkraftstoff

- **Rapsölkraftstoff DIN EN 51605; Bosch-Injektor #2953**

Die Einspritzmenge nach dem Prüflauf ist um etwa 13,3 % reduziert (Abbildung 61 links). Diese Änderung liegt deutlich außerhalb der üblichen Streuung und kann im motorischen Betrieb bereits zu Leistungseinbußen führen. Wie oben bereits beschrieben, wird auch hier bei Einsatz des Rapsölkraftstoffs keine wesentliche Änderung der Reaktionszeit beobachtet. Die Erhöhung fällt mit etwa 1,6 % sehr gering aus (Abbildung 61 rechts). Es ist demnach unwahrscheinlich, dass innere Ablagerungen gebildet werden.

Weitere Injektoren, die unter gleichen bzw. ähnlichen Bedingungen am nicht-motorischen Prüfstand eingesetzt wurden, weisen vergleichbare Ergebnisse auf.

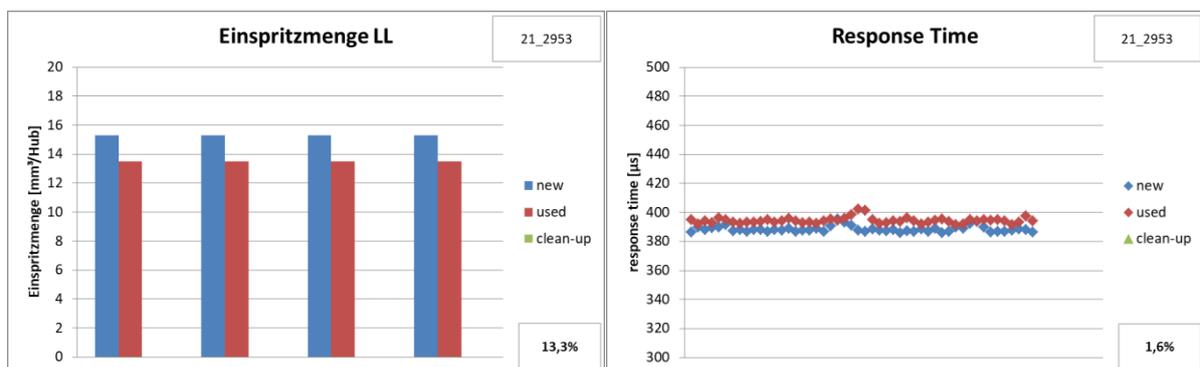


Abbildung 61: Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Bosch-Injektors #5502; Betrieb mit Rapsölkraftstoff

### Zusammenfassung der Versuchsreihen mit Bosch-Injektoren

In der Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Prüfläufe zur gezielten Ablagerungsbildung mit Bosch-Injektoren dargestellt. Unterteilt werden die Untersuchungen in Versuche mit Dieselkraftstoff und mit Rapsölkraftstoff. Es wurden keine zusätzlichen Additive verwendet.

Die ermittelten Abweichungen der Einspritzcharakteristik bei Einsatz von Dieseldieselkraftstoff stellen sich nicht einheitlich dar. Einige Injektoren weisen nach den jeweiligen Prüfläufen höhere, andere wiederum geringere Einspritzmengen auf. Signifikante Änderungen der Reaktionszeiten über die übliche Streuung hinaus sind nicht festzustellen.

Bei Einsatz von Rapsölkraftstoff reduziert sich bei allen getesteten Injektoren die Einspritzmenge um mehr als 5 % im Vergleich zum jeweiligen Neuzustand. In Einzelfällen beträgt die Reduzierung bis zu 25 %. Gleichzeitig zeigt nur ein Injektor eine signifikante Erhöhung der Reaktionszeit (+16 %), wohingegen alle übrigen Injektoren keine auffälligen Änderungen aufweisen.

Insgesamt legen die Ergebnisse die Vermutung nahe, dass dieser Injektortyp unabhängig von dem Kraftstoff sensibel auf äußere Ablagerungen reagiert und weniger stark anfällig für Änderungen der Reaktionszeit ist.

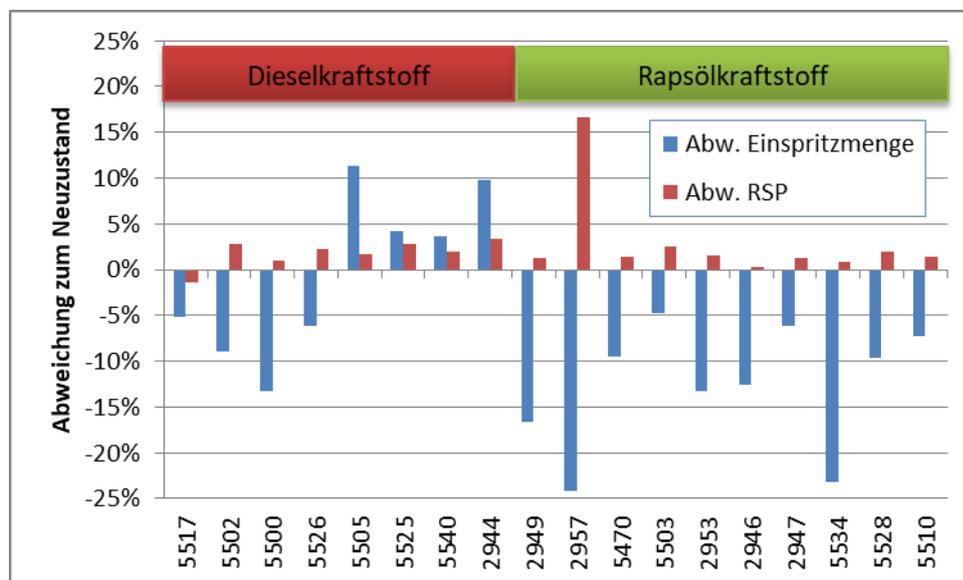


Abbildung 62: Übersicht über die festgestellten Veränderungen der Einspritzcharakteristik der hinsichtlich der Bildung von Ablagerungen untersuchten Bosch-Injektoren

### Vergleich der Versuchsreihen mit Denso- und Bosch-Injektoren

Im Vergleich zu den Denso-Injektoren (vgl. Abbildung 59) weisen die Bosch-Injektoren geringere Veränderungen der Reaktionszeiten, jedoch deutlich größere Abweichungen der Einspritzmengen auf. In der Literatur ist bekannt, dass dies potenziell auf die unterschiedliche Konstruktion zurückzuführen sein kann (II.1.6.1.4). Dies kann in der Praxis dazu führen, dass verschiedene Injektortypen unterschiedlich empfindlich auf die Bildung von Ablagerungen reagieren oder Ablagerungen an anderen Stellen des Injektors und/oder in unterschiedlichem Ausmaß entstehen.

#### **II.1.5.5.2 Reinigungs- und Vermeidungsstrategien**

Aus einem Feldtest wurde vom Partner TFZ ein Satz Denso-Injektoren aus dem Traktor John Deere 6215R (JD-Wö) mit äußerlich sichtbarer Ablagerungsbildung nach rund 505 Bh mit Rapsölkraftstoff bereitgestellt (siehe Kapitel II.1.7.2.2). Vier der insgesamt sechs Injektoren werden im nicht-motorischen Prüfstand gereinigt; die übrigen zwei verschmutzten Injektoren werden der Reinigungsprozedur des Injektorprüfgeräts unterzogen.

- **Injektorregeneration mit Dieselkraftstoff und Additivzugabe im nicht-motorischen Prüfstand**

Die Regenerationsversuche am nicht-motorischen Prüfstand werden wie in Abschnitt II.1.5.4 beschrieben durchgeführt. Der Kraftstoff (frischer Dieselkraftstoff nach EN 590) wurde den Empfehlungen des Partners ERC entsprechend mit 1.000 mg/kg Detergent 2 additiviert. Im Folgenden werden die Veränderungen der Einspritzmengen und der Reaktionszeiten der einzelnen Injektoren nach dem Reinigungsverfahren dargestellt. Die Injektoren *TFZ\_1* bis *TFZ\_4* sind im nicht-motorischen Prüfstand eingesetzt worden.

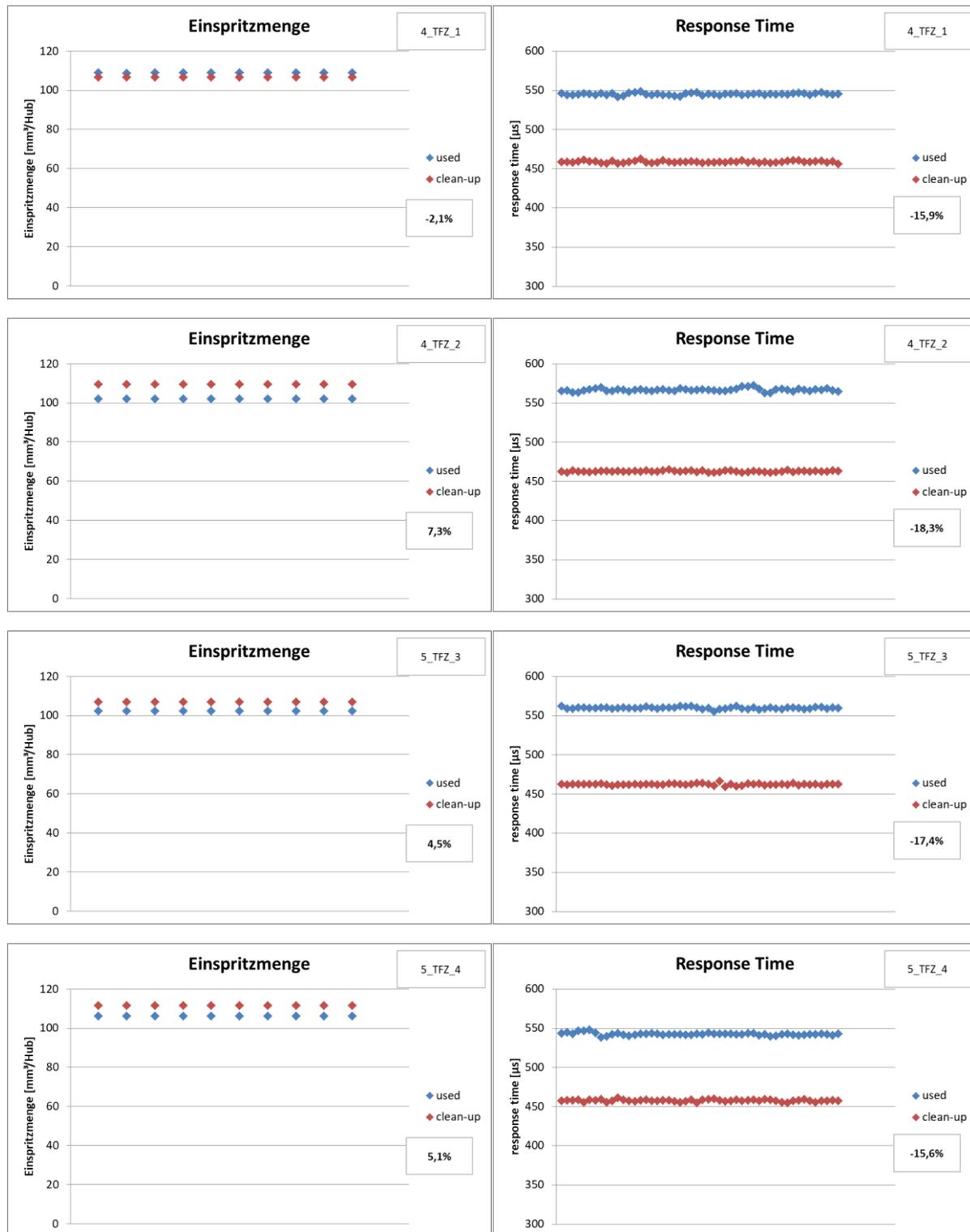


Abbildung 63: Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Feldtest-Injektoren TFZ\_1 bis TFZ\_4 aus dem Traktor John Deere 6215R (JD-Wö); Regenerationsversuch am nicht-motorischen Prüfstand mit Detergent 2 in Dieselkraftstoff

Alle vier im Prüfstand gereinigten Injektoren weisen nach Abschluss des 64-stündigen Reinigungslaufs („clean-up“) eine sehr deutliche Verbesserung der Agilität auf. Die

Reaktionszeiten verbessern sich um ca. 15 - 18 %. In drei von vier Fällen erhöht sich darüber hinaus die Einspritzmenge um etwa 5 - 7 %. Somit ist zum einen festzuhalten, dass die Injektoren während des Feldtests deutliche Beeinträchtigungen der Funktion entwickelt haben. Zum anderen kann die Injektorfunktion mit einer geeigneten Reinigungsstrategie und einem geeigneten Additiv zumindest teilweise wiederhergestellt werden. Die Injektoren sind anschließend zurück an das TFZ gegangen, um die Auswirkungen der Reinigung im Vollmotor zu prüfen.

• **Injektorregeneration am Prüfgerät**

Die Injektoren *TFZ\_5* und *TFZ\_6* haben die Reinigungsprozedur („MACC“) des Injektorprüfgeräts durchlaufen. Aus den Diagrammen (Abbildung 64) ist zu erkennen, dass die Reinigung im Prüfgerät nicht denselben Effekt hat, wie die Reinigung im Prüfstand. Direkt vergleichbar sind die Ergebnisse jedoch nicht, da die Dauer der Reinigungsprozedur im Prüfgerät lediglich 2 h beträgt. Gemessen an dem geringen zeitlichen Aufwand ist eine Verbesserung der Agilität um 1 - 3 % zwar positiv, allerdings ist die Reinigungsleistung hinsichtlich der Reaktionszeit im nicht-motorischen Prüfstand mindestens um den Faktor 5 stärker. Zudem erhöht sich die Einspritzmenge nur marginal, sodass die Reinigungsleistung insgesamt als gering eingeschätzt wird. Die Injektoren sind anschließend zurück an das TFZ gegangen, um die Auswirkungen der Reinigung im Vollmotor zu prüfen.

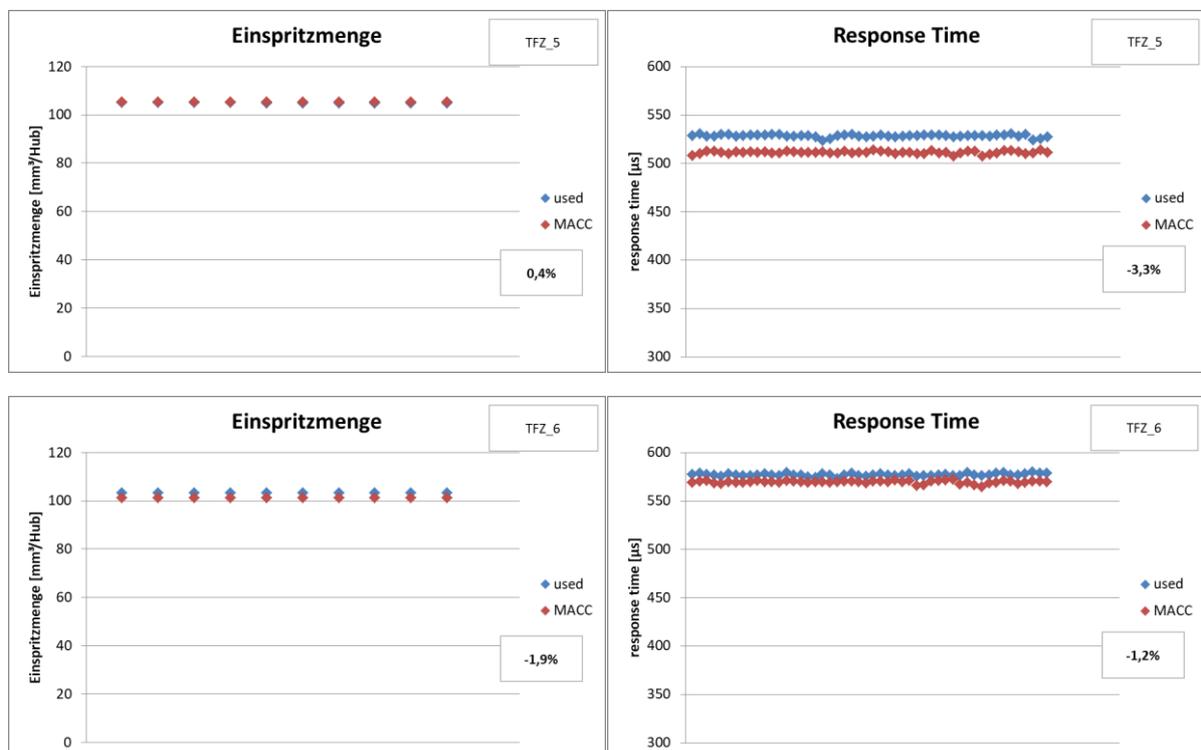


Abbildung 64: Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Feldtest-Injektoren *TFZ\_5* und *TFZ\_6* aus dem Traktor John Deere 6215R (JD-Wö); Regenerationsversuch am Prüfgerät mit Reinigungsfluid

- **Regeneration mit Rapsölkraftstoff und Additivzugabe**

Zwei separate Regenerationsversuche werden am nicht-motorischen Prüfstand durchgeführt. Zum Einsatz kommen insgesamt vier Bosch-Injektoren, die zuvor am OWI einen Prüflauf zur Ablagerungsbildung durchlaufen und Änderungen der Einspritzcharakteristik gezeigt haben. Exemplarisch gezeigt sind im Folgenden die Injektoren #2957 und #5470. In den Diagrammen sind die Einspritzdaten im Neuzustand (*new*), nach dem Prüflauf zur gezielten Ablagerungsbildung (*used*) sowie nach dem Reinigungslauf (*clean-up*) dargestellt (Abbildung 65).

Die Regenerationsversuche werden mit frischem Rapsölkraftstoff durchgeführt, dem in beiden Fällen das Additiv Detergent 1 zugegeben wurde, da bei den ausgewählten Bosch-Injektoren hauptsächlich Hinweise auf äußere Ablagerungen (EDID) beobachtet wurden. Der Regenerationsversuch mit Injektor #2957 erfolgte mit einer Additivkonzentration von 250 mg/kg, der Regenerationsversuch des Injektors #5470 mit 500 mg/kg. Der Ablauf entspricht dem in Abschnitt II.1.5.4 beschriebenen Vorgehen.

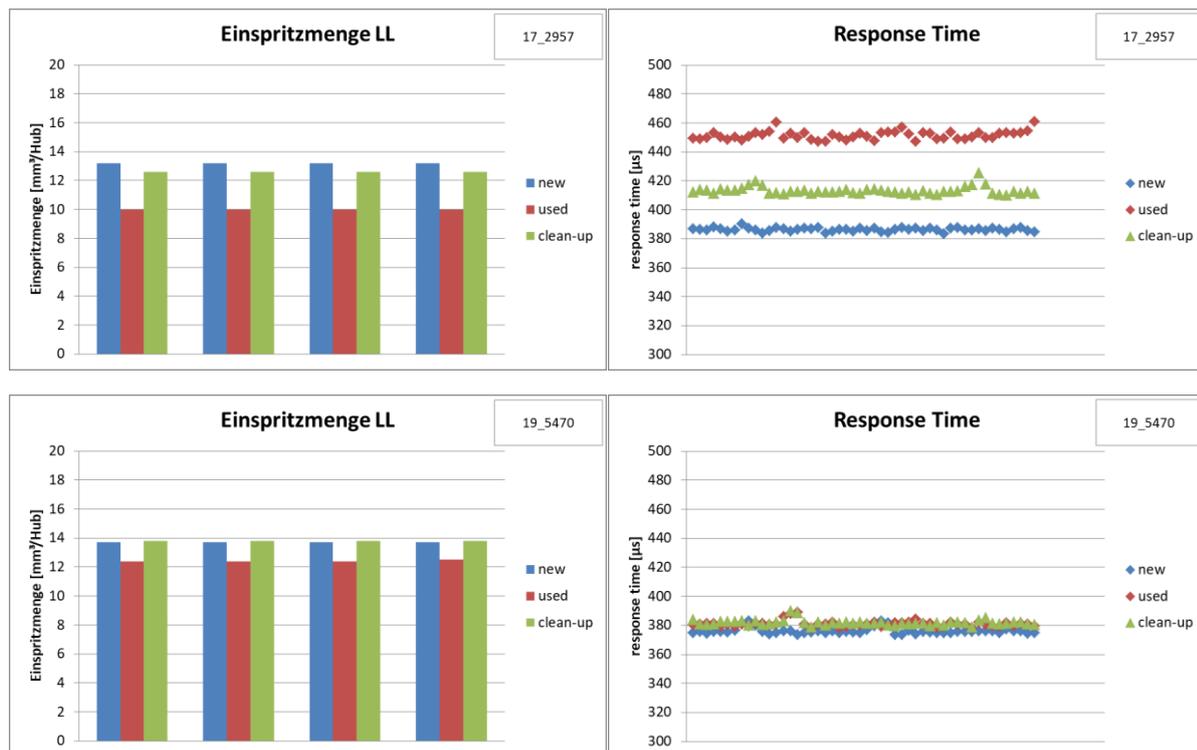


Abbildung 65: Änderungen der Einspritzmengen und Reaktionszeiten der Injektoren #2957 und #5470 nach Durchführung der clean-up-Strategie im nicht-motorischen Prüfstand mit Detergent 1 in Rapsölkraftstoff

In beiden Regenerationsversuchen können Verbesserungen der Einspritzcharakteristik erzielt und mit dem Prüfgerät nachgewiesen werden. Die Einspritzmengen erreichen im Falle beider Injektoren in etwa das Niveau des Neuzustands. Der Injektor #2957 wies nach dem Belastungslauf ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Reaktionszeit auf, die zum großen

Teil nach dem Regenerationslauf wieder abgebaut wird. Hier wird das Ausgangsniveau nicht wieder vollständig erreicht; die Verbesserung nach dem „clean-up“-Reinigungslauf ist dennoch signifikant. Dem Additiv Detergent 1 kann in beiden Fällen eine gute Wirksamkeit attestiert werden. Die gute Wirksamkeit des Additivs stellt einen weiteren Hinweis darauf dar, dass die Funktionsbeeinträchtigungen vorrangig auf äußere Ablagerungen zurückzuführen sind (vgl. Abbildung 62).

- **Vermeidung von Ablagerungsbildung mit Rapsölkraftstoff und Additivzugabe**

Im Rahmen der Entwicklung von Vermeidungsstrategien wird weiterhin der Einsatz einer „keep-clean“-Additivierung untersucht. Hierzu werden dem Rapsölkraftstoff stabilisierende und reinigende Additive in meist geringer Konzentration zugegeben, die die potenzielle Bildung von Ablagerungen verhindern sollen. Aufgrund der guten Ergebnisse zuvor fällt die Wahl auf das Reinigungsadditiv Detergent 1 in Kombination mit dem Antioxidantienpaket *OX 1220 Biofuel*. Beide Additive werden dem Rapsölkraftstoff zu Beginn des Versuchs in einer Konzentration von jeweils 250 mg/kg zugegeben. Die Betriebsweise entspricht der in Abschnitt II.1.5.4 beschriebenen. Exemplarisch seien hier die erzielten Ergebnisse des eingesetzten Bosch-Injektors #2938 gezeigt (Abbildung 66); die übrigen Injektoren weisen vergleichbare Ergebnisse auf.

Die Einspritzmengenmessung nach der Betriebszeit von 180 h zeigt lediglich eine geringe Abnahme. Der Kraftstoffdurchfluss im Niedriglastpunkt („LL“) nimmt um 1,9 % ab; dieser Wert liegt im Bereich der üblichen Streuung und ist daher nicht signifikant. Ebenso verschlechtert sich die Reaktionszeit des Injektors quasi nicht. Wird zusätzlich der Kraftstoffdurchfluss im Volllastpunkt („VL“) betrachtet, zeigt sich auch hier eine geringe Veränderung im Bereich der Messpräzision / Streuung (2 %).

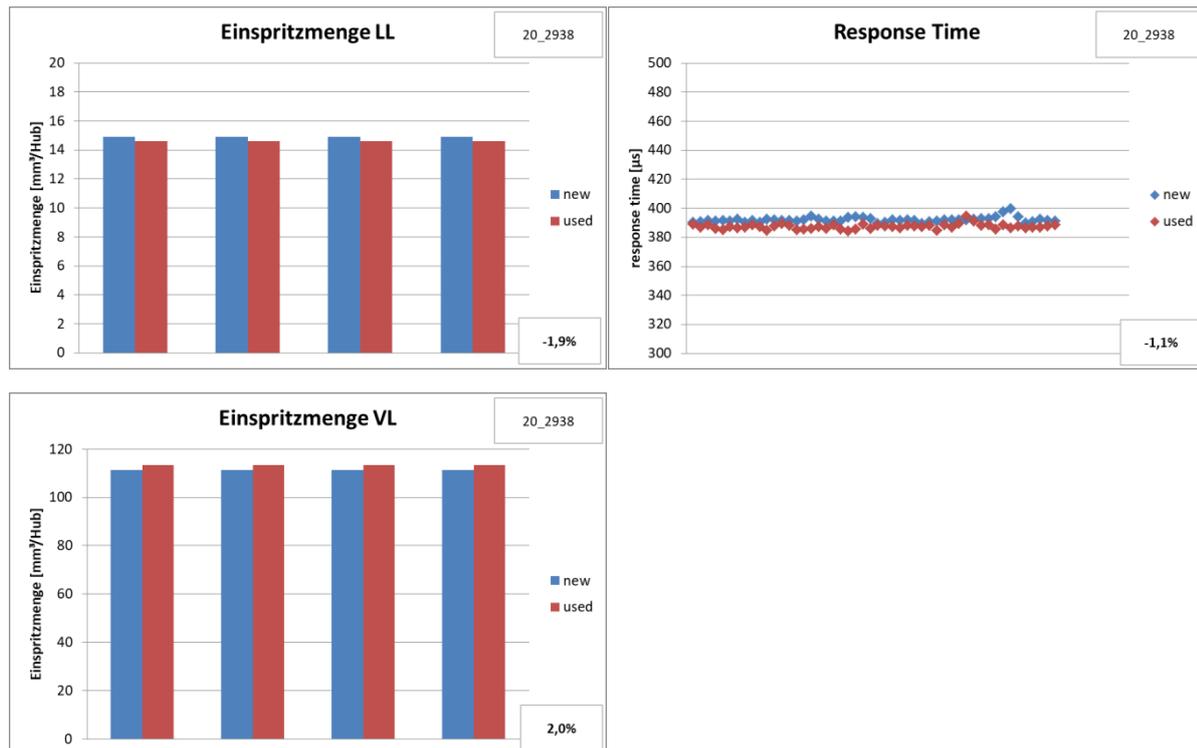


Abbildung 66: Änderungen der Einspritzmenge und Reaktionszeit des Injektors #2938 nach Durchführung der keep-clean-Strategie im nicht-motorischen Prüfstand mit Detergent 1 und Antioxidantienpaket in Rapsölkraftstoff

### II.1.5.6 Fazit

Am OWI wurde ein nicht-motorischer Injektorablagerungsprüfstand entwickelt und aufgebaut, der für den Heavy-Duty-Anwendungsbereich geeignet ist. Die verwendeten Einspritzsystemkomponenten stammen aus zwei pflanzenöлтаuglichen 6-Zylinder Traktormotoren der Abgasstufe IV. Die technische Umsetzung, insbesondere der drehwinkelgesteuerten Steuerung der Hochdruckpumpe, stellte sich als deutlich herausfordernder dar als in der Planungsphase angenommen. Dennoch konnten im Rahmen der Projektlaufzeit umfangreiche Versuchsreihen zur Ablagerungsbildung sowie zu Regenerations- und Vermeidungsstrategien durchgeführt werden.

Die Prüfmethode (Prüfzyklus, Einspritzbedingungen, Düsentemperaturen) wurde unter Beachtung mehrerer Faktoren entwickelt. Zum einen aus veröffentlichter Fachliteratur, zum anderen standen Realdaten aus Feldtests und Vollmotorprüfständen zur Verfügung. Ausgehend von dieser Datengrundlage wurde eine Prüfmethode abgeleitet, die eine Bildung von kraftstoffbedingten Ablagerungen in Injektoren gezielt begünstigt und eine zeitgeraffte Prüfung unter realistischen Bedingungen ermöglicht. Maßgeblich sind hierbei eine zyklische Betriebsweise mit Temperaturwechsel sowie eine hohe (aber realistische) Injektordüsentemperatur. Weniger einflussreich sind der Einspritzdruck sowie die Öffnungsdauer des Injektors.

Mit Hilfe des nicht-motorischen Prüfstands wurden Injektoren innerhalb von 180 h künstlich gealtert, d. h. mit Ablagerungen belegt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde Dieselmotorkraftstoff nach EN 590 und Rapsölmotorkraftstoff nach DIN 51605 eingesetzt. Die aus den Ablagerungen resultierenden Funktionsbeeinträchtigungen konnten mit einem Injektorprüfgerät nachgewiesen werden. Die Bewertung erfolgte anhand der Einspritzmenge pro Hub in einem bestimmten, vom Injektorhersteller vorgegebenen Betriebspunkt, sowie der Bestimmung der Reaktionszeit, d. h. des zeitlichen Versatzes zwischen Bestromungszeitpunkt und Einspritzbeginn. Abhängig von dem eingesetzten Injektortyp wurden mit Hilfe des Prüfgeräts Nachweise für innere und/oder äußere Ablagerungen erbracht. Festgestellt wurden Reduzierungen der Einspritzmenge zwischen 4 % und im Extremfall 25 %. Künstlich gealterte Injektoren führten im Vollmotoreinsatz (beim Partner TFZ) zu einer erwarteten Leistungsminderung.

Neben der gezielten Bildung von Ablagerungen wurden Regenerations- und Vermeidungsstrategien mit Rapsölmotorkraftstoff und Additiveinsatz durchgeführt. Hierzu erfolgte zunächst eine Anpassung der Betriebsweise, da die Reinigung (*clean-up*) in deutlich kürzerer Laufzeit erreicht werden sollte (64 h). Es konnte gezeigt werden, dass zuvor gezielt gealterte Injektoren mit einer geeigneten Additivierung gereinigt werden konnten. Je nach Schwere der Funktionsbeeinträchtigung wurden die Ausgangswerte der Einspritzmenge und der Reaktionszeit vollständig bzw. fast vollständig wiederhergestellt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde das Detergent 2 am nicht-motorischen Prüfstand erfolgreich zur Regeneration von verschmutzten Injektoren aus einem Feldtest eingesetzt. Die Verbesserung betrug bei den Einspritzmengen etwa 4-5 % und bei den Reaktionszeiten etwa 15-18 %. Da für diese Injektoren jedoch die individuellen Ausgangswerte (Einspritzmenge, Reaktionszeit) im Neuzustand unbekannt sind, kann nicht festgestellt werden, inwieweit die ursprünglichen Werte wiederhergestellt werden konnten. Die Verbesserung ist dennoch signifikant, sodass eine Leistungssteigerung des Motors zu erwarten ist.

Abschließend ist eine Vermeidungsstrategie (*keep-clean*) am nicht-motorischen Prüfstand geprüft worden. Die Additivzugabe (Detergent 1 + Antioxidantienpaket) zum eingesetzten Rapsölmotorkraftstoff hat dazu geführt, dass während der üblichen Laufzeit zur gezielten Ablagerungsbildung von 180 h keine signifikanten Ablagerungen in den Injektoren erzeugt wurden.

## **II.1.6 Innere Ablagerungen: Bewertung der Prüfmethodik am Injektorablagerungsprüfstand (AP 4; TEC4FUELS GmbH)**

Die wesentlichen Interessen seitens TEC4FUELS waren einerseits die Unterstützung im Projekt allgemein und die Unterstützung des Parts von OWI im Speziellen. Dies betraf auch einen wesentlichen Beitrag zur Literaturrecherche am Projektbeginn.

Andererseits sollte geprüft werden, ob und wie sich aus den Arbeiten von OWI eine Dienstleistung ableiten lässt. Hierzu war eine wesentliche Vereinfachung des Prüfstandkonzeptes und eine Raffung des Prüfablaufs vorgesehen. Ferner wurde ein wesentlicher Beitrag zur Literaturrecherche am Projektbeginn geleistet. Diese Aufgaben konnten erfolgreich abgeschlossen werden.

### **II.1.6.1 Literaturrecherche und Beitrag von Expertise**

Sowohl im Rahmen der Literaturrecherche zu Beginn des Projektes als auch im Rahmen der technischen Diskussionen innerhalb des Projektes konnte das vertiefte Verständnis hinsichtlich Injektorablagerungen hilfreich in das Projekt eingebracht werden. Dies betraf primär die Unterscheidung äußerer (EDID) und innerer Injektorablagerungen (IDID) und hierbei insbesondere ihre Erkennung. Der Transfer erfolgte sowohl durch die Dissertationsschrift als auch die Expertise von Herrn Dr. Hoffmann. Da IDID erstmals vor etwa 10 Jahren beobachtet wurden und auch dann erst ihre systematische Erforschung begonnen wurde [27], sind Detailinformationen über sie nach wie vor nur in relativ wenigen Quellen verfügbar. Diese behandeln zudem meist nur einen Teilaspekt, sodass eine Zusammenführung sehr hilfreich ist.

Bei der Literaturrecherche und theoretischen Überlegungen ergaben sich deutliche und wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der exakten technischen Auswirkungen von IDID (Internal Diesel Injector Deposits) an sich und im Vergleich zu den bekannten Äußeren Ablagerungen (External Diesel Injector Deposits, EDID). Diese fanden sich bislang in keiner der gesichteten Veröffentlichungen beschrieben, bieten jedoch wesentliche Ansatzpunkte hinsichtlich der möglichen Detektion und Unterscheidung der unterschiedlichen Ablagerungen im Prüfstandsbetrieb. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden ausführlicher dargestellt. Sie wurden ferner in der Dissertationsschrift von Hajo Hoffmann [27] veröffentlicht. Diese war zu Projektbeginn bereits nahezu fertiggestellt, am 02.10.2017 eingereicht und im Mai 2018 veröffentlicht.

#### **II.1.6.1.1 Funktionsweise von Magnetventilinjektoren und Auswirkungen von IDID**

Für das Verständnis der Auswirkungen von IDID wird im Folgenden kurz die Funktionsweise eines modernen Common-Rail-Magnetventilinjektors dargestellt.

In einem modernen Magnetventilinjektor wird die Injektornadel nicht direkt vom Elektromagneten bewegt. Stattdessen schaltet das Magnetventil einen Servokreislauf, welcher die Injektornadel bewegt [8][42][54][55][41]. Abbildung 67 zeigt die Schnittzeichnung eines Magnetventilinjektors.

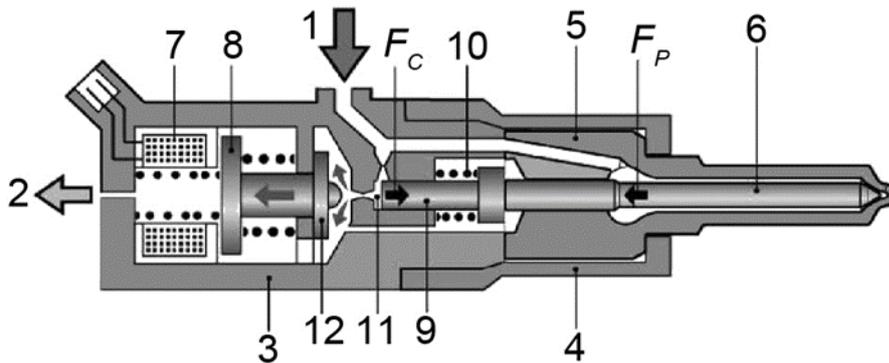


Abbildung 67: Schnittzeichnung und Funktion eines Magnetventilinjektors: 1 Hochdruckzulauf; 2 Kraft-stoffrücklauf (Steuer-/ Leckagemenge); 3 Injektorkörper; 4 Düsenspannmutter; 5 Düse; 6 Injektornadel; 7 Magnetspule; 8 Ventilan-ker; 9 Druckstange; 10 Rückstellfeder; 11 Steuerkammer; 12 Steuerventil;  $F_C$  Schließkraft;  $F_P$  durch Druck hervorgerufene Öffnungskraft [23][42].

Die Bewegung der Injektornadel bestimmt sich aus dem Verhältnis der beiden Kräfte  $F_C$  (Schließkraft) und  $F_P$  (durch Druck hervorgerufene Öffnungskraft).  $F_C$  besteht hier bei aus der durch den Druck in der Steuerkammer (11) hervorgerufenen Kraft und der Federkraft der Rückstellfeder (10) [54].

Der Kraftstoff strömt über den Hochdruckzulauf mit nahezu Raildruck in den Injektor und fließt sowohl in die Steuerkammer (6) oberhalb der Injektornadel als auch in eine Kammer, die die Injektornadel umschließt. Der Zufluss zur Steuerkammer wird durch eine Zulaufdrossel eingeschränkt. Ist nun die Magnetspule (7) nicht bestromt, so ist das Steuerventil (12) geschlossen.  $F_C$  ist in diesem Fall deutlich größer als  $F_P$  und die Nadel hält die Düse geschlossen. Wird die Magnetspule (7) bestromt, so öffnet sich das Steuerventil (12) und der Kraftstoff kann als so genannte Rücklauf- oder Leckagemenge (2) aus der Steuerkammer (11) abfließen. Die Öffnung des Steuerventils (12) ist größer als die der Zulaufdrossel, sodass der Druck in der Steuerkammer (11) abnimmt. Mit abnehmendem Druck in der Steuerkammer sinkt auch die Schließkraft  $F_C$ , während die Öffnungskraft  $F_P$  annähernd konstant bleibt. Ist schließlich  $F_P$  größer als  $F_C$ , bewegt sich die Injektornadel durch die Einwirkung von  $F_P$ . Der Injektor ist nun offen und die Einspritzung beginnt. Sowie die Magnetspule (7) nicht mehr bestromt wird, schließt das Steuerventil und der Druck in der Steuerkammer steigt wieder auf nahezu Raildruck an.  $F_C$  ist nun wieder deutlich größer als  $F_P$  und der Injektor schließt wieder [54].

Die Nadelbewegung wird also ausschließlich durch die Differenz zwischen  $F_C$  und  $F_P$  bestimmt, die wiederum maßgeblich vom Raildruck abhängt. Die Injektorfunktion ist daher bei hohem Raildruck resistenter gegen Störungen, da in diesem Fall die Stellkräfte höher sind als bei niedrigem Raildruck.

Störungen der Injektorfunktion, die im Betrieb auftreten, können prinzipiell drei Ursachen haben:

1. Elektrische Störungen
2. Ablagerungen an der Düsen Spitze oder im Düsenloch
3. Ablagerungen im Injektorinneren (z.B. an der Düsennadel, der Druckstange oder am Elektromagneten)

Eine naheliegende elektrische Störung ist die Überhitzung der Magnetspule, die üblicherweise zu einem Kurzschluss führt und das Magnetventil außer Betrieb setzt. Der Injektor bleibt in diesem Fall dauerhaft geschlossen.

Ablagerungen an der Düsen Spitze oder im Düsenloch [49], auch „äußere Ablagerungen“ oder „EDID“ (external diesel injector deposits) genannt, bewirken eine Verringerung des eingespritzten Massenstroms und können zudem das Spraybild verschlechtern. Die typische Auswirkung auf die Motorfunktion ist eine generelle Abnahme des Drehmoments (und der Leistung) und meist, jedoch nicht zwingend, eine Zunahme der Schadstoffemissionen [11][60].

Ablagerungen im Injektorinneren, auch IDID (internal diesel injector deposits) genannt, sind generell Ablagerungen im Injektorinneren, insbesondere an der Ankerspule, der Druckstange und der Injektornadel [49][50][62]. Die konkreten Auswirkungen der IDID auf die Injektorfunktion hängen im Wesentlichen von dem Ort ihres Auftretens ab (siehe Kapitel II.1.6.1.2). Die allgemeine und häufigste Auswirkung ist eine verzögerte Reaktion des Injektors aufgrund von Verklebungen der beweglichen Teile [49]. Eine verzögerte Reaktion führt zum Verlust der Kontrolle über die exakten Timings und/oder der eingespritzten Menge [49][62].

#### **II.1.6.1.2 Innere Ablagerungen (IDID): Allgemeine technische Aspekte**

Abbildung 68 zeigt die Einspritzratenmessungen zweier mit IDID belasteten Injektoren als Beispiel für die Auswirkung auf die Injektorfunktion. Im linken Beispiel wird die maximale Einspritzrate nicht erreicht. Gleichzeitig reagiert der Injektor verzögert. Während das Öffnen pünktlich erfolgt, ist das Schließen verzögert. Durch diesen Umstand ist die maximale Einspritzrate zwar deutlich verringert, die eingespritzte Menge jedoch nur um 1,6 % und somit deutlich innerhalb der Herstellertoleranz ( $\pm 6\%$ ). Rechts ist ein Beispiel für ein verzögertes Öffnen einer Piloteinspritzung. Da das Schließen pünktlich ist, ist die eingespritzte Kraftstoffmenge deutlich verringert und erreicht nur noch 38 % der Sollmenge. Im motorischen Betrieb hätte diese Pilotmenge vermutlich nicht mehr gezündet, was entweder zu einer markanteren Verbrennung der Haupteinspritzung oder zum Ausbleiben der Verbrennung geführt hätte. Beides wird vom Fahrer als unrunder Leerlauf wahrgenommen [27].

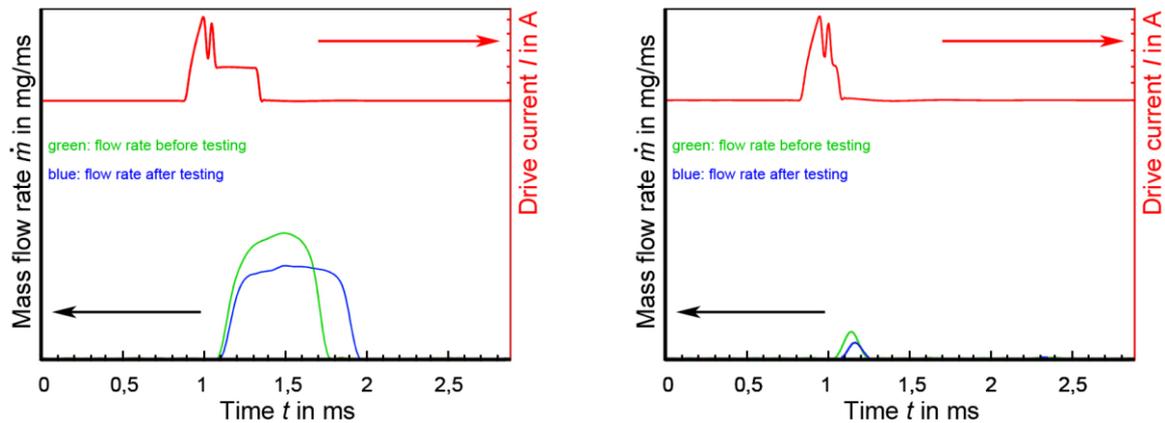


Abbildung 68: Einspritzratenmessung eines Injektors im Neuzustand (grün) und mit IDID (blau). Links: mittlere Last (mittlerer Raildruck), Haupteinspritzung; rechts: Leerlauf (niedriger Raildruck), Piloteinspritzung [27]

Abbildung 69 zeigt die Einspritzratenmessung einer Haupteinspritzung bei Vollast. Sowohl Öffnen als auch Schließen sind leicht verzögert, was dazu führt, dass die eingespritzte Menge zwar korrekt ist, aber die Einspritzung insgesamt leicht verzögert erfolgt. Der betroffene Injektor zeigte dieses Verhalten in sämtlichen vermessenen Lastpunkten [27].

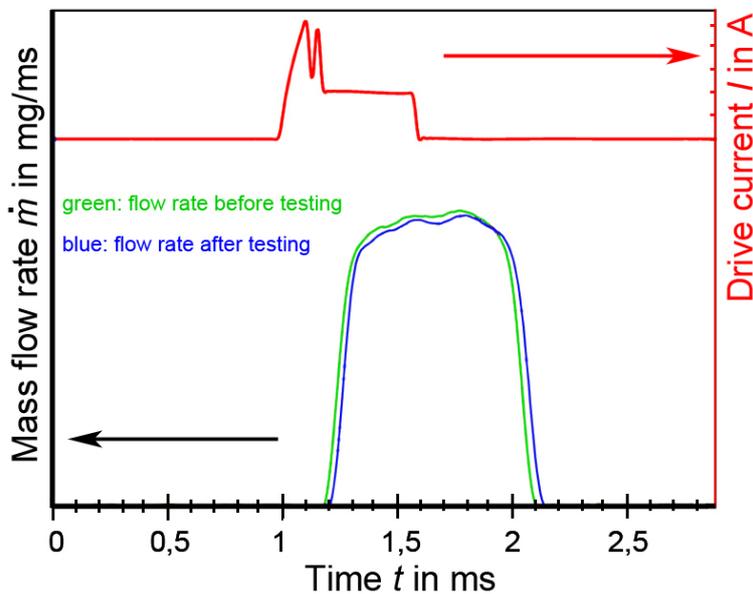


Abbildung 69: Einspritzratenmessung eines Volllastpunktes für einen mit IDID belasteten Injektor im Vergleich zum Neuzustand. Sowohl Öffnen als auch Schließen sind leicht verzögert [27]

Diese Beispiele verdeutlichen eine der Herausforderungen bei der Untersuchung von IDID. Obwohl alle Injektoren unter gleichen Bedingungen mit dem gleichen Kraftstoff betrieben wurden und auch alle deutliche Anzeichen für IDID aufweisen, unterscheidet sich die Auswirkung der IDID auf die Injektorfunktion erheblich. Es ist nachvollziehbar, dass

---

IDID, die ausschließlich zu einem verzögerten Schließen des Injektors führen (Beispielsweise durch Ablagerungen an der Zulaufdrossel zur Steuerkammer), zu einem Motorschaden führen können, wenn die tatsächlich eingespritzte Kraftstoffmenge deutlich höher ist als die vorgesehene [62].

Jegliche IDID, die die Bewegung der Druckstange oder der Injektornadel behindert, tritt bei niedrigen Lastpunkten deutlicher zutage als bei hohen Lastpunkten, da die Stellkraft, die diese Bauteilbewegungen bewirkt, durch den Raildruck erzeugt wird (Kapitel II.1.6.1.1). Zudem treten sämtliche Auswirkungen durch verzögerte Reaktionen des Injektors bei kurzen Einspritzungen wie Piloteinspritzungen oder Emissionseinspritzungen deutlicher zutage als bei Haupteinspritzungen, sofern die maximale Einspritzrate nach wie vor erreicht wird. Im Fahrzeugbetrieb nimmt der Fahrer Störungen durch IDID daher eher in Form eines unruhigen Leerlaufs oder/und Startschwierigkeiten wahr und nicht, wie bei äußeren Ablagerungen, durch einen Drehmomentverlust bei Vollast [2][50]. Die schlimmste denkbare Auswirkung von IDID ist ein komplettes Blockieren eines der beweglichen Teile, was den Injektor vollständig außer Funktion setzt. Wenn der Injektor offen blockiert, kann dies sogar zu einem kapitalen Motorschaden führen [27].

#### **II.1.6.1.3 Auswirkung von IDID auf die Injektorfunktion abhängig vom Ort ihres Auftretens**

Die Auswirkungen von IDID auf die Injektorfunktion hängen stark vom Ort ihres Auftretens ab. Abbildung 70 zeigt die vier wesentlichen Funktionsbereiche eines Injektors. IDID können auch in mehreren dieser Bereiche gleichzeitig auftreten und wirken. Für die folgenden Erläuterungen der Auswirkungen wird jedoch der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass sie jeweils nur in einem Bereich auftreten.

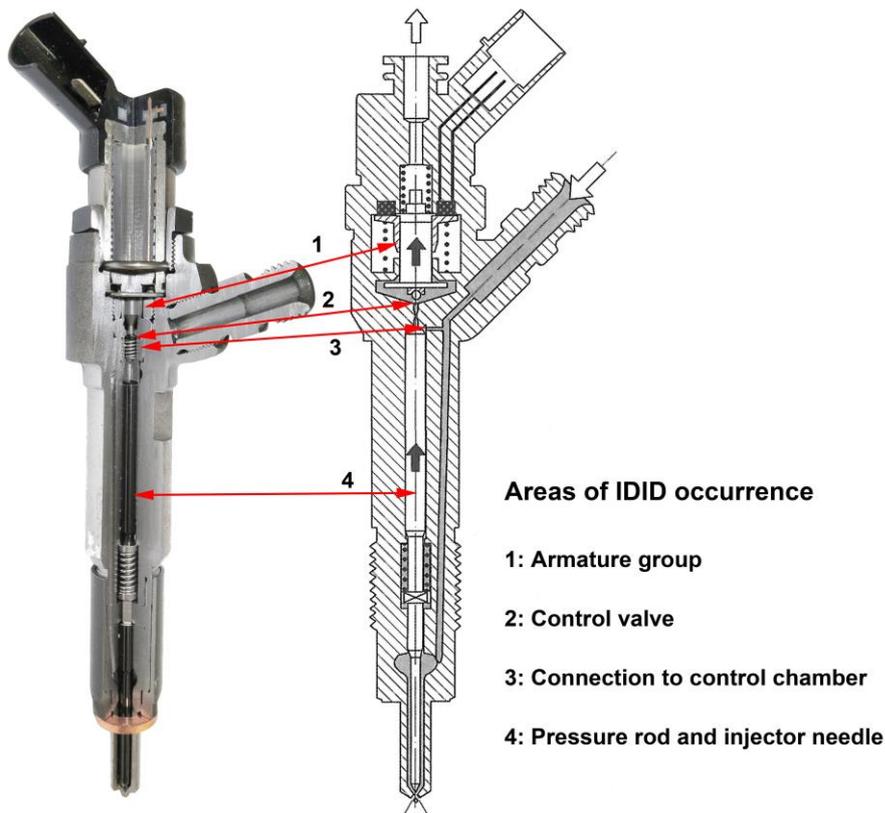


Abbildung 70: Wesentliche Funktionsbereiche, in denen das Auftreten von IDID einen wesentlichen Einfluss auf die Injektorfunktion hat (Darstellung nach [27]; Quelle des linken Fotos:[29]; Schnittzeichnung rechts: [8]).

Jegliche Ablagerung am Anker oder an der Spule (armature group, 1) können die Bewegung des Ankers behindern oder sogar verhindern und haben daher einen direkten Einfluss auf die Aktivierung des hydraulischen Servokreislaufes. Dieser Einfluss ist, da er den Servokreis ansteuert und nicht von ihm angesteuert wird, unabhängig vom aktuellen Raildruck. Die wahrscheinlichste Auswirkung ist eine verzögerte Reaktion auf jeglichen Steuerbefehl, also sowohl verzögertes Öffnen als auch verzögertes Schließen. Im schlimmsten Fall blockiert das Magnetventil vollständig, wodurch der Injektor seine Funktion vollständig verliert. Da die Bewegung des Ankers in der Magnetspule einen Stromfluss induziert, kann die Ankerbewegung im Ansteuersignal gemessen werden. Ferner können IDID den Querschnitt der Öffnungen zur Steuerkammer verringern. Wird der Querschnitt des Steuerventils (2) verringert, so fällt nach dem Öffnen des Ventils der Druck in der Steuerkammer langsamer ab. Das Öffnen des Injektors ist in diesem Fall nahezu unabhängig vom Raildruck verzögert, während das Schließen pünktlich erfolgt. Ist hingegen die Zulaufdrossel zur Steuerkammer (3) betroffen, so erfolgt der Druckausgleich nach dem Schließen des Magnetventils langsamer. In diesem Fall öffnet der Injektor pünktlich, aber schließt verzögert. Dies ist wiederum im Wesentlichen unabhängig vom Raildruck. IDID auf der Druckstange oder der Injektornadel (4) behindern die Bewegung der Düsenadel. Da die Stellkräfte vom Raildruck abhängen, tritt dieser Effekt bei geringer Last (niedriger Raildruck) deutlicher zutage als bei hoher Last (hoher Raildruck) [27].

#### II.1.6.1.4 Einfluss des verwendeten Injektortyps

Die Unterschiede im Injektordesign führen zu unterschiedlichen Bedingungen im Injektorinneren. Dies ist zwar nur ein indirekter Einfluss, dennoch ist es gerechtfertigt, von einem Einfluss des verwendeten Injektortyps auf die Bildung von IDID zu sprechen. Es ergeben sich sechs Design Aspekte, die einen Einfluss auf die Bildung von IDID haben:

1. Höhere Einspritzdrücke führen durch höhere Reibung und Verluste der Hochdruckpumpe zu einer höheren Kraftstoffeintrittstemperatur. Zudem wird bei der Einspritzung, also bei der Entspannung direkt an der Düsenspitze eine höhere Wärmemenge freigesetzt und somit eine höhere Temperatur erreicht<sup>1</sup>. Insgesamt ergibt sich also eine höhere Temperatur im Injektorinneren, was die Ablagerungsbildungskinetik begünstigt.

Zudem sinken in der Regel mit steigendem Druck die Spaltmaße im Injektorinneren, wodurch der Injektor empfindlicher auf Ablagerungsschichten reagiert (Punkt 4).

2. Positionen der Einzelkomponenten, insbesondere des Magnetventils: Je näher die entsprechenden Komponenten an der Düsenspitze liegen, umso höher ist die Temperatur an und in ihnen. Die Positionierung des Magnetventils näher an der Düsennadel bietet kinetische Vorteile durch eine Verringerung der bewegten Massen (keine Druckstange). Hierdurch liegt das Magnetventil jedoch deutlich näher am Ort des Wärmeeintrags, der Düsenspitze, siehe Abbildung 71.

3. Leckagemengen: Ein steigender Leckagemengenstrom hat zwei gegenläufige Auswirkungen. Einerseits erhöht er den Kraftstoffstrom durch den Injektor, was diesen kühlt. Andererseits wird der erwärmte Kraftstoff entweder in die Hochdruckpumpe oder in den Kraftstofftank zurückgeführt, wodurch die Kraftstoffzulauftemperatur mit der Zeit steigt. Durch die Verluste während der Kompression wird die Temperatur in Summe steigen, sofern die Abkühlung des Leckagestroms vernachlässigt werden kann. Zumindest fällt erneut bei der Entspannung des Kraftstoffs am Leckagemengenventil eine starke Temperaturerhöhung an 1, wodurch das Magnetventil stark erhitzt wird. Die Temperatur kann in diesem Bereich auf bis zu 180 °C steigen [2].

4. Sofern die bewegten Teile mit engeren Passungen ausgeführt werden, also geringere Spaltmaße vorliegen, sind sie auch anfälliger gegenüber Störungen durch Ablagerungsschichten.

5. Die Wahl des Ventiltyps: Piezoinjektoren verfügen über eine höhere Stellkraft und sind dadurch in der Regel weniger anfällig gegenüber IDID.

6. Unterschiede in den verwendeten Materialien, Oberflächengüten und Strömungsbedingungen im Injektor führen auch zu unterschiedlichen Bedingungen für die Entstehung von IDID.

---

Bei hohen Drücken und/ oder Temperaturen ist der Joule-Thompson Koeffizient negativ, wodurch bei der Entspannung eines Fluids Wärme freigesetzt wird [35]. Bei 1.600 bar sind dies bereits ca. 100 K Temperaturerhöhung des Dieselkraftstoffs [27]

Die ersten drei Punkte beschreiben Einflüsse auf die Menge der entstandenen IDID und werden vornehmlich durch die Temperatur bestimmt. Punkt 4 und 5 adressieren die Anfälligkeit auf Fehlfunktionen durch Ablagerungen. Der letzte Punkt beschreibt Bedingungen für die Anhaftung und das Wachstum von IDID.

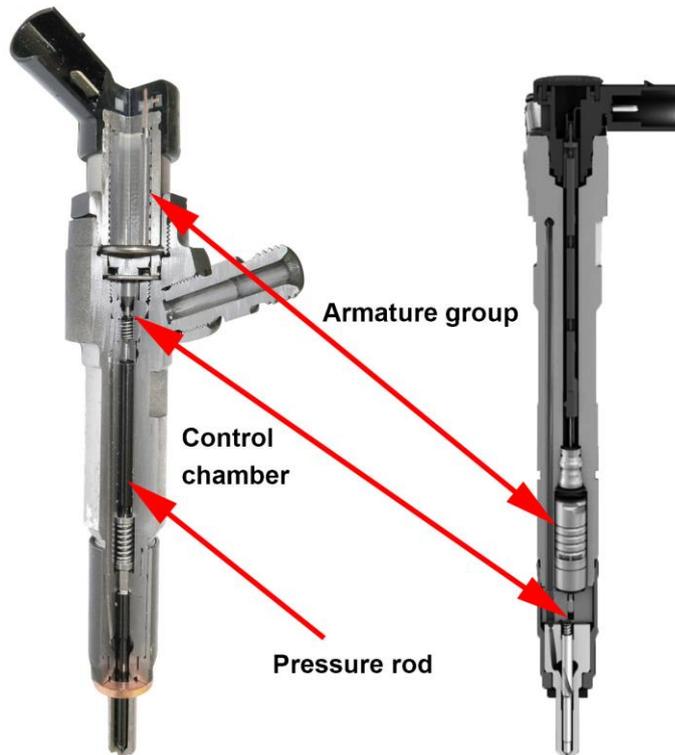


Abbildung 71: Unterschiedliches Injektordesign: Bosch (rechts, Foto: ERC) u. Delphi (links, [29]).

Im Anschluss des ENIAK-Projektes wurden im Rahmen der Promotionsarbeit noch Vergleichsmessungen unter gleichen Bedingungen und mit dem gleichen Kraftstoff, aber mit einem anderen Injektortyp durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass der im ENIAK-Projekt verwendete Injektortyp stets mit IDID, dafür aber kaum mit EDID belastet war; der andere hingegen zeigte keinerlei Anzeichen von IDID, aber deutliche Anzeichen von EDID. Abbildung 72 zeigt den Einspritzratenverlauf eines der entsprechenden Injektoren.

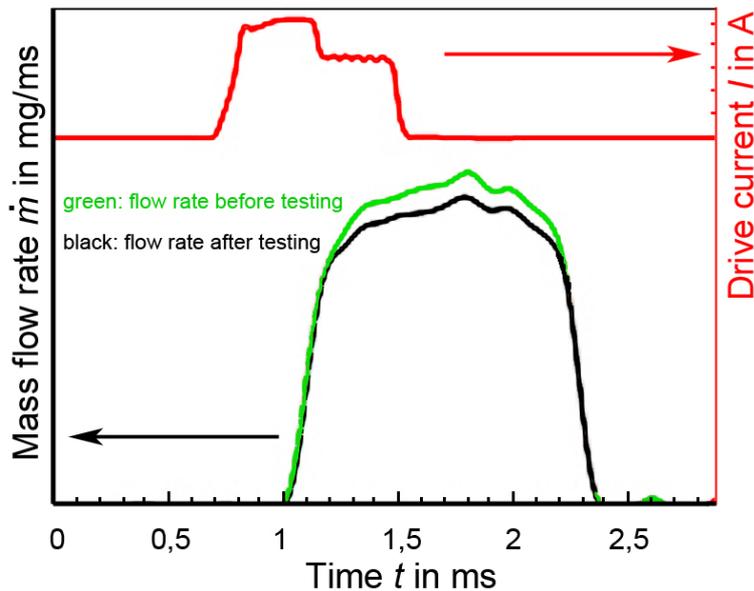


Abbildung 72: Klare Auswirkungen äußerer Injektorablagerungen (verringerte maximale Einspritzrate) ohne jegliche Anzeichen innerer Ablagerungen (die Timings werden exakt eingehalten). Im ENIAK Projekt wiesen sämtliche Injektoren (anderer Injektortyp) nach gleichen Versuchsbedingungen deutliche Anzeichen für IDID auf [27].

#### II.1.6.1.5 Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Entstehung von IDID

Der direkte Einfluss der Betriebsbedingungen des Motors auf die Ablagerungsbildung ist nicht eindeutig geklärt. Die durch die Düse fließende Kraftstoffmenge und die Anzahl der Nadelbewegungen hängen von den Betriebsbedingungen ab. Eine gezielte Untersuchung, ob ein hoher Durchfluss die IDID-Bildung fördert (da mehr potenzielles Ablagerungsmaterial zur Verfügung steht) oder ein niedriger Durchfluss (aufgrund der höheren Aufenthaltszeit), ist nicht bekannt [27]. Crusius et al. haben das Ergebnis eines Versuchslaufs veröffentlicht, bei dem eine höhere eingespritzte Menge je Nadelhub unter ansonsten gleichen Bedingungen zu einer höheren Ablagerungsmenge führte. Sie wiesen jedoch ebenfalls darauf hin, dass dieser Effekt deutlich geringer war als der Einfluss der Kraftstofftemperatur [7].

Die indirekten Einflüsse sind klarer. Ein hoher Lastpunkt führt zu hohem Einspritzdruck und großer Leistung. Beides führt zu einem erhöhten Temperaturniveau im Injektorinneren. Längerer Betrieb auf einem hohen Lastniveau führt ferner zu einem Anstieg der Kraftstoffeintrittstemperatur, da der Rücklauf des Injektors und auch der Hochdruckpumpe den Kraftstoffvorrat aufheizen. Abbildung 73 verdeutlicht die Zusammenhänge.

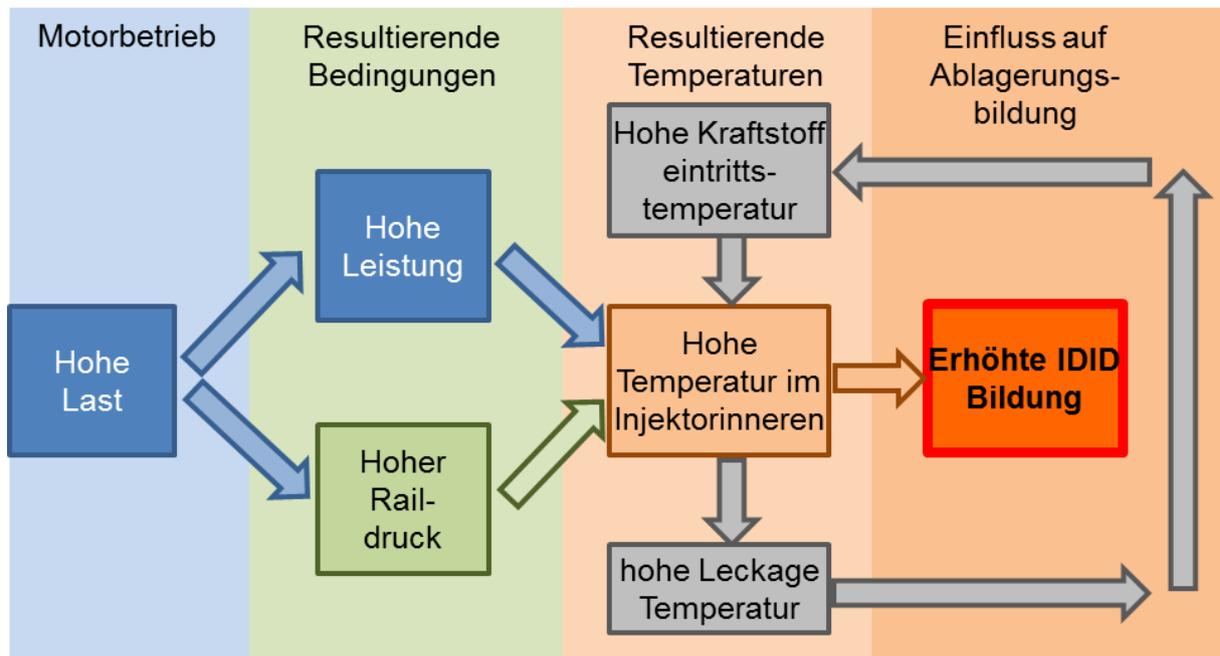


Abbildung 73: Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Bildung von IDID nach [27].

#### II.1.6.1.6 Injektordiagnose durch Einspritzratenmessung

Der Vergleich des ursprünglichen Einspritzratenverlaufs zu dem nach Versuchsende eröffnet die Möglichkeit zur eindeutigen Identifikation von Ablagerungen und zur Differenzierung zwischen inneren (IDID) und äußeren Ablagerungen (EDID). Eine solche klare Unterscheidung ist während des Betriebs des Einspritzsystemprüfstands in der Regel nicht möglich [27].

EDID können typischerweise durch eine Durchflussmessung identifiziert und quantifiziert werden. Hierzu wird in der Regel ein Betriebspunkt mit hohem Einspritzdruck und langer Injektorbestromungsdauer gewählt, um die eingespritzte Kraftstoffmenge über eine definierte Zeit gemittelt als Kraftstoffmassen- oder Kraftstoffvolumenstrom zu bestimmen. Ist nun der Düsenöffnungsquerschnitt durch Ablagerungen verringert, kann die maximale Einspritzrate nicht mehr erreicht werden und die pro Arbeitsspiel eingespritzte Menge verringert sich. Hierdurch sinkt auch der gemittelte Kraftstoffmengenstrom. Im motorischen Betrieb führt dies zu einer Verringerung des maximalen Drehmoments und der maximalen Leistung. Für kürzere Bestromungszeiten ist dies jedoch nicht zwangsläufig der Fall. In Betriebspunkten mit kurzen Bestromungszeiten und niedrigen Einspritzdrücken, wie sie zum Beispiel bei Piloteinspritzungen im Leerlauf vorliegen, öffnen moderne Injektoren nicht vollständig. In diesem Fall kann die ablagerungsbedingte Querschnittsabnahme ohne messbaren Einfluss auf die gemessene Einspritzmenge sein [27].

Dies gilt jedoch üblicherweise nicht für innere Ablagerungen (IDID). IDID haben in den meisten Fällen keinen Einfluss auf die erreichbare maximale Einspritzrate. Sie haben jedoch in der Regel einen Einfluss auf die Reaktionszeit des Injektors. Übliche Auswirkungen von IDID sind daher ein verzögertes Öffnen, ein verzögertes Schließen des Injektors

oder beides. Durch die Servosteuerung des Injektors haben alle IDID, die die Bewegung der Druckstange oder der Injektornadel behindern einen geringeren oder sogar überhaupt keine Auswirkung auf die Injektorfunktion bei hohem Einspritzdruck, da dieser auch zu einer höheren Stellkraft führt [27].

Der dritte mögliche Fall ist das gleichzeitige Auftreten sowohl von IDID als auch von EDID. Im Volllastpunkt kommt lediglich die Reduktion der maximalen Einspritzrate zum Tragen. Je nach Schweregrad der IDID kommen diese bereits bei mittlerem Einspritzdruck zum Tragen, beispielsweise durch verzögerten Einspritzbeginn. Wenn der Injektor nun pünktlich schließt, ist die eingespritzte Menge (zusätzlich zu der durch EDID bewirkten Reduktion) geringer. Der Einfluss bezogen auf die Gesamtmenge ist bei kurzen Einspritzungen, z.B. bei Pilotmengen, deutlich größer. Allerdings öffnen schwer von IDID betroffene Injektoren bei kurzen Injektionen bei niedrigem Druck häufig überhaupt nicht mehr [27].

Diese Ausführungen zeigen, dass die Detektion von IDID durch eine Messung des Kraftstoffmassenstroms in einem Einspritzsystemprüfstand bei niedrigen Einspritzdrücken und kurzen Injektorbestromungszeiten prinzipiell möglich ist. Die Bestimmung der exakten Auswirkungen auf die Injektorfunktion, also eine Quantifizierung der Verzögerung des Öffnens oder Schließens ist jedoch nicht möglich. Es ist sogar denkbar, dass sowohl Öffnen als auch Schließen gleichzeitig und in vergleichbarem Maße verzögert sind. In diesem speziellen Fall können IDID nicht durch eine einfache Durchflussmessung detektiert werden, da die eingespritzte Menge korrekt, aber verzögert ist [27].

### **II.1.6.2 Erfahrungen aus der Prüfstandsentwicklung**

Es zeigten sich bei der Prüfstandsauslegung durch OWI wesentliche Unterschiede zwischen den betrachteten Heavy-Duty-Common-Rail Systemen und den im Hause bekannten PKW-Systemen. Die im SAVEbio Projekt betrachteten Systeme verfügen beide unter anderem über einen Hochdruckanschluss durch ein aufgepresstes Hochdruckrohr im Vergleich zu den im PKW-Bereich üblichen Überwurfmuttern. Ferner haben die Injektordüsen unterschiedliche Geometrien, insbesondere eine unterschiedliche Länge. Aber auch die Positionen der Injektoröffnungen für den Hochdruckanschluss und den Leckagemengensanschluss sowie der Injektor Durchmesser unterscheiden sich deutlich. Ferner bedingten die Winkelgesteuerten Hochdruckpumpen sowie die Ansteuerung von einen sechs Injektoren erhöhten Aufwand bereits bei der Ansteuerung des Railsystems (> 20.000 EUR). Als übergeordnete Prüfstandssteuerung musste, um flexibel die unterschiedlichen Fragestellungen und die Mesdatenerfassung abdecken zu können, auf eine NI Prozessorsteuerung mit diversen Erweiterungsmodulen zurückgegriffen werden. Eine solche Steuerung schlägt erfahrungsgemäß wiederum mit ca. 10.000 EUR zu Buche.

Auf die vorgesehenen potenziellen Dienstleistungen bei TEC4FUELS ergeben sich hierdurch deutlich andere Rahmenbedingungen, die berücksichtigt werden müssen. Es wurde daher verstärkt nach einfacheren und variableren Lösungen gesucht und andere Ansätze verfolgt. Hierbei kommt zugute, dass für die meisten Dienstleistungen eine geringere Detailschärfe als für ein Forschungsprojekt angesetzt werden kann. Die Erfahrungen innerhalb des Projektes erwiesen sich hierbei als sehr hilfreich. So musste z.B. für das am OWI

vorhandene Injektordiagnosegerät der Firma Leitenberger ein Anschlussadapter erworben werden. Dieser gleicht einer Manschette und ermöglicht den Anschluss der Leckage- und Hochdruckleitung an den Injektor, jedoch ohne den Injektor und insbesondere die Düse vollständig einzuspannen. Hierdurch können Kraftstoffanschlüsse und Düse voneinander entkoppelt werden, wodurch generell das bekannte vergleichsweise einfache Heizblockkonzept des ENIAK-Projektes angewendet werden kann.



*Abbildung 74: links: Anschlussadapter der Firma Leitenberger. Die Düse (unten) ist frei zugänglich und kann in einen Heizblock eingebracht werden, vergleichbar zu dem im Projekt „ENIAK“ eingesetzten Konzept (rechts).*

Dies bedingt nach wie vor eine Anpassung auf jeden zu untersuchenden Injektortyp, jedoch ist nun eine variable und vergleichsweise leicht zu quantifizierende Lösung verfügbar.

Die geringere Detailschärfe ermöglichte weitere Vereinfachungen. Während im Forschungsansatz der Einsatz eines vollständigen Systems der Komponenten eines realen Fahrzeugs angewendet werden muss, ist dies in Dienstleistungsaufträgen häufig nicht der Fall. So sind zum Beispiel für die vergleichende Untersuchung von Basisdiesel zu mit Reinigungsadditiven versetztem Diesel hinsichtlich Injektorablagerungen primär vergleichbare Versuchsbedingungen und die Injektoren als solche wichtig, nicht jedoch die Peripheriekomponenten. Zudem wird bei den potenziellen Dienstleistungen auf den Einsatz von mehr als einem Injektor je Rail verzichtet, wodurch auch der Bedarf an Kraftstoff je Test deutlich sinkt. Ferner ist die Erreichung und der Einsatz des Spitzendrucks (aktuell 2.500-2.700 bar) von untergeordneter Bedeutung, sofern die resultierende Düsenspannung und die geringen Spaltmaße im Injektor dennoch eingestellt werden [27]. Insofern kann problemlos ein technisch deutlich weniger aufwändiges Hochdrucksystem (Druckregelung winkelunabhängig über ein Stellventil, die "metering unit") eines typischen EURO V PKW mit 1.800 bar genutzt werden, um einen hochmodernen Heavy-Duty Injektor (der im Realsystem mit bis zu 2.700 bar Spitzendruck betrieben wird) kontinuierlich bei 1.300 bar Druck mit Kraftstoff zu versorgen. Die geringere Fördermenge des PKW-Systems wird durch die Testung von nur einem Injektor je Rail mehr als kompensiert. Insgesamt lässt

sich so ein deutlich einfacherer, aber für typische potenzielle Dienstleistungen (Injektorvergleich mit gleichem Kraftstoff oder Kraftstoffvergleich mit gleichem Injektor) vollkommen adäquater Prüfstand konzipieren. Eine erste entsprechende Umsetzung ist bereits während der Projektlaufzeit an der TEC4FUELS erfolgt und wird im folgenden Unterkapitel näher beschrieben.

### **II.1.6.3 Aufbau Heavy-Duty-CoCoS Prüfstand**

Zur Abgrenzung der Arbeiten am OWI und zur Prägung eines Betätigungsfeldes wurde der Begriff "CoCoS" (Complete Commonrail System) etabliert und bei der TEC4FUELS konsequent verwendet. Es werden mittlerweile fünf solcher Prüfstände aufgebaut, wobei sich einer im Ende der Inbetriebnahmephase befindet und ein weiterer, für Ottokraftstoffe angepasster Prüfstand bereits eine Messung im Kundenauftrag absolviert. Letzterer darf als einsatzbereit angesehen werden und erfährt nun nur noch kleinere Anpassungen für den geregelten Prüfbetrieb. Alle Prüfstände wurden im grundsätzlichen Aufbau identisch gehalten, um mit gemeinsamen Stücklisten arbeiten zu können. Die Beobachtungen und Erfahrungen aus dem ENIAK- und dem SAVEbio-Projekt wurden hierbei konsequent genutzt, um das Prüfstandsdesign zu vereinfachen. Dies schlug sich auch positiv auf die Kosten für die Errichtung des Prüfstands nieder, insbesondere bei der Prüfstandssteuerung.

#### **II.1.6.3.1 Überblick / generelles Design**

Es wurde entschieden, zwei Systeme an einem Prüfstand aufzubauen. Die meisten potenziellen Kraftstoff-Untersuchungen sind Vergleichsmessungen zwischen entweder zwei Injektoren oder zwei Kraftstoffen (häufig: nicht additivierte und additivierte Ware). Ferner wurde davon ausgegangen, dass 30 l Kraftstoffvolumen ausreichen. Sollten längere Prüflaufzeiten gewünscht werden, kann der Kraftstoff nach einem definierten Intervall ausgetauscht werden. Hierdurch ergibt sich ein Prüfstand, bei dem beide Komponententräger problemlos von der Seite zugänglich sind. Zudem konnte, insbesondere durch die geringere Kraftstoffmenge, der Komponententräger etwas oberhalb von Hüfthöhe, also auf idealer Arbeitshöhe angeordnet werden. Abbildung 75 zeigt den Blick in einen solchen CoCoS-Prüfstand und die Kernkomponenten E-Motor, Anschlussglocke, Hochdruckpumpe, Rail und Injektor (mit Heizblock, Anschlussadapter und Einspritzkammer).

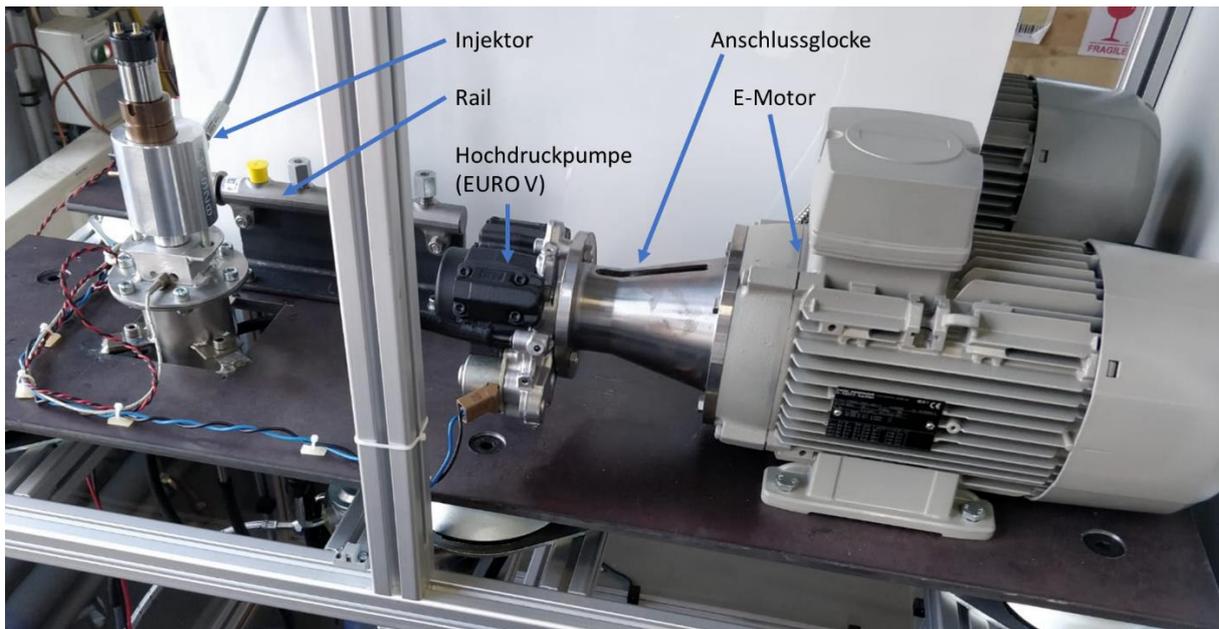


Abbildung 75: Blick auf den linken Komponententräger eines CoCoS-Prüfstands für Dieselkraftstoffe mit Heavy-Duty Injektor

Durch die Verwendung flexibler Hochdruckleitungen kann sehr leicht mechanisch auf andere Injektortypen gewechselt werden. Es muss lediglich einmalig je Injektortyp ein angepasster Heizblock und eventuell ein Hochdruckanschlussadapter gefertigt werden. Abbildung 76 zeigt die Einrüstung eines Heavy-Duty und eines PKW-Injektors auf demselben Prüfplatz desselben Prüfstands.

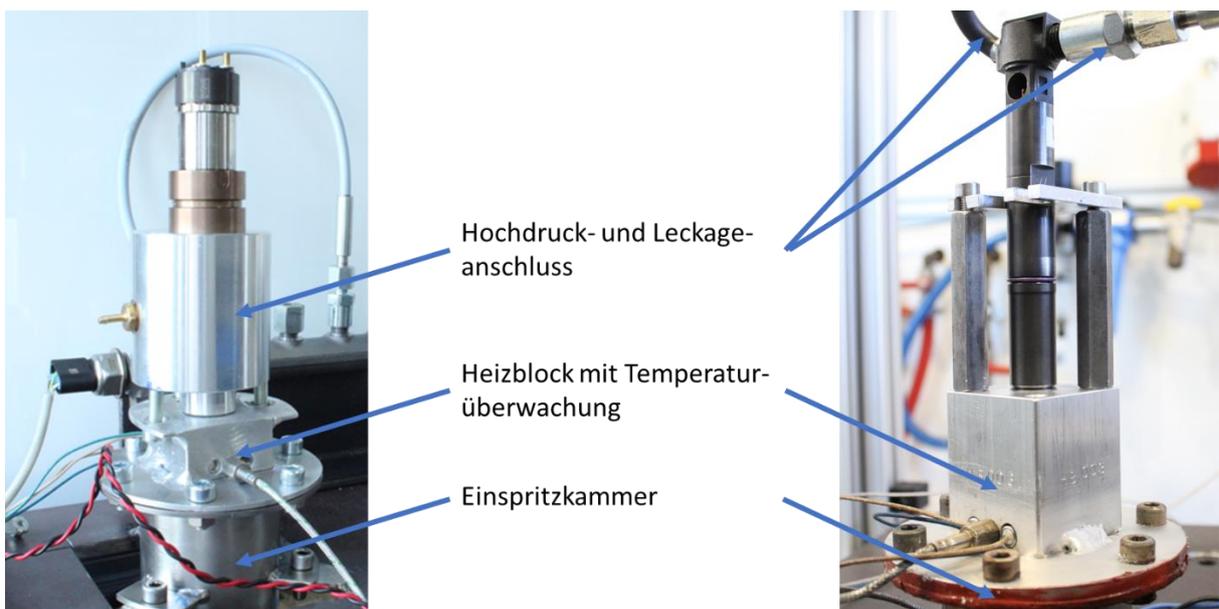


Abbildung 76: Injektor mit Kernkomponenten Hochdruckanschluss, Heizblock und Einspritzbehälter; links: Heavy-Duty, rechts: PKW

### II.1.6.3.2 Steuerung

Die Prüfstandssteuerung des CoCoS ermöglicht zwar ebenfalls die Einstellung eines Betriebszyklus mit Solldruck, Solltemperatur und Pausen- und Laufzeiten. Diese können jedoch nicht im laufenden Betrieb geändert werden. Es werden nur ausgewählte Messwerte wie Fasstemperatur, Injektortemperatur und Raildruck mitgeloggt. Die Raildruckregelung mittels der leicht regelbaren EURO 5 Hochdruckpumpe erfolgt direkt durch die Prüfstandssteuerung. Die Einstellungen der Einspritzansteuerung des Injektors wird vollständig der externen Injektoransteuerung überlassen, die lediglich über ein Triggersignal an- und ausgeschaltet wird. Hierdurch ist es möglich, die Prüfstandssteuerung mit einer einfachen SPS (Siemens Logo!) zu realisieren. Als Injektoransteuerung wird ein einfaches Ansteuermodul, in dem veränderbar, aber fest parametrisiert die Einspritzfrequenz und die Bestromungszeit hinterlegt sind, verwendet. Dieses Modul steuert seinerseits eine Injektorendstufe an, auf der das Bestromungsprofil des Injektors hinterlegt ist. Hierdurch kann ohne Programmierkenntnisse zwischen verschiedenen Injektortypen gewechselt werden, und die gesamte Steuerung für beide Prüfplätze ist deutlich kostengünstiger als die Steuerung des SAVEbio Prüfstandes. Allerdings sind Änderungen der Prüfbedingungen möglich, aber nicht für den Regelbetrieb vorgesehen. Sie sind also nicht auf der Bedienoberfläche vorgesehen, sondern bedürfen eines Eingriffs in die Steuerungsprogrammierung.

Gegenüber den OWI-Prüfständen ENIAK und SAVEbio handelt es sich um ein vollständig anderes Steuerungskonzept. Während weite Teile der Steuerungssoftware des SAVEbio Prüfstandes auf der Programmierung des ENIAK-Prüfstandes aufbauen konnten, wurde beim CoCoS-Prüfstand das Steuerungskonzept vollständig neu aufgebaut. Entsprechend traten einige Kinderkrankheiten zutage. Als „Taktgeber“ für die Injektorendstufe diente beispielsweise zunächst ein angepasstes Handsteuergerät, das über ein Triggersignal der SPS an- und ausgeschaltet wurde. Während der Inbetriebnahmeversuche funktionierte diese Konstellation äußerst zufriedenstellend. Im Dauerbetrieb begann die Steuerung mit zunehmender Häufigkeit, einfach zu stoppen. Das Verhalten ähnelte dem, als habe die Mikrocontroller-Steuerung ein „Stopp“-Signal erhalten. Ein reproduzierbarer Fehler der übergeordneten SPS konnte nicht gefunden werden. Es scheint also, als sei die einfache Microcontrollersteuerung des Handgerätes für die Belastung des Dauerbetriebs nicht geeignet. In engem Kontakt mit dem Hersteller des Handsteuergerätes wurde ein industrielles Standardgerät der Firma NI entsprechend angepasst und übernimmt nun die Aufgabe des Handsteuergerätes.

In diesem Zusammenhang trat ein weiterer wichtiger Unterschied des Steuerungskonzeptes zu Tage: Da die Handsteuerung nicht für bidirektionale Kommunikation ausgelegt war, konnte die SPS-Steuerung den Stopp der Injektorsteuerung nicht direkt detektieren. Die anderen überwachten Messwerte boten ebenfalls keine Indikation; der Raildruck beispielsweise wird unabhängig von der abgenommenen Kraftstoffmenge eingestellt. In der Folge fuhr der Prüfstand sein Prüfprogramm weiter ab, schaltete die Heizung also an und brachte die Injektordüse auf Solltemperatur. Eine längere Temperaturbeanspruchung der Injektordüse ohne Kraftstofftausch würde eine unrealistische thermische Ablagerungsbildung in der Düse hervorrufen. Dieses Phänomen wurde insofern als kritisch identifiziert. In den Prüfständen ENIAK und SAVEbio ist das Auftreten dieses Fehlers sehr unwahrscheinlich

und bislang auch nicht vorgekommen, da hier Injektorsteuerung und Druckregelung von der gleichen Steuerung übernommen werden. Stoppt diese, so kann die übergeordnete Prüfstandssteuerung direkt den fehlenden Raildruck detektieren und geht in Störung. Am CoCoS-Prüfstand wird dieser Herausforderung mit drei Maßnahmen begegnet:

1. Überwachung des Raildruckverlaufs hinsichtlich eines kurzen steilen Druckanstiegs: Dies kann Stopps/ Ausfälle der Injektorsteuerung während des laufenden Betriebs feststellen, nicht jedoch einen ausbleibenden Start der Steuerung
2. Überwachung der Temperatur im Kraftstoffrücklauf vor der Kühlung: Der eingespritzte Kraftstoff ist  $> 100\text{ °C}$  heiß. Ohne Einspritzung gibt es keinen Kraftstofffluss und die Temperatur sinkt auf  $< 50\text{ °C}$
3. Durch den Wechsel auf die NI-Steuerung ist auch eine bidirektionale Kommunikation möglich

#### II.1.6.4 Einschätzung des CoCoS-Prüfstandskonzeptes im Vergleich zum SAVEbio-Prüfstand

Die aufgetretenen Herausforderungen insbesondere hinsichtlich der Steuerung ließen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand beheben und wurden beim Aufbau der weiteren CoCoS-Prüfstände berücksichtigt. Das durch die Vorversuche bekannte Aufheiz- und Abkühlverhalten des Heizblocks wurde bei der Zyklusauslegung für künftige Messungen berücksichtigt.

Abbildung 77 zeigt den Verlauf der Düsentemperatur im CoCoS-Prüfstand über einen Zeitraum von 48 Stunden während der Inbetriebnahme.

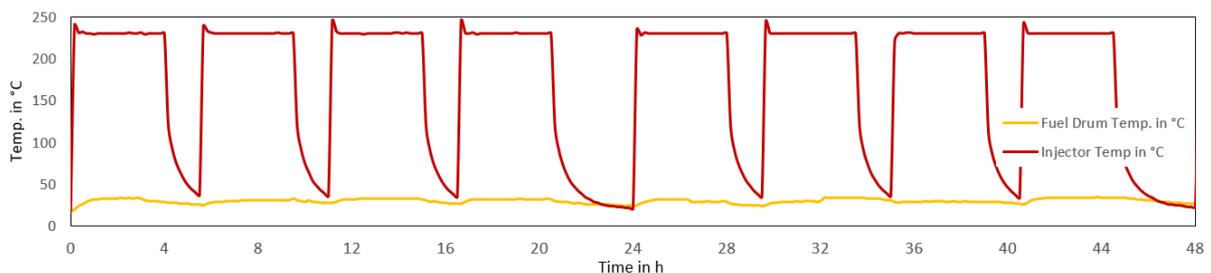


Abbildung 77: Temperaturverlauf am CoCoS-Prüfstand während der Inbetriebnahmeversuche

Die für die Messungen relevanten Unterschiede zwischen CoCoS-Prüfstand und SAVEbio-Prüfstand betreffen die verwendete Vordruckpumpe, den verwendeten Kraftstofffilter, die verwendete Hochdruckpumpe, das verwendete Rail, die Einspritzfrequenz und den Heizblock. Durch die Änderung des Heizblocks ergibt sich eine andere Aufheiz- und Abkühlkurve an der Injektordüse. Es ist zu vermuten, dass dieser Unterschied vernachlässigbar ist im Vergleich zu den Zeiten im Prüfbetrieb und in der

Pause. Ferner ist die eingesetzte Kraftstoffmenge unterschiedlich. Sie ist im CoCoS deutlich geringer (30 l).

Es wird erwartet, dass Vordruckpumpe, Hochdruckpumpe und Rail keinen direkten Einfluss auf den Versuch im Vergleich zum SAVEbio-Prüfstand haben. Ein Einfluss wäre durch das Verschleppen von Spurenelementen der verwendeten Materialien in diesen Komponenten denkbar. Ein solcher Einfluss wurde im Projekt jedoch nicht beobachtet. Allerdings können prinzipiell die geringere Kraftstoffmenge und ein anderer Wärmeeintrag durch die Pumpen die Kraftstoffalterung beeinflussen. Dies wird durch Vergleichsanalysen vor und nach dem Versuch überprüft. Die signifikantesten Unterschiede dürften in den unterschiedlichen Aufheiz- und Abkühlkurven der beiden Prüfstände sowie in den unterschiedlichen Kraftstofffiltern liegen. Insbesondere das unterschiedliche Filtrationsverhalten kann hier einen großen Einfluss haben. Hier stellt sich die Frage, ob dies in der Tat einen signifikanten Einfluss hat oder eben doch die wesentlichen Treiber der potenziellen Ablagerungsbildung im Injektordesign und der Düsentemperatur (und somit der Magnetventiltemperatur) liegen.

Es ist nachvollziehbar, dass sich Ergebnisse zwischen SAVEbio und CoCoS quantitativ unterscheiden werden. Gleichzeitig ist zu vermuten, dass sich die Ergebnisse qualitativ decken. Dies ist so beabsichtigt, denn eine der Aufgaben der TEC4FUELS ist eine Raffung der Prüfprozedur, also eine Verkürzung der Testzeit. Damit einher geht die Frage, ob die quantitativen Unterschiede signifikant und relevant sind. Wie auch im Abschlussbericht des „ENIAK“-Projektes [26] dargestellt, unterscheiden sich auch zertifizierte motorische Tests quantitativ bei der gleichen Messaufgabe, zum Teil signifikant. Vergleicht man hier Testmethoden mit unterschiedlichem Testfokus, etwa einen Test für äußere Ablagerungen mit einem Test für innere Ablagerungen, so können sich hier durchaus auch erklärbare qualitative Unterschiede ergeben [27].

Insofern wird die Erwartung, qualitativ identische Ergebnisse zu erhalten, positiv gesehen.

## II.1.7 Praxiseinsatz pflanzenöлтаuglicher Traktoren (AP 5; Technologie- und Förderzentrum TFZ)

Zur Dokumentation der Auswirkungen des Praxiseinsatzes der pflanzenöлтаuglichen Traktoren mit modernen Kraftstoffeinspritzsystemen werden Untersuchung des Betriebs- und Emissionsverhaltens im tatsächlichen Feldeinsatz und am Traktorenprüfstand durchgeführt. Dabei werden die Einsatzbedingungen von Injektoren erfasst, die Alterung von Injektoren begutachtet, Kenndaten, die die Bildung von Ablagerungen am Injektor beschreiben, ermittelt sowie Maßnahmen zur Vermeidung von Ablagerungen an Injektoren im Praxiseinsatz der Traktoren validiert.

### II.1.7.1 Feldtest und Prüfstand

In diesem Kapitel wird das Vorgehen bei der Datenerhebung im Praxiseinsatz und bei den Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand erläutert.

#### II.1.7.1.1 Traktoren und Betriebsstoffe

Für die Versuche werden die pflanzenöлтаuglichen Prototyp-Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S), John Deere 6215R (JD-Wö) und John Deere 6930 Premium (JD-K) ausgewählt, welche in Abbildung 78 zu sehen sind.



Abbildung 78: Rapsöлтаugliche Traktoren Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-Wö) im Praxiseinsatz sowie der Traktor John Deere 6930 Premium (JD-K) am Traktorenprüfstand

Der Fendt Vario 724 S4 ist mit einem 6-Zylinder Common-Rail Deutz-Motor der Abgasstufe IV mit 174 kW Nennleistung und mit einem Common-Rail Einspritzsystem mit Magnetventil-Injektoren ausgerüstet. Um den Traktor mit Rapsölkraftstoff betreiben zu können, wurde ein Zwei-Tank-System mit Komponenten des Herstellers ATG von der BayWa AG eingebaut. Dabei wird Dieselkraftstoff während der Start- und längeren Leerlaufphasen sowie der Spülphasen unmittelbar vor dem Abstellen aus einem zusätzlich installierten 100 l Kraftstofftank entnommen. Der serienmäßig vorhandene Tank mit 300 l Fassungsvermögen, der vor der Umrüstung als Dieseltank diente, wird für den Rapsölkraftstoff verwendet. Ferner befindet sich in der Kabine ein Bedienteil, mithilfe dessen der Fahrer

zwischen Diesel- und Rapsölbetrieb wählen kann. Im Rapsölkraftstoffsystem sind zwei nachgerüstete Kraftstoffpumpen mit einer Förderleistung von je bis zu 150 l/h verbaut. Die Förderleistung der Pumpen wurde bei der Umrüstung so angepasst, dass im Rapsölkreislauf das gleiche Druckniveau herrscht wie im konventionellen Dieselbetrieb. Damit soll eine ausreichende Kraftstoffversorgung des Hochdruckeinspritzsystems gewährleistet werden. Ein Gegenstromwärmetauscher zwischen Rapsölkraftstoff-Niederdrucksystem und Kühlwasserkreislauf erhöht die Kraftstofftemperatur durch Nutzung der Motorabwärme und mindert somit die Viskosität des Rapsölkraftstoffs. Ein Thermoschalter im Kühlwasserkreislauf sorgt für die automatische Umstellung in den Rapsölbetrieb ab einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C. Das Diesel-Therm®-Heizelement (elektrischer Durchlauferhitzer) erwärmt das Rapsöl, wenn dessen Temperatur unter 45 °C sinkt. Steigt die Temperatur des Rapsölkraftstoffs über 55 °C wird der Durchlauferhitzer ausgeschaltet, um eine übermäßige thermische Belastung des Rapsöls zu vermeiden. Die Umrüstung erfolgt ohne Eingriff ins Management des Einspritzsystems. Auch die Motorsteuerungssoftware wird im Werkzustand belassen und bleibt somit auf den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff optimiert. Der Feldeinsatz des Traktors FE-S findet bei landwirtschaftlichen Arbeiten und bei der Parzellenbewirtschaftung im Versuchswesen der Abteilung Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse am Technologie- und Förderzentrum (TFZ) statt. Für die Ergebnisdarstellung werden Messreihen früherer Untersuchungen im Zeitraum von 240 bis ca. 1.400 Bh des Traktors FE-S [18] berücksichtigt und neu ausgewertet.

Die Traktoren John Deere 6215R (JD-Wö) und John Deere 6930 Premium (JD-K) sind für die ausschließliche Verwendung von Rapsölkraftstoff umgerüstet (Ein-Tank-System). Hierzu wurde die Motorsteuerung vom Hersteller für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff optimiert. Der 6-Zylinder Motor des Traktors JD-Wö weist eine Nennleistung von 158 kW auf und erfüllt die Abgasstufe IV. Dieser Traktor wird zu den Leistungs- und Emissionsmessungen sowie zum Tausch der Injektoren zur Verfügung gestellt. Vor den Emissionsmessungen kam der Traktor für ca. 500 Bh beim Agrarunternehmen „Wöllmisse“ Schlöben eG im Feldtest mit Rapsölkraftstoff zum Einsatz.

Die Abgasnachbehandlung (AGN) der Traktoren FE-S und JD-Wö beinhaltet einen Dieselloxidationskatalysator (DOC), einen Dieselpartikelfilter (DPF) mit passiver Regeneration und ein System zur selektiven katalytischen Reduktion von Stickstoffoxiden (SCR). Der Traktor John Deere 6930 Premium (JD-K) ist mit einem 6-Zylinder Power-Tech-PLUS-Motor mit Common-Rail-Einspritzsystem und einer gekühlten, externen Abgasrückführung ausgestattet. Der Traktor JD-K der Abgasstufe IIIA hat eine Nennleistung von 134 kW und wird bei den Bayerischen Staatsgütern (BaySG) am Standort Kringell eingesetzt

Alle Traktoren werden im Feld und am Prüfstand mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 [9] (RK) betrieben. Die Rapsölkraftstofflieferungen des Traktors FE-S werden auf die Parameter Gesamtverschmutzung, Säurezahl, Oxidationsstabilität, Wasser-, Schwefel-, Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalt gemäß DIN 51605:2016 [9] analysiert. Zudem wird der Rapsölkraftstoff im Tank (ab 1.600 Bh) des Traktors FE-S und im Vorrattank an der Tankanlage regelmäßig beprobt und hinsichtlich Dichte, Oxidationsstabilität, Säurezahl und Wassergehalt untersucht. Der Traktor FE-S mit dem Zwei-Tanksystem benötigt zusätzlich noch Dieselmotorkraftstoff nach DIN EN 590 (DK) für den Kaltstart- und Spülbetrieb.

Außerdem wird an diesem Traktor untersucht, ob der Betrieb mit Fettsäure-Methylester (FAME) nach DIN EN 14214 (Biodiesel, kurz B100) einen Einfluss auf den Zustand des Injektors hat.

Das SCR-System der Traktoren wurde mit wässriger Harnstofflösung nach DIN 70070 bzw. ISO 22241 versorgt.

#### II.1.7.1.2 Datenaufzeichnung im Feldtest

Die Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Injektoren werden am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) erfasst. Zudem erfolgen regelmäßige Aufzeichnungen im Betriebstagebuch, um Einsatzbedingungen, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie gegebenenfalls Störungen zu dokumentieren. Die Aufzeichnungen können dazu beitragen, Fehlfunktionen des Kraftstoffsystems und der Injektoren frühzeitig zu erkennen sowie deren Ursachen zu ermitteln. Die getankten Mengen an Rapsölkraftstoff, Dieseldieselkraftstoff und Harnstofflösung dokumentieren den Betriebsstoffverbrauch des Traktors oder geben bei vorhandenem SCR-System Aufschluss über dessen Funktion. Die Betreiber dokumentieren zudem die durchgeführten Arbeiten bzw. die dabei verwendeten Anbaugeräte mit folgender Kodierung: (1) Pflug, (2) Grubber, (3) Scheibenegge, (4) Straßentransport, (5) Düngerstreuer, (6) Feldspritze, (7) Kreiselegge, (8) Sämaschine, (9) Ballenpresse, (10) Mähwerk, (11) Schwader / Wender, (12) Ladewagen, (13) Güllewagen, (14) Miststreuer, (15) Frontlader und sonstige Arbeitsvorgänge (16).

Die Dokumentation des Betriebsverhaltens erfolgt zusätzlich am Traktor FE-S (ab 1.720 Bh) durch eine kontinuierliche Online-Aufzeichnung von Betriebsdaten mit einer Frequenz von einem Hertz (ein Messwert pro Sekunde). Dabei werden die Signale aus dem CAN-Bus (Controller Area Network) mithilfe des Protokolls SAE J1939 [57] sowie der GPS-Position von einem Datenlogger (bioltec DAQ, Fa. bioltec systems GmbH) aufgezeichnet. Die Aufzeichnung beinhaltet die Parameter Motordrehzahl ( $n_{CAN}$ ), Motordrehmoment ( $M_{CAN}$ ), Motorlast bei zugehöriger Drehzahl ( $L_{CAN}$ ), Kraftstoffverbrauch ( $B_{CAN}$ ), Umgebungstemperatur ( $T_{A-CAN}$ ), Fahrgeschwindigkeit ( $v_{CAN}$ ) und Kühlmitteltemperatur ( $T_{CW-CAN}$ ). Zudem enthält die Betriebsdatenerfassung eine Messeinheit mit acht Temperatursensoren (MU-Thermocouple1 CAN, Fa. PEAK-System Technik GmbH). Abbildung 79 zeigt den Einbauort der Temperatursensoren im Niederdruck- (ND) und Hochdruckkraftstoffsystem (HD).

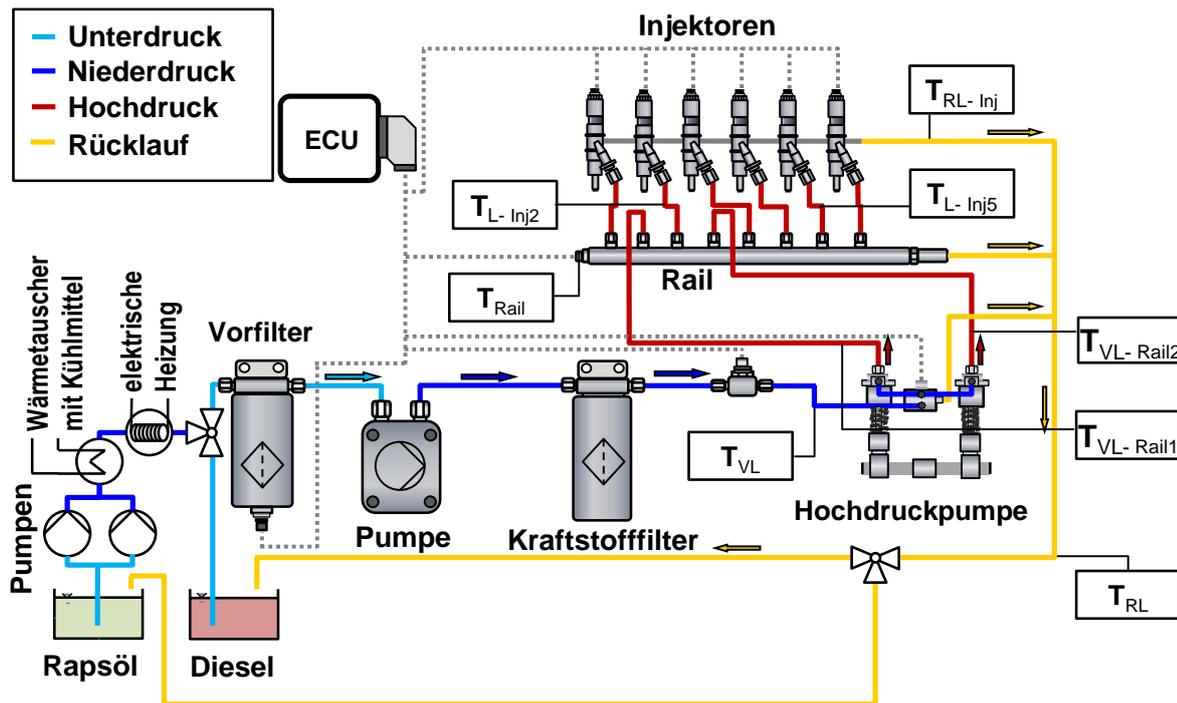


Abbildung 79: Temperatursensoren im Zwei-Tank-Kraftstoffsystems des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S)

Im ND-System wird die Vorlaufemperatur ( $T_{VL}$ ) unmittelbar vor der Hochdruckpumpe erfasst. Im HD-System ermitteln Anlegefühler an den Leitungen der Hochdruckpumpe zur Kraftstoffverteilerleiste (Rail) ( $T_{VL-Rail1}$ ,  $T_{VL-Rail2}$ ) sowie am Raildrucksensor ( $T_{Rail}$ ) und an den Leitungen vom Rail zu den Injektoren der Zylinder 2 und 5 ( $T_{L-inj2}$ ,  $T_{L-inj5}$ ) die Kraftstofftemperatur. Die Kraftstofftemperatur wird zudem in der Rücklaufaufleitung der Injektoren ( $T_{RL-inj}$ ) und in der Gesamtrücklaufaufleitung ( $T_{RL}$ ) gemessen. Analog zum Traktor FE-S werden die Temperatursensoren am Traktor JD-Wö für den Prüfstandsbetrieb installiert.

### II.1.7.1.3 Traktorenprüfstand und Prüfzyklen

Am Traktorenprüfstand werden die Leistung, der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen gemessen. Der Aufbau des Prüfstands ist in Abbildung 80 dargestellt.

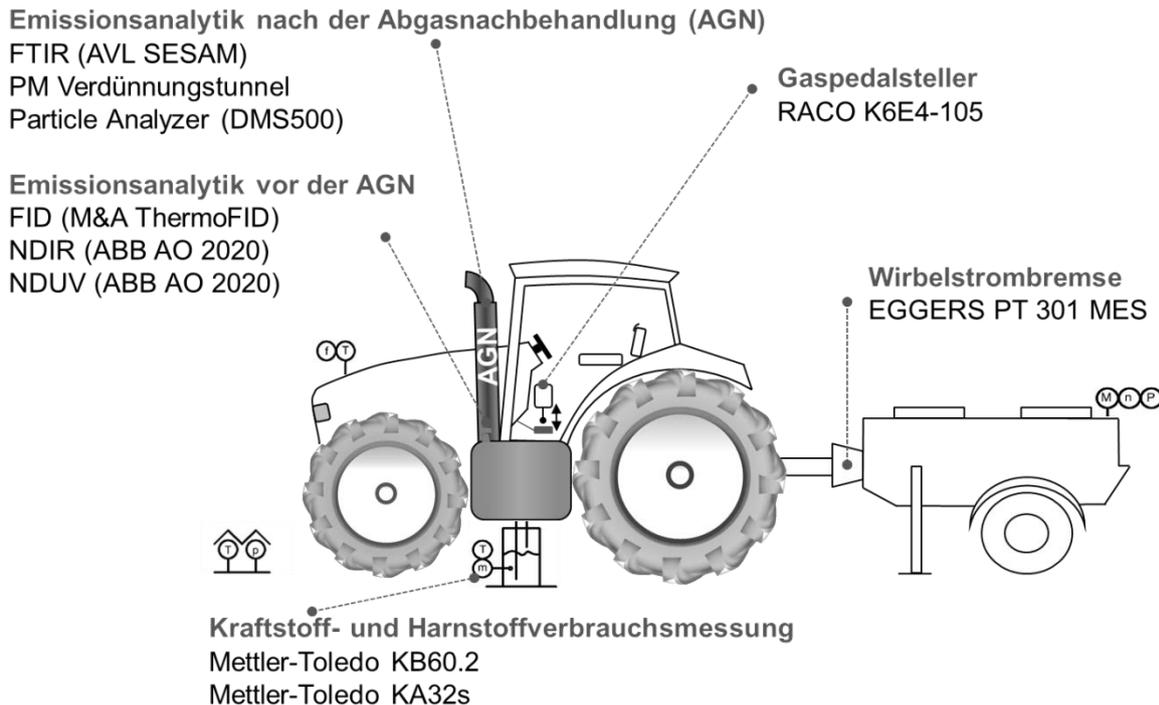


Abbildung 80: Schematischer Aufbau des Traktorenprüfstands zur Leistungs- und Emissionsmessung

Am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums wird die Leistung an der Zapfwelle nach OECD Standard Code 2 [44] bestimmt. Die Leistung an der Zapfwelle  $P_{ZW}$  wird über eine Wirbelstrombremse (EGGERS PT 301 MES, max. 340 kW, Auflösung 0,1 kW) durch Messung von Drehmoment und Drehzahl ermittelt. Die Änderung der Motordrehzahl erfolgt mithilfe eines elektrischen Fahrpedalstellers (RACO K6E4-105).

Der Kraftstoffverbrauch und die Einspritzmenge werden gravimetrisch mittels einer Waage (Mettler-Toledo Tischwaage KB60.2) erfasst. Dazu wird am Traktor das Kraftstoffsystem am Tank aufgetrennt und der Kraftstoffvorlauf und -rücklauf in einen Versuchskraftstoffbehälter geleitet, dessen Masse über die Waage kontinuierlich erfasst wird. Anhand des gemessenen Kraftstoffverbrauchs in kg/h wird die Einspritzmenge je Zylinderhub  $m_{Mess}$  in Abhängigkeit von der Motordrehzahl sowie der Traktorzylinderanzahl bestimmt. Zudem wird die Einspritzmenge in mg/Hub ( $m_{Calc}$ ) aus dem Kraftstoffverbrauchssignal in l/h der Motorsteuerung (ECU), welches über den CAN-Bus zur Verfügung steht, und der Dichte von 0,92 kg/l für Rapsölkraftstoff und 0,83 kg/l für Dieselloskraftstoff errechnet. Der Verbrauch an wässriger Harnstofflösung des SCR-Systems wird ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Dazu wird ein externer Harnstofftank auf einer Tischwaage (Mettler-Toledo Tischwaage KA32s) platziert und mit dem SCR-System des Traktors verbunden.

Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle beschreibt das Verhältnis aus der Leistung an der Zapfwelle zur zugeführten Brennstoffleistung. Die Brennstoffleistung wird anhand des gemessenen Kraftstoffverbrauchs und des analysierten Heizwerts von 11,92 kWh/kg für Diesel- bzw. von 10,32 kWh/kg für Rapsölkraftstoff berechnet.

Die Abgaskomponenten Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) werden an Messstellen vor und nach der Abgasnachbehandlung (AGN) erfasst. Die gasförmigen Emissionen im Rohabgas vor der AGN misst ein Gasanalyse-System mit einem Nicht-Dispersivem-Infrarot-Spektroskop (NDIR), einem Nicht-Dispersivem-Ultra-Violett Analysator (NDUV) und einem Flammenionisations-Detektor (FID). Nach der AGN werden die  $\text{NO}_x$ -, CO- und HC-Emissionen durch ein AVL SESAM 4 Gasanalyse-System mit Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskop (FTIR) und einem FID gemessen. Die Partikelmasse-Emissionen (PM) werden mit einem Teilstromverdünnungstunnel nach der AGN erfasst.

Der Verlauf des Zylinderinnendruckes am Traktor JD-K wird durch eine Indizierung mit dem System IndiMicro der Firma AVL gemessen. Die Kurbelwellenposition gibt der fahrzeugeigene induktive Kurbelwinkelsensor wieder. Ein zusätzlicher Brennraumdrucksensor vom Typ GH13P wird über einen Adapter in der Glühkerzenbohrung am sechsten Zylinder des Motors installiert. Der Kraftstoffdruck in der Kraftstoff-Verteilerleiste (engl. Rail) wird über den fahrzeugeigenen Drucksensor ausgelesen. Die Strommesszange E3N der Fa. Chauvin Arnoux erfasst das Einspritzsignal an der Stromleitung des sechsten Injektors. Die kurbelwinkelbasierten Messdaten werden mit der Software IndiCom (Fa. AVL) erfasst und ausgewertet. In PLANK et al. (2017) [47] wird die Methodik der Zylinderdruckindizierung an diesem Traktor ausführlich dargestellt.

Beim Traktor JD-Wö wird das Spannungs- und Stromsignal mit dem Oszilloskop Fluke 125 ScopeMeter und einem LabView-System erfasst. Die Daten zum Verlauf einer Einspritzung und die Unterteilung der Ansteuerdauer in Boostphase, Anzugsphase und Haltephase werden dem Projektpartner OWI zur Verwendung am Injektorenprüfstand zur Verfügung gestellt.

Alle Messwerte werden kontinuierlich mit einer Frequenz von einem Hertz erfasst und mithilfe des Datenerfassungssystems (LabVIEW™) aufgezeichnet. Der Prüfstands Aufbau und das Vorgehen bei den Messungen ist auch in Ettl et al. (2019) [18] beschrieben.

## **Prüfvorschriften und Zyklen**

Im Rahmen der Untersuchungen am Traktorenprüfstand werden die Messungen in Anlehnung an die EU-Verordnungen 2016/1628 [21] und 2017/654 [20] unter Verwendung des Prüfzyklus Non-Road Steady Cycle (NRSC) durchgeführt. Dieser stationäre Prüfzyklus wird vom Gesetzgeber unter anderem für die Prüfung von Motoren landwirtschaftlicher Zugmaschinen aller Abgasstufen vorgeschrieben. Der stationäre Zyklus wurde ausgewählt, da zum einen die am Traktorenprüfstand gemessenen Daten in den stationären Motorbetriebsphasen am Injektorenprüfstand des Projektpartners OWI besser verarbeitet werden können (z. B. Spannungs- und Stromsignal, Einspritzmengen usw.). Zum anderen stehen für den NRSC umfangreiche Vergleichsdaten [18][16][14][61] zur Verfügung, wodurch die Änderung von Leistung und Emissionen über einen langen Betriebszeitraum besser beurteilt werden kann.

Der NRSC besteht aus acht Prüfphasen, die in einer festgelegten Reihenfolge einzustellen sind. In Tabelle 10 sind die Prüfphasen im Motorenkennfeld aufgelistet.

Tabelle 10: *Non-Road Steady Cycle (NRSC)*

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

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

Am Traktor JD-K wird zudem der OWI-Betriebszyklus zur Ablagerungsbildung (siehe Abbildung 52) angewandt, welcher für den nicht-motorischen Injektorprüfstand konzipiert ist und eine beschleunigte Ablagerungsbildung im Kraftstoffsystem erreichen soll. Der Traktor wird vor Beginn des Zyklus bei Nenndrehzahl- und -last konditioniert bis die maximale Kühlmitteltemperatur erreicht wird. Die Konditionierung ist nötig, um am Traktor vergleichbare Kraftstofftemperaturen wie bei der Prüfung am Injektorprüfstand herzustellen. Anschließend wird der Motor über vier Stunden abwechselnd für 15 Minuten im Leerlauf betrieben und für 15 Minuten abgestellt. Die letzte Phase besteht aus 60 Minuten Leerlauf und 60 Minuten Motorstillstand. Insgesamt wird der OWI-Betriebszyklus dreifach wiederholt. Die Gesamtlaufzeit von ca. 12 Bh im OWI-Betriebszyklus am Traktorenprüfstand ist geringer als bei den Versuchen am Injektorprüfstand, wo die Injektoren über etwa 200 h gealtert werden.

#### II.1.7.1.4 Untersuchungsvarianten

Die wesentlichen Aufgaben des TFZ im Rahmen des Vorhabens umfassen die Erfassung der Einsatzbedingungen von Injektoren im Traktormotor in der Praxis, die gezielte Alterung und Begutachtung dieser Injektoren, die Ermittlung von Kenngrößen zur Detektion von Ablagerungen am Injektor sowie die Validierung von Maßnahmen zur Vermeidung von Ablagerungen an Injektoren im Traktormotor.

*Einsatzbedingungen im Praxisbetrieb.* Zunächst werden die Einsatzbedingungen der Injektoren im tatsächlichen Traktorbetrieb mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 ohne Additivzugabe (RK-oA) aufgezeichnet. Die Injektoren werden im Feldeinsatz des Traktors FE-S gealtert („dirty-up“) und dabei relevante Betriebsdaten, wie z. B. die Motorlast und die Verteilung der Temperaturen im Kraftstoffsystem, ausgewertet sowie die Kraftstoffqualität überprüft.

*Kenngößen zur Detektion der Ablagerungsbildung.* Nach Einbindung der Traktoren FE-S und JD-Wö in den Prüfstand werden weitere wesentliche Kenngrößen des Injektorbetriebs, wie z. B. Einspritzmengen, Injektoransteuerungszeiten, Maximalleistung und Rohemissionen bei wiederkehrenden Leistungs- und Emissionsmessungen, erfasst. Die Betriebsdaten werden beim Projektpartner OWI für die Betriebszykluserstellung des Injektorprüfstands verwendet. Am Traktorenprüfstand werden die Traktoren FE-S und JD-Wö jeweils mit einem neuen Injektorsatz B und gealtertem Injektorsatz A vermessen, um den Einfluss einer möglichen Ablagerungsbildung auf das Betriebs- und Emissionsverhalten zu untersuchen. Die im Feldbetrieb gealterten Injektoren werden optisch hinsichtlich äußerer Ablagerungen begutachtet und dem OWI für Messungen am Injektorprüfstand zur Verfügung gestellt. Ferner wird geprüft, ob bestimmte Zeigergrößen, wie Leistung, Abgas-temperatur, Emissionen etc., die Ablagerungsbildung an Injektoren anzeigen können. Zusätzlich wird der Traktor JD-K mit einem Indiziersystem zur Erfassung des Zylinderdruckverlaufs ausgerüstet. Anhand des Zylinderdruckverlaufs werden der Verbrennungsverlauf im Betrieb mit Rapsölkraftstoff beurteilt, deren Änderung wiederum Aufschluss über die Ablagerungsbildung an Injektoren geben kann.

*Einsatztests entwickelter Maßnahmen.* Nach der Alterung der Injektoren mit Rapsölkraftstoff im Feld erfolgen weitere Messungen am Traktorprüfstand, um verschiedene Strategien zur Ablagerungsentfernung („clean-up“) zu validieren. Die Maßnahmen werden in Abstimmung mit den Projektpartnern OWI und ERC realisiert und sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Maßnahmen zur Reinigung von Injektoren

Kurzbezeichnung	Kraftstoff	Additiv (Dosierung)	Einsatzzeit	Traktor
DK_oA_kurz	DK	ohne Additivzugabe	5 Bh	FE-S
B100_oA_kurz	B100	ohne Additivzugabe	5 Bh	FE-S
B100_oA_lang	B100	ohne Additivzugabe	> 50 Bh	FE-S
RK_D2-1000_kurz	RK	Detergent 2 (1.000 mg/kg)	5 Bh	FE-S
RK_D1-250_lang	RK	Detergent 1 / OX (je 250 mg/kg)	> 50 Bh	FE-S
RK_D1-500_lang	RK	Detergent 1 / OX (je 500 mg/kg)	> 50 Bh	FE-S

Die Maßnahmen können in die Kategorien mit „kurzer“ und „langer“ Einsatzzeit unterschieden werden:

- Bei kurzer Einsatzzeit werden am Traktorenprüfstand Leistungsmessungen nach OECD Standard Code 2 unter Volllast für ca. 5 Bh durchgeführt. Bei dieser Betriebsweise liegen hohe Durchflussraten und Temperaturen am Injektor vor, die die Reinigungswirkung der Injektoren durch die Kraftstoffe und Additive begünstigen sollen. Dieses Vorgehen wird in ähnlicher Form in Fachwerkstätten praktiziert.
- Im Feldtest können Maßnahmen über eine längere Einsatzdauer angewandt werden. Dabei wird der Traktor mindestens zwei Tankfüllungen des eingesetzten Kraftstoffs bzw. der Kraftstoff-Additiv-Mischung verbrauchen, was einer Traktoreinsatzzeit von über 50 Bh entspricht.

Maßnahme *DK\_oA\_kurz*. Mit Ablagerungen behaftete Injektoren werden nach dem Feldtest mit Rapsölkraftstoff bei Leistungsmessungen über 5 Bh am Prüfstand mit Dieselmotorkraftstoff nach DIN EN 590 gespült.

Maßnahmen *B100\_oA\_kurz* und *B100\_oA\_lang*. Der Einsatz von Biodiesel nach DIN EN 14214 (B100), welcher bei Labortests Ablagerungen an Prüfkörpern reduzieren konnte [30], soll auf die Reinigungswirkung von Injektorablagerungen am Traktormotor im Betrieb über ca. 5 Bh am Prüfstand (*B100\_oA\_kurz*) und über mehr als 50 Bh im Feldtest überprüft werden (*B100\_oA\_lang*).

In der Untersuchung werden ferner zwei Injektorreinigungsadditive (engl. detergents) und ein Oxidationsstabilisator der ERC Additiv GmbH (siehe Kapitel II.1.4) im Rapsölkraftstoff eingesetzt.

- Maßnahme *RK\_D2-1000\_kurz*. Das Additiv Detergent 2, welches auf die Reinigung interner Injektorablagerungen (IDID) abzielt und für den DW10-Ablagerungstest optimiert wurde, wird am Traktorenprüfstand bei Leistungsmessungen nach OECD Standard Code 2 unter Volllast für ca. 5 Bh am Traktor FE-S eingesetzt. Die Konzentration des Additivs im Rapsölkraftstoff beträgt 1.000 mg/kg.
- Maßnahmen *RK\_D1-250\_lang* und *RK\_D1-500\_lang*: Im Feldtest des Traktors FE-S kommt das Additiv Detergent 1 mit dem Wirkstoff Polyisobutylensuccinimid (PIBSI) zum Einsatz, welches bevorzugt gegen äußere Ablagerung am Injektor wirken soll und für den XUD9-Ablagerungstest konzipiert wurde. Das Additiv Detergent 1 wird in den Konzentrationen 250 mg/kg und 500 mg/kg im Rapsölkraftstoff eingesetzt. In gleicher Dosierung wird der Antioxidantienpaket „OX 1220 Biofuel“ (kurz OX) eingesetzt, welcher die Kraftstoffstoffalterung im Fahrzeugtank reduzieren soll.

Ferner gilt es am OWI-Injektorenprüfstand künstlich gealterte Injektoren zu untersuchen. Dazu wird der künstlich gealterte Injektorsatz C in den Traktor FE-S eingebaut und die Auswirkungen auf das Leistungs- und Betriebsverhalten im Vergleich zu neuen sowie im Feldtest gealterten Injektoren untersucht.

Der Erfolg der jeweiligen Maßnahme wird primär von Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsdaten nach OECD Standard Code 2 abgeleitet. Dazu wird das arithmetische Mittel der Messwerte im Drehzahlbereich zwischen  $1.400 \text{ min}^{-1}$  und  $2.100 \text{ min}^{-1}$  betrachtet, da Betriebspunkte auch im tatsächlichen Fahrbetrieb von Traktoren, z. B. bei der Bodenbearbeitung, besonders relevant sind. Ob sich die mittlere Leistung, die Einspritzmenge und der Wirkungsgrad zwischen den Messungen vor und nach der Maßnahme unterscheiden, wird mit Hilfe eines t-Tests bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  überprüft.

### **II.1.7.2 Betriebs- und Emissionsverhalten**

Die Ergebnisdarstellung untergliedert sich in die Erfassung der Einsatzbedingungen von Injektoren im Praxisbetrieb, die Ermittlung von Kenndaten, die die Bildung von Ablagerungen am Injektor beschreiben sowie die Einsatztests von entwickelten Maßnahmen zur Vermeidung oder Entfernung von Ablagerungen an Injektoren im Traktormotor.

#### **II.1.7.2.1 Einsatzbedingungen im Praxisbetrieb**

Im folgenden Abschnitt werden die Einsatzbedingungen bei der Alterung der Injektoren („dirty-up“) des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S) zwischen 240 und 1.770 Bh aufgezeigt. Ab dem Betriebsstundenzählerstand des Traktors von 1.770 Bh werden Strategien zur Ablagerungsminderung („clean-up“) untersucht, welche im Kapitel II.1.7.2.3 näher ausgeführt werden.

Mit Hilfe des Betriebstagebuchs wurde die Verteilung der Traktorarbeiten und des Kraftstoffeinsatzes über Betriebsmonate der Injektoren A und B (bis 1.770 Bh) erfasst, wie die Abbildung 81 zeigt.

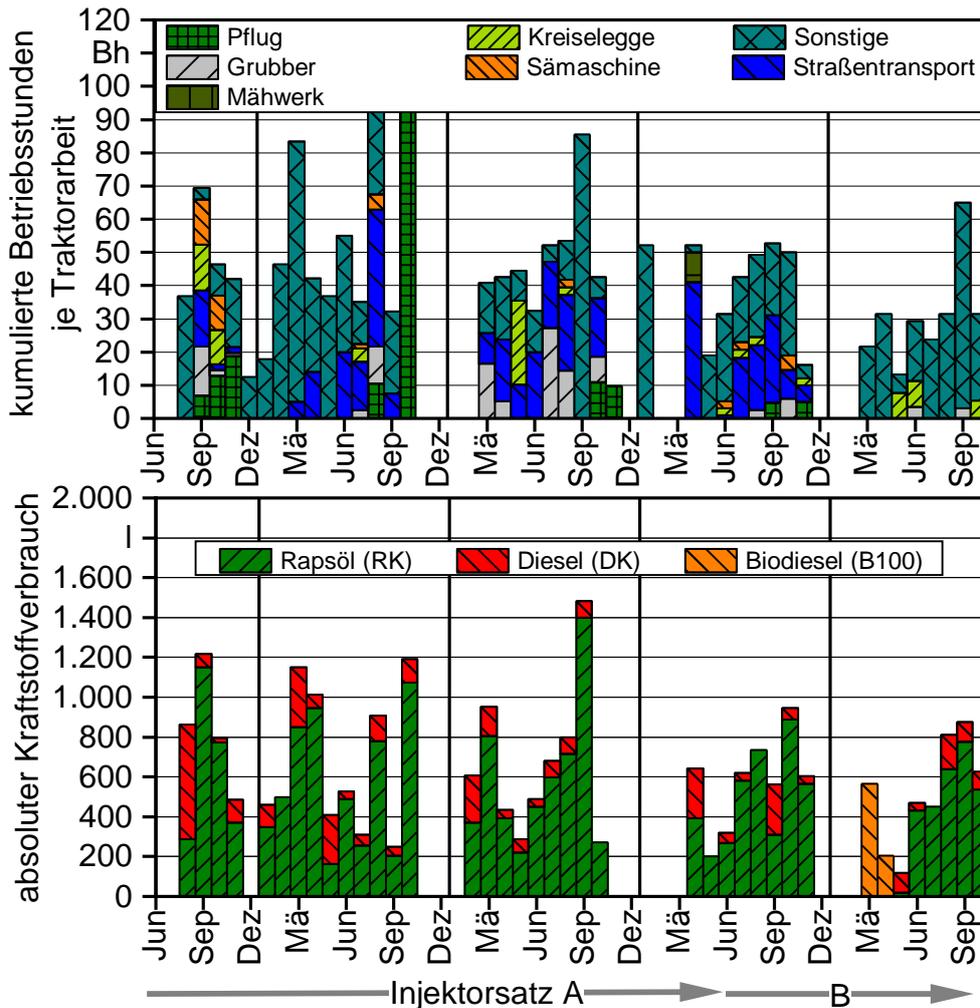


Abbildung 81: Arbeiten und Kraftstoffverbrauch über die Einsatzmonate des Traktors FE-S

Der Traktor wurde mit dem Injektorsatz A und B mehrheitlich beim Straßentransport (A = 27 %, B = 44 %) oder bei sonstigen Arbeiten (A = 32 %, B = 40 %) eingesetzt. Die sonstigen Arbeiten sind größtenteils dem Parzellenhäcksler im Versuchswesen und zu geringeren Anteilen den Messungen am Traktorenprüfstand zuzuordnen. Bei der Parzelernte wechseln sich die Phasen des eigentlichen Häckselvorgangs mit starker Motorbelastung sowie das Umsetzen zwischen den Parzellen und Rüstzeiten mit geringer Motorbelastung ab. Der Traktor wurde mit dem Injektorsatz B weniger häufig in der Bodenbearbeitung mit dem Pflug (A = 20 %, B = 4 %), dem Grubber (A = 11 %, B = 3 %) und der Kreiselegge (A = 6 %, B = 3 %) eingesetzt als mit dem Injektorsatz A. Nur ein geringer Anteil entfällt auf Arbeiten mit der Sämaschine (A = 3 %, B = 3 %) und dem Mähwerk (A = 0 %, B = 3 %).

Nach dem Feldtest zwischen 470 Bh und 990 Bh mit Injektorsatz A war erstmals eine Leistungsminderung messbar, wie Abbildung 82 zeigt. In diesem Zeitabschnitt pflügte (32 %), transportierte (30 %) und häckselte (31 % sonstige Arbeit mit dem Parzellenhäcksler) der

Traktor mehrheitlich. Damit unterscheiden sich die Einsatzbedingen nur geringfügig von der Verteilung der Arbeiten über die gesamte Einsatzzeit des Injektorsatzes A.

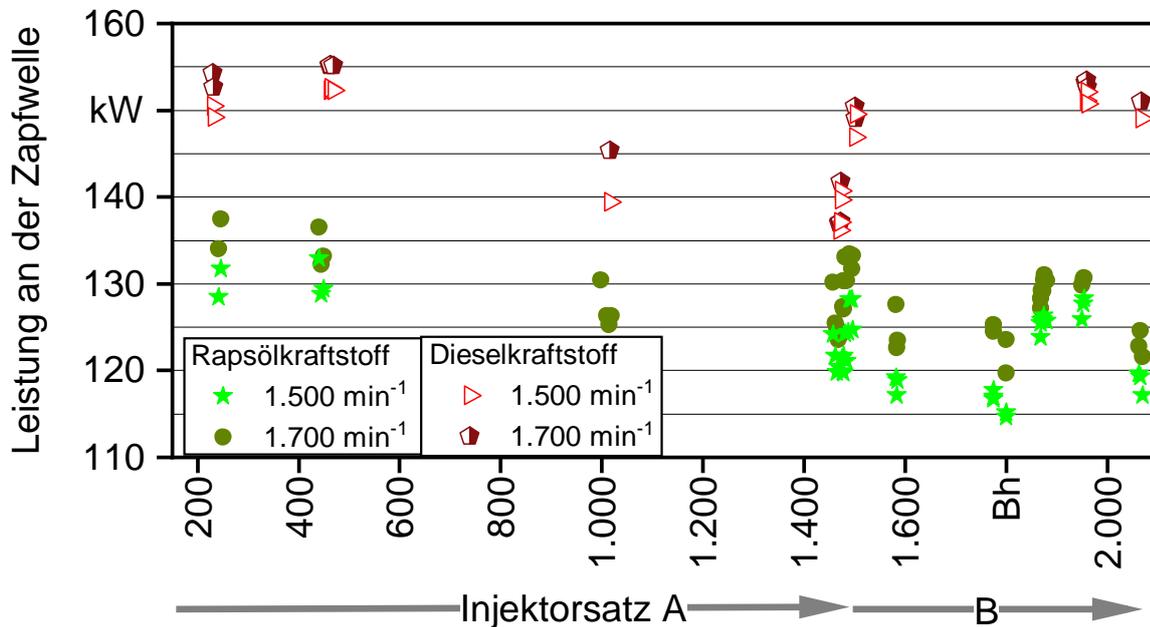


Abbildung 82: Leistung an der Zapfwelle des Traktors FE-S über die Betriebsstunden

Beim Einsatz des Injektorsatzes B trat der Leistungsverlust nach dem Injektortausch zwischen 1.500 Bh und 1.580 Bh innerhalb von zwei Monaten ein. Im Feldtest arbeitete der Traktor zu 79 % beim Straßentransport, zu 17 % mit dem Mähwerk und zu 4% mit dem Parzellenhäcksler. Der häufig durchgeführte Straßentransport ist gekennzeichnet von häufigen Motordrehzahl- und -drehmomentwechseln sowie niedrigerer Motorauslastung im Vergleich zur schweren Bodenbearbeitung [17]. Ob die Bedingungen des Straßentransports die Ablagerungsbildung förderten, kann nicht eindeutig zugeordnet werden.

Der Anteil an Rapsöl am Gesamtkraftstoffverbrauch beträgt beim Injektorsatz A 84,3 % und ist damit etwas geringer als beim Injektorsatz B mit 90,0 %. Der im Feldtest eingesetzte Rapsölkraftstoff erfüllt die Normparameter nach DIN 51605:2016 [9]. Der Verbrauch an wässriger Harnstofflösung lag bei 6,5 Vol.-% (A) bzw. 4,9 Vol.-% (B) vom gesamten Kraftstoffverbrauch. Diese Verbrauchskennzahlen deuten auf einen störungsfreien Betrieb des Motors und eine einwandfreie Funktion der Abgasnachbehandlung hin.

Im praktischen Betrieb wurde die leicht verminderte Motorleistung von den Fahrern nicht bemerkt und es konnten alle Arbeiten mit der Maschine erledigt werden.

Ergänzend zu den Aufzeichnungen im Betriebstagebuch wurde der Pflanzenöltraktor FE-S mit einer elektronischen Betriebsdatenerfassung ausgestattet. In Abbildung 83 ist die Häufigkeitsverteilung des Motordrehzahl- ( $n_{CAN}$ ) und Drehmomentsignals ( $M_{CAN}$ ) aus dem CAN-Bus dargestellt.

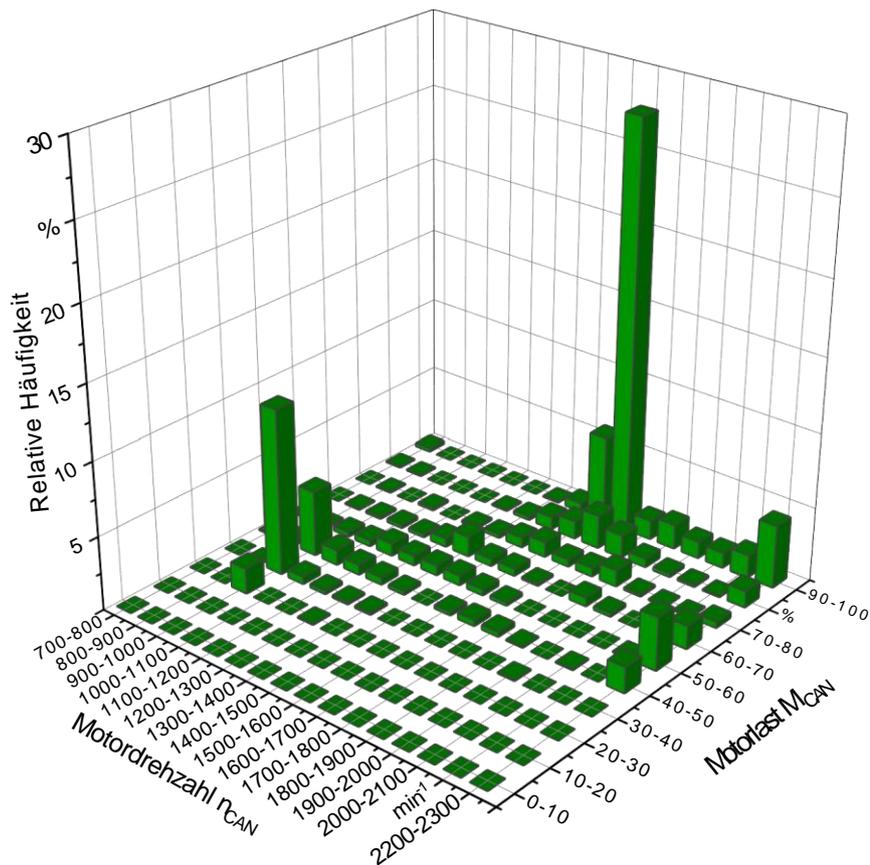


Abbildung 83: Motordrehzahl und -last aus dem CAN-Bus des Traktors FE-S im Feldtest (Injektorsatz B)

Der Traktor wurde im Zeitraum der Datenaufzeichnung überwiegend zum Straßentransport (33%), zum Pflügen (8 %) und für sonstige Arbeiten (48 %) eingesetzt. Ähnliche Drehzahl- und Lastverteilung ermittelten EMBERGER et al. (2013) [14] an einem Abgasstufe IIIA Pflanzenöltraktor und Ettl et al. (2016) [16] an einem Abgasstufe IIIB Pflanzenöltraktor. Parallelen ergeben sich insbesondere bei hoher Last. Rund 57 % aller Messwerte bewegten sich bei über 75 % Motorauslastung. Ebenso konzentrieren sich diese Messwerte unter hoher Last im Drehzahlbereich über  $1.500 \text{ min}^{-1}$  (Zwischendrehzahl) und unter  $2.100 \text{ min}^{-1}$  (Nenn Drehzahl). Im stationären Prüfzyklus NRSC wird dieser Bereich allerdings nicht berücksichtigt. Rüst- und Wegezeiten bei den Traktorarbeiten des Pflanzenöltraktors FE-S führen zu einem Niedriglastanteil von 24 %, bei einem Lastsignal unter 50 %. Die Verteilung des Motordrehzahl- ( $n_{\text{CAN}}$ ) und Drehmomentsignals ( $M_{\text{CAN}}$ ) kann als praxisüblich eingeordnet werden.

Die in diesem Zeitraum erfassten Temperaturen im Kraftstoffsystem zeigt die Abbildung 84.

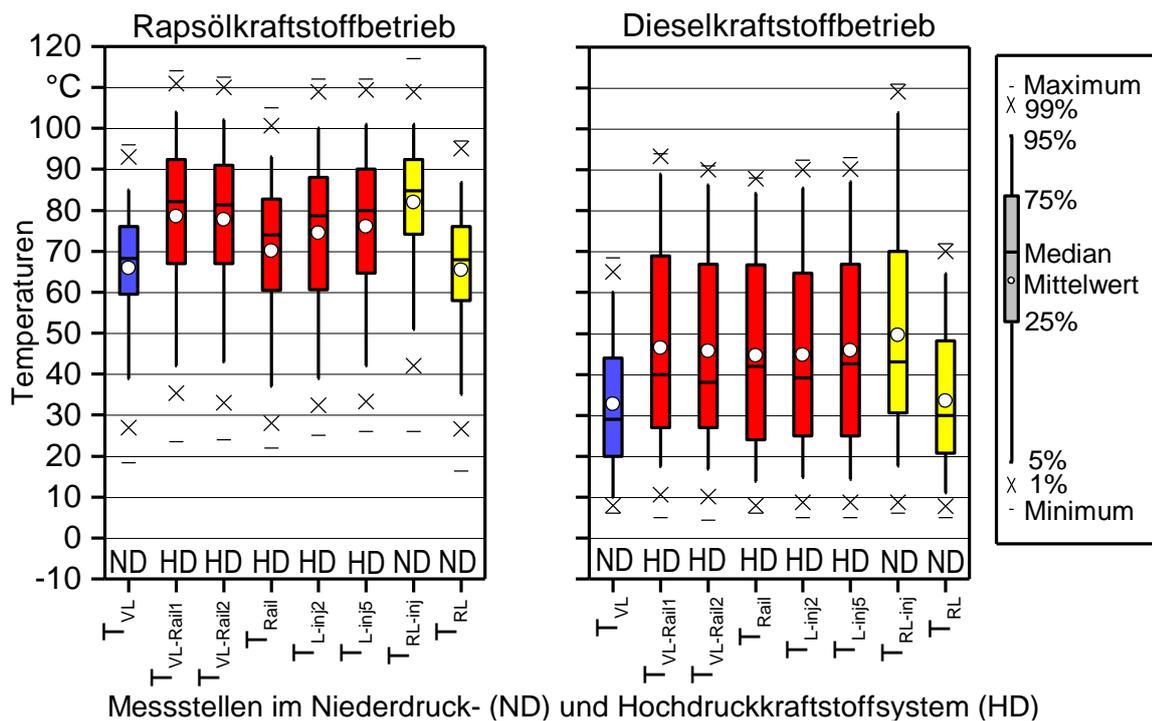


Abbildung 84: Verteilung der Temperaturen im Kraftstoffsystem des Traktors FE-S im Feldtest des Injektorsatz B im Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoffbetrieb

Die Vor- ( $T_{VL}$ ) und Rücklauf- ( $T_{RL}$ )temperatur des Rapsölkraftstoffs liegt am häufigsten (Median) in einem Bereich von 60 °C bis 65 °C. Am Traktorenprüfstand ist der Kraftstoff mit  $T_{VL} = 78$  °C und  $T_{RL} = 75$  °C während des NRSC im Durchschnitt wärmer als im Feld. Einerseits sind mit Rapsölkraftstoff die Motordrehzahl- und -drehmomentsignale im NRSC am Prüfstand ( $n_{CAN} = 1.726 \text{ min}^{-1}$ ,  $M_{CAN} = 74,8 \%$ ) höher als im Feld ( $n_{CAN} = 1.493 \text{ min}^{-1}$ ,  $M_{CAN} = 61 \%$ ). Andererseits erwärmt der Kraftstoffrücklauf das Rapsöl im 60 l Versuchstank am Prüfstand schneller als im großvolumigen Fahrzeugtank mit 300 l Fassungsvermögen.

Die Kraftstofftemperaturen sind im Dieseldieselbetrieb im Mittel geringer als im Rapsölkraftstoffbetrieb und zudem breiter gestreut, da sowohl der kalte Motor beim Starten als auch der warme Motor vor dem Abstellen mit dem Hilfskraftstoff Diesel betrieben wird. Zudem musste der Traktor aufgrund eines defekten Umschaltventils während der Aufzeichnungsdauer für kurze Zeit (zwischen 1.697 Bh und 1.730 Bh) ausschließlich mit Dieseldieselkraftstoff betrieben werden.

Vor dem Abstellen des Motors wird eine geringe Menge an Diesel durch das Kraftstoffsystem in den Rapsölkraftstofftank gespült. Um die Veränderung der Kraftstoffqualität im Fahrzeugtank beurteilen zu können, wurde zwischen 1.604 Bh und 2.100 Bh der Rapsölkraftstoff im Tank des Traktors FE-S und im Vorratstank an der Tankanlage regelmäßig beprobt und hinsichtlich der Dichte, der Oxidationsstabilität, der Säurezahl und des Wassergehalts untersucht. Zusätzlich wurden sechs Rapsölkraftstoffproben aus dem Fahrzeugtank auf die Gehalte an Kupfer, Kalzium, Magnesium, Zink, Phosphor, Natrium, Kalium, Eisen, Aluminium und Nickel untersucht, da bekannt ist, dass diese Elemente

möglicherweise Ablagerungen verursachen können. Alle Analysewerte lagen jedoch deutlich unter 1 mg/kg und somit kann die Bildung von Ablagerungen aufgrund dieser Elemente im Rapsölkraftstoff ausgeschlossen werden.

Anhand der Dichte des Kraftstoffgemischs und der Dichte des Rapsöls von 0,92 kg/l sowie des Diesels von 0,83 kg/l wurde der Rapsölanteil in der Probe bestimmt. Mit 94 %  $\pm$  4 % lag der Rapsölanteil im Kraftstoffgemisch auf einem konstant hohen Niveau. Lediglich bei niedrigem Füllstand war einmalig ein Rapsölanteil von nur 88 % festzustellen. Für die Beurteilung der Ablagerungsbildung muss jedoch berücksichtigt werden, dass systembedingt beim Traktor FE-S mit Zwei-Tank-System immer ein geringer Anteil an Dieselmotorkraftstoff im Rapsölkraftstoff mit beigemischt war.

Die Säurezahl (SZ) des Rapsölkraftstoffs ohne Additivzugabe (RK\_oA) im Vorratslagertank der Tankstelle lag im Mittel bei 1,65  $\pm$  0,04 mg KOH/g (RK-Charge I), bzw. bei 0,9  $\pm$  0,2 mg KOH/g (RK-Charge II) und im Fahrzeugtank des Traktors bei 1,3  $\pm$  0,4 mg KOH/g. Damit war die Säurezahl bei allen Tankproben geringer als der Grenzwert nach DIN 51605 von 2,0 mg KOH/g. Auch der Wassergehalt war über die Versuchsdauer mit 671  $\pm$  12 mg/kg unterhalb des Grenzwerts von 750 mg/kg und damit unauffällig.

Der Traktor FE-S wurde im Feldtest kurzzeitig mit unterschiedlich stark gealtertem Rapsölkraftstoff außerhalb der DIN 51605 betrieben. Dabei variierte hauptsächlich die Oxidationsstabilität (OxiStab), als Maß für die Voralterung des Rapsölkraftstoffs im Vorratslagertank der Betankungsanlage. Die RK-Charge I wurde im März 2017 mit einer OxiStab von 6,8 h und die RK-Charge II im August 2018 mit einer OxiStab von 8,4 h angeliefert. Aufgrund der 17 Monate andauernden Lagerung im Kunststoffcontainer (IBC) ohne Kühlung sank die OxiStab von RK-Charge I auf unter 2,9 h ab. Die OxiStab im Vorratstank der Tankanlage von RK-Charge II liegt bei 6,5  $\pm$  0,8 h sowie von RK-Charge III bei 7,4 h vor der Additivierung bzw. bei 9,5  $\pm$  1,3 h nach der Additivierung und damit deutlich höher als RK-Charge I.

Abbildung 85 zeigt den zugehörigen Verlauf der Oxidationsstabilität im Rapsölkraftstofftank des Traktors FE-S. Die OxiStab des Rapsölkraftstoffs ohne Additivzugabe im Tank des Traktors liegt im Mittel bei 0,7  $\pm$  0,2 h und somit deutlich unterhalb des Grenzwerts von 6 h.

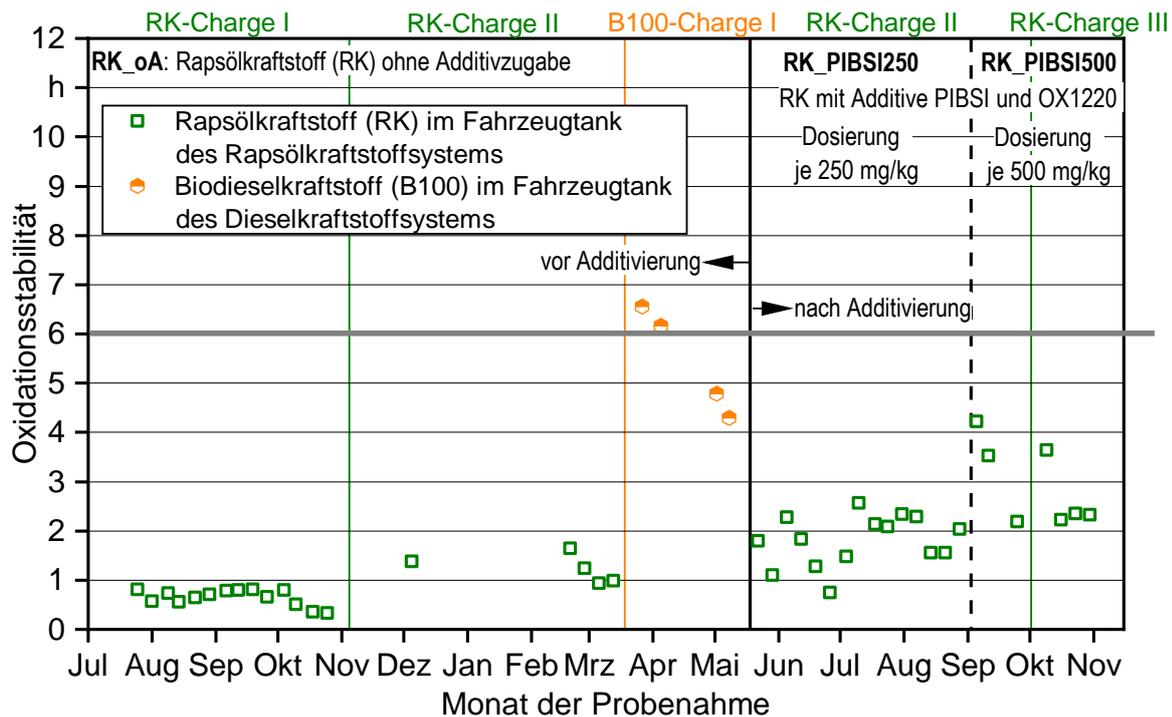


Abbildung 85: Oxidationsstabilität (OxiStab) des Rapsöls aus dem Rapsölkraftstofftank und des Biodiesels aus dem Dieselkraftstofftank des Traktors FE-S

Grundsätzlich wird die Abnahme der Oxidationsstabilität durch hohe Temperaturen, Licht-einstrahlung sowie katalytisch wirkende Metalle, wie z. B. Kupfer, beschleunigt [52]. Die bei der Kraftstoffalterung wirkende Autoxidation ist eine radikalische Kettenreaktion, bei der Hydroperoxide entstehen, die weiter zu Aldehyden, Ketonen und Fettsäuren reagieren [53][51]. Diese Abbauprodukte können die Ablagerungsbildung im Kraftstoffsystem begünstigen.

Der Biodiesel (B100) im Dieselkraftstoffsystem weist im Vergleich zum Rapsölkraftstoff eine vergleichsweise hohe OxiStab von 8,8 h im Vorratstank an der Zapfanlage und im Bereich zwischen 4 h und 7 h im Fahrzeugtank auf. Dies lässt darauf schließen, dass die schnelle Alterung des Rapsöls im Fahrzeugtank auf den höheren thermischen Stress im Rapsölkraftstoffsystem im Vergleich zum Dieselkraftstoffsystem zurückzuführen ist (siehe Abbildung 84). Es ist ferner wahrscheinlich, dass der handelsübliche B100-Kraftstoff nach DIN EN 14214 mit einem Oxidationsstabilisator additiviert ausgeliefert wurde. Zudem verweilte der untersuchte Biodiesel geringere Zeiten im Fahrzeugtank, da der Tank ein geringeres Volumen als der Rapsölkraftstofftank aufweist. Insgesamt erscheint es sinnvoll, den thermischen Stress im Rapsölkraftstoffsystem zu reduzieren, um die Bildung von ablage-rungsfördernden Abbauprodukten des Rapsölkraftstoffs im Fahrzeugtank zu minimieren.

Da technische Umbauten am Kraftstoffsystem zur Stabilisierung der Qualität des Rapsölkraftstoffs im Fahrzeugtank vom Umrüster nicht vorgesehen waren, wurde der Rapsölkraftstoff additiviert. Der Einsatz des Oxidationsstabilisators OX1220 sowie des Reinigungsadditivs XUD9 von der Fa. ERC mit einer Dosierung von je 250 mg/kg bewirkte

bei Kraftstoffproben aus dem Fahrzeugtank eine geringfügige Anhebung der OxiStab von  $0,7 \pm 0,2$  h vor der Additivierung auf  $1,8 \pm 0,6$  h nach der Additivierung, wie in Abbildung 85 zu sehen ist. Bei einer Additiv-Dosierung von je 500 mg/kg XUD9 bzw. OX1220 stieg die OxiStab des Kraftstoffs im Fahrzeugtank weiter auf  $2,7 \pm 1,0$  h an. Trotz des Additivs bewegt sich die OxiStab des Rapsölkraftstoffs im Fahrzeugtank auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Säurezahl (SZ) der Rapsöl-Additiv-Mischungen im Fahrzeugtank lag im unkritischen Bereich zwischen 0,7 und 0,8 mg KOH/g. Aufgrund der insgesamt hohen thermischen Beanspruchung für den Rapsölkraftstoff im Kraftstoffsystem werden folgende Modifikationen am Traktor vorgeschlagen.

- Austausch katalytisch wirkender Bauteile (z. B. des kupferverlöteten Wärmetauschers)
- Reduzierung der Umlaufmenge im Niederdruckkraftstoffsystem
- Absenkung der Kraftstofftemperaturen
- Einleitung des Kraftstoffs aus dem Rücklauf in den Vorlauf
- Einbau eines Kühlers in den Kraftstoffrücklauf

In einem Stichversuch am Traktorenprüfstand wurde exemplarisch die Auswirkung abgesenkter Rapsölkraftstofftemperaturen auf die Leistungsparameter untersucht. Die Vor- ( $T_{VL}$ ) und Rücklauf- ( $T_{RL}$ ) des Rapsölkraftstoffs liegt beim Traktor FE-S unter Vollast am Prüfstand bei  $T_{VL} = 79$  C bzw.  $T_{RL} = 81$  C ( $n = 3$ ). Die mittlere Kraftstofftemperatur wurde durch die Temperierung des Rapsöls im Versuchstanks sowie die Deaktivierung vorhandener Vorwärmeinrichtungen (elektr. Durchlauferhitzer und Wärmetauscher) in einem ersten Schritt auf  $T_{VL} = 67$  C bzw.  $T_{RL} = 69$  C ( $n = 1$ ) und in einem zweiten Schritt auf  $T_{VL} = 55$  C bzw.  $T_{RL} = 61$  C ( $n = 1$ ) abgesenkt. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der Temperaturvariation.

*Tabelle 12: Mittlere Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad unter Vollast ( $1.400 - 2100 \text{ min}^{-1}$ ) bei verschiedenen Temperaturen des Rapsölkraftstoffs (RK) im Vor- und Rücklauf des Kraftstoffsystems*

RK-Vorlauf-temperatur ( $T_{VL}$ ) in C	78,5	66,8	54,6
RK-Rücklauf-temperatur ( $T_{RL}$ ) in C	80,5	68,7	61,4
Leistung in kW	118,0	119,8	118,0
Einspritzmenge in $\text{mm}^3/\text{Hub}$	120,4	126,1	124,7
Wirkungsgrad in %	32,0	32,1	32,1

Es zeigt sich, dass mit abgesenktem Temperaturniveau im Rapsölkraftstoffsystem die mittlere Leistung, die Einspritzmenge und der Wirkungsgrad unter Vollast vergleichbar mit den Kennwerten bei höheren Temperaturen sind. Die Verringerung der Kraftstofftemperaturen bietet somit die Chance die Kraftstoffalterung im Fahrzeugtank zu verlangsamen und

daraus resultierende Ablagerungsbildung im Injektor zu vermeiden. In weiterführenden Untersuchungen gilt es die Kraftstoffqualität im Fahrzeugtank durch technische Maßnahmen zu verbessern bzw. weitere kraftstoffschonende Umrüstsysteme zu untersuchen.

#### **II.1.7.2.2 Kenngrößen der Ablagerungsbildung**

Im Folgenden sollen Kenngrößen zur Detektion der Ablagerungsbildung bestimmt werden, welche anhand von Leistungs-, Kraftstoffverbrauchs- und Abgasemissionsmessungen mit den Traktoren FE-S, JD-Wö und JD-K abgeleitet werden können.

#### **Leistungs-, Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmessung am Traktors FE-S**

Am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) fanden zwischen 240 Bh und 2.100 Bh mehrere Messungen am Traktorenprüfstand statt. Die Leistung bei der Nenndrehzahl von  $2.100 \text{ min}^{-1}$  ist im Dieselbetrieb mit 141 kW an der Zapfwelle bei 240 Bh (Ausgangszustand) um ca. 19 % geringer als die vom Hersteller mit 174 kW angegebene Motornennleistung nach der Typgenehmigungsprüfung. Die geringere Leistung (gemessen an der Zapfwelle) im Vergleich zur angegebenen Nennleistung am Motorenprüfstand ergibt sich durch Leistungsverluste an den Nebenaggregaten bzw. Getriebekomponenten. In Abbildung 86 ist der zeitliche Verlauf von Leistung, Drehmoment und spezifischem Kraftstoffverbrauch der Messungen mit Diesel- und Rapsölkraftstoff bei den Motordrehzahlen  $1.700 \text{ min}^{-1}$  und  $1.500 \text{ min}^{-1}$  unter Vollast dargestellt.

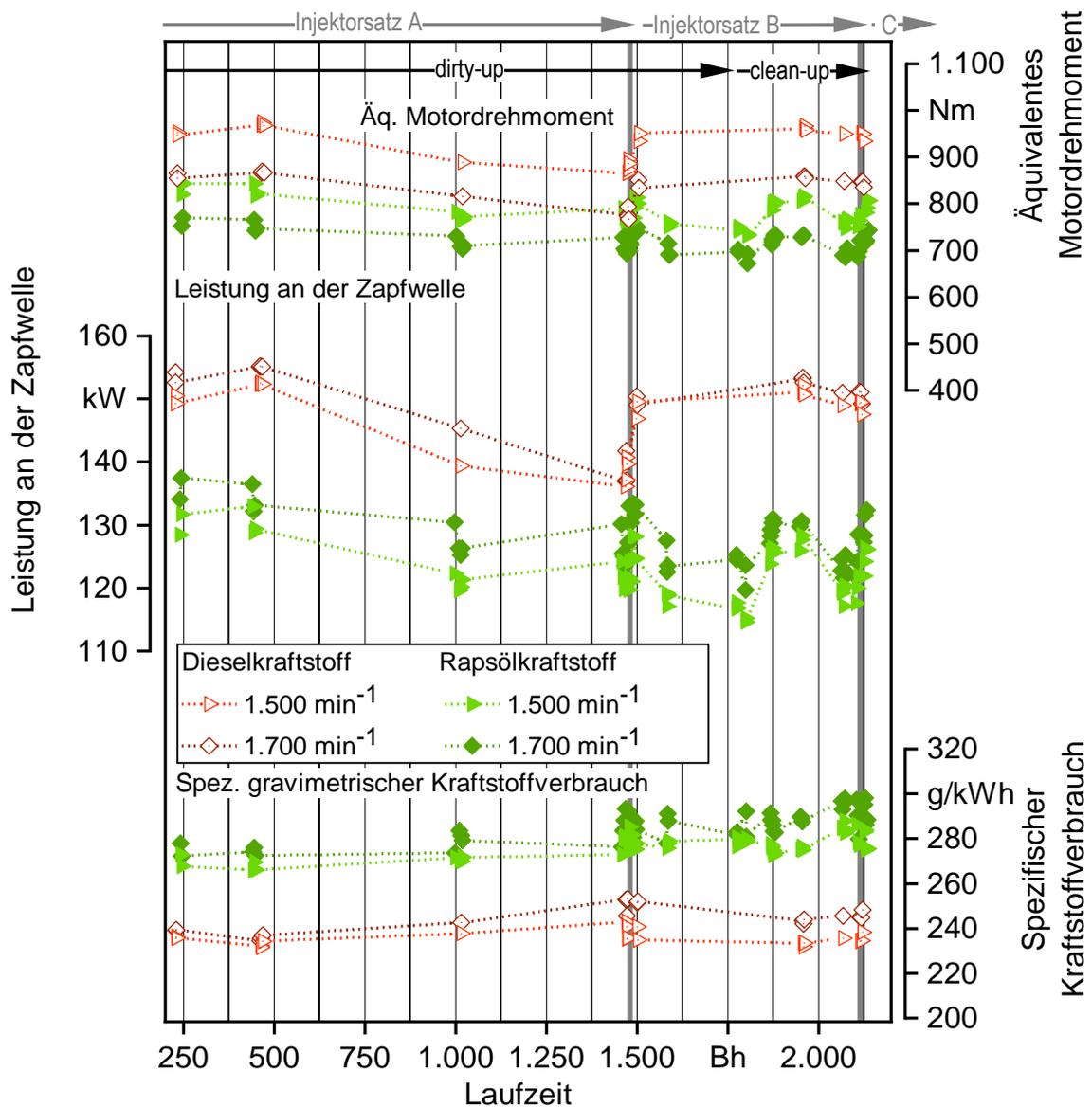


Abbildung 86: Äquivalentes Motordrehmoment, Leistung an der Zapfwelle und spezifischer gravimetrischer Kraftstoffverbrauch des Fendt 724 S4 (FE-S) mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff bei verschiedenen Motordrehzahlen unter Vollast bei unterschiedlichen Betriebsstunden der Injektoren (Einzelwiederholungen)

Wie bereits in anderen Untersuchungen festgestellt wurde [18][14][61] ist die Leistung im Rapsölbetrieb ohne Anpassung der Motorparameter moderner Common-Rail Motoren geringer als im Dieselpetrieb. Im Mittel beträgt der Unterschied unter Vollast ca. 15 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über den gesamten untersuchten Drehzahlbereich der Leistungsmessung im Rapsölbetrieb im Mittel etwa 10 Vol.-% weniger Kraftstoff pro Hub in den Brennraum eingespritzt wird als beim Betrieb mit Dieselkraftstoff. Hinzu kommt, dass Rapsölkraftstoff einen ca. 5 % geringeren volumetrischen Heizwert aufweist.

Der Wirkungsgrad unter Volllast unterscheidet sich im Diesel- und Rapsölbetrieb kaum. Die Messreihen ab ca. 1.000 Bh zeigen einen leichten Rückgang der Leistungskennwerte im Diesel- und Rapsölbetrieb. Im Rapsölbetrieb sank die maximale Leistung an der Zapfwelle von 134 kW (Ausgangszustand) auf 128 kW bei 1.000 Bh sowie 126 kW bei 1.460 Bh. Auch im Betrieb mit Dieselkraftstoff nahm die maximale Leistung von 153 kW bei 465 Bh auf 140 kW bei 1.470 Bh ab. Bei den Versuchen mit Injektorsatz A reduzierte sich zudem zwischen 236 Bh und 1.470 Bh das maximal eingespritzte Volumen an Dieselkraftstoff von 153 mm<sup>3</sup>/Hub auf 146 mm<sup>3</sup>/Hub und an Rapsölkraftstoff von 142 mm<sup>3</sup>/Hub auf 136 mm<sup>3</sup>/Hub. Bei den Messungen mit Rapsölkraftstoff war bei 1.460 Bh und mit Dieselkraftstoff bei 1.470 Bh ein ca. 2 % höherer mittlerer spezifischer Kraftstoffverbrauch festzustellen. Der Abgasgedruck vor der Abgasnachbehandlung war mit 165 mbar bei 1.460 Bh annähernd auf dem Niveau des Ausgangszustands von 162 mbar (bei 247 Bh). Sein Einfluss auf die Leistungskennwerte ist somit zu vernachlässigen. Bei 1.480 Bh wurde der gebrauchte Injektorsatz A gegen den neuen Injektorsatz B getauscht. Danach zeigte sich nahezu die gleiche Leistungs- und Verbrauchscharakteristik mit Rapsölkraftstoff wie bei der Ausgangsmessung des Injektorensatzes A bei 250 Bh. Dies lässt darauf schließen, dass der beobachtete Leistungsrückgang während des Betriebs mit dem Injektorsatz A auf die Bildung von Ablagerungen zurückzuführen ist, wodurch sich die maximale Einspritzmenge im Vergleich zum Ausgangszustand reduzierte.

Weitere Messungen zeigten bereits schon nach kurzer Einsatzzeit des Injektorsatzes B von ca. 100 bzw. 290 Bh (Betriebsstundenzählerstand des Traktors: 1.580 bzw. 1.770 Bh) erneut eine Minderung der Leistung sowie der Einspritzmenge im Vergleich zum Ausgangszustand. Ab dem Betriebsstundenzählerstand von 1.770 Bh des Traktors werden Strategien zur Ablagerungsminderung („clean-up“) untersucht, welche im Kapitel II.1.7.2.3 näher ausgeführt werden.

Nachfolgend werden weitere mögliche Kenngrößen zur Detektion der Ablagerungsbildung („dirty-up“) untersucht. Dementsprechend zeigt Abbildung 87, dass neben der Leistung an der Zapfwelle ( $P_{ZV}$ ) auch die weiteren Messgrößen Abgastemperatur vor der AGN ( $T_{Abgas}$ ), Motoröltemperatur ( $T_{Moel}$ ) und Kohlenstoffmonoxid (CO) mit der gemessenen Einspritzmenge  $m_{Mess}$  korrelieren.

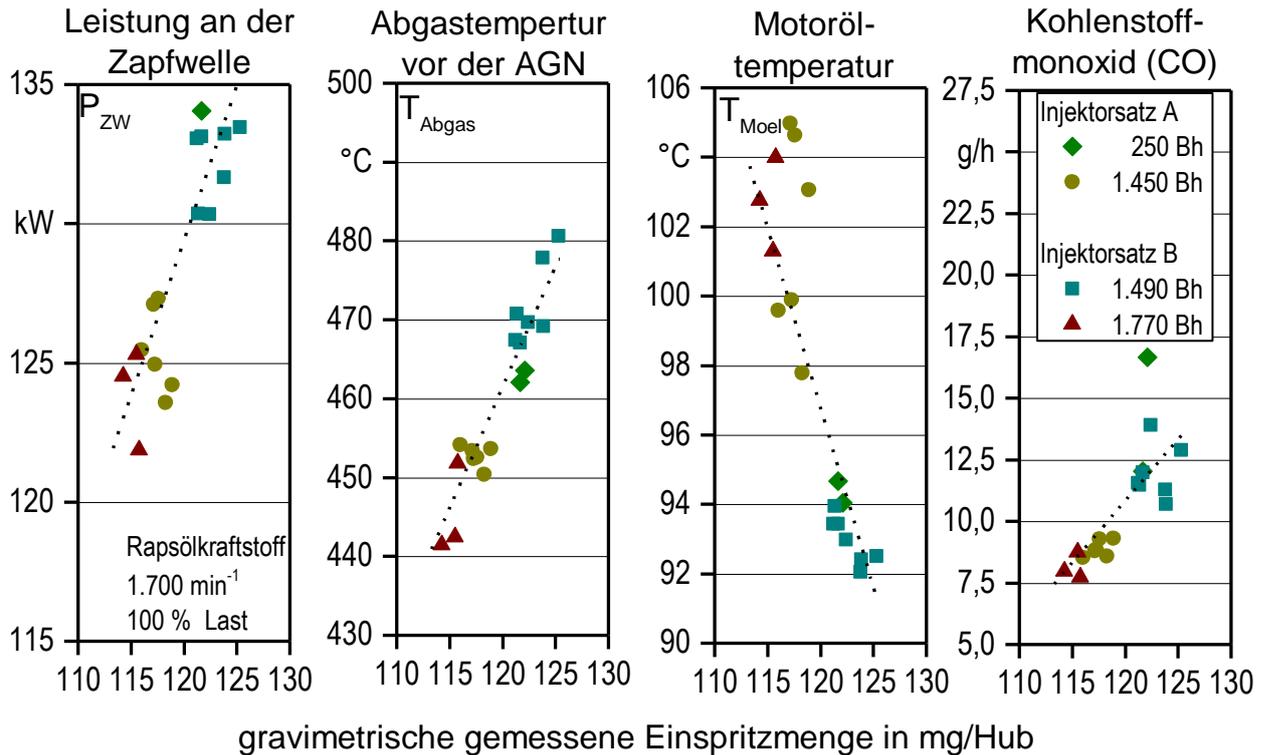


Abbildung 87: Leistung ( $P_{ZW}$ ), Abgastemperatur nach der AGN ( $T_{Abgas}$ ), Motorölttemperatur ( $T_{Moel}$ ), Kohlenstoffmonoxid (CO) in Abhängigkeit der Einspritzmenge  $m_{Mess}$  mit Rapsölkraftstoff bei  $1.700 \text{ min}^{-1}$  unter Vollast

Die Abgastemperatur  $T_{Abgas}$  steigt mit der Leistung an der Zapfwelle bzw. der Einspritzmenge an. Anders als erwartet, sinkt jedoch bei zunehmender Motorleistung die Motorölttemperatur. Als Ursache dafür wird vermutet, dass mit zunehmender Motorleistung das Kühlsystem (Viskolüfter) hochregelt. Die höhere Einspritzmenge neuwertiger Injektoren bewirkt auch eine Abnahme des Verbrennungsluftverhältnisses  $\lambda$  (Lambda). Der geringere Sauerstoffanteil im Gemisch begünstigt eine unvollständigere Verbrennung und damit das Entstehen von CO-Emissionen.

Die Abnahme der maximalen Leistung ( $P_{ZW}$ ) von 133 kW auf 119 kW mit Rapsölkraftstoff innerhalb der Traktorlaufzeit von 1.480 Bh bis 1.800 Bh (Injektorsatz B) führte zu keiner signifikanten Änderung der erfassten Kraftstofftemperaturen. Abbildung 88 zeigt die Temperaturen im Kraftstoffsystem des Traktors FE-S unter Vollast bei einer Motordrehzahl von  $1.700 \text{ min}^{-1}$  zwischen 1.480 Bh und 1.800 Bh mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff.

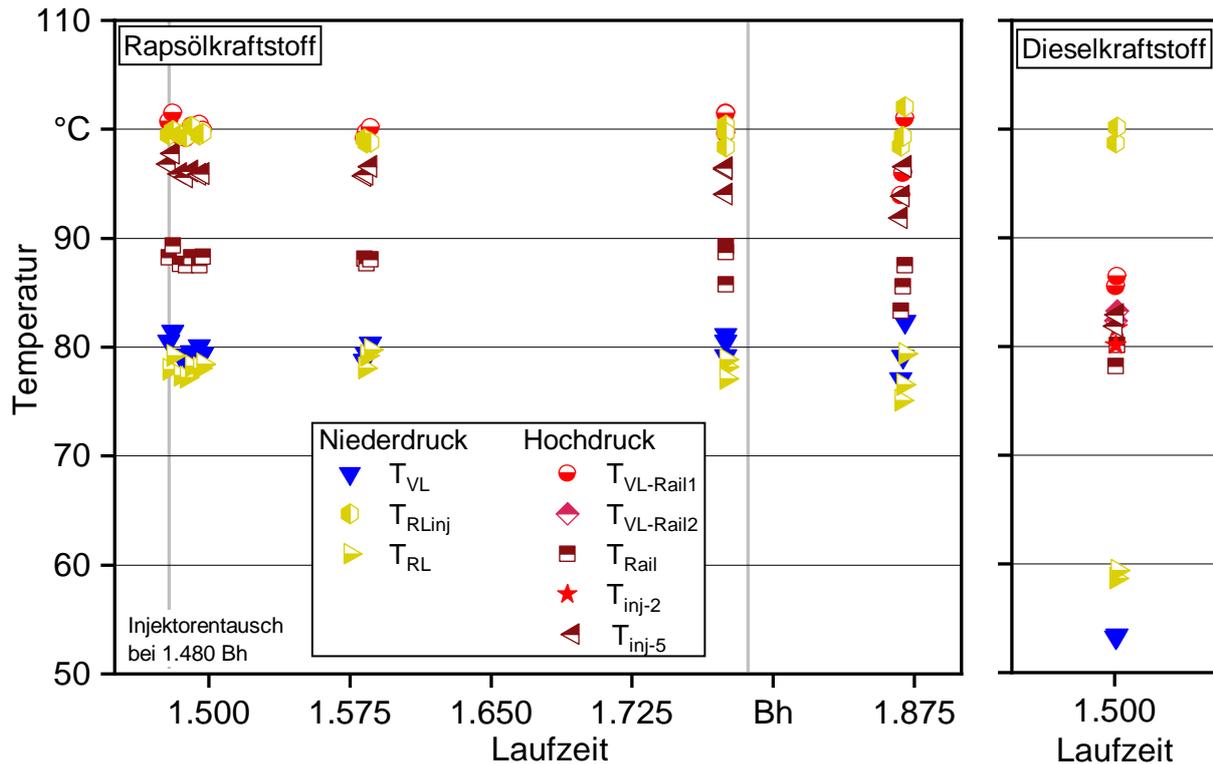


Abbildung 88: Temperaturen im Kraftstoffsystem des Traktors FE-S bei Vollast ( $1.700 \text{ min}^{-1}$ , Injektorsatz B) mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff

Die Rapsölkraftstofftemperatur im Vorlauf ( $T_{VL}$ ) von  $80,1 \pm 1,3 \text{ °C}$  und Rücklauf ( $T_{RL}$ ) von  $78,4 \pm 1,0 \text{ °C}$  wird maßgeblich über den Wärmetauscher von der Kühlmitteltemperatur ( $87,3 \pm 1,0 \text{ °C}$ ) angehoben. Der Dieseldieselkraftstoff durchläuft keinen Wärmetauscher und ist dadurch deutlich kühler ( $T_{VL} = 53,4 \pm 0,2 \text{ °C}$ ,  $T_{RL} = 59 \pm 0,5 \text{ °C}$ ). Im Hochdruckkraftstoffsystem fällt die Differenz der Rapsölkraftstofftemperatur von  $87,9 \pm 1,0 \text{ °C}$  ( $T_{Rail}$ ) bis  $100,4 \pm 1,0 \text{ °C}$  ( $T_{VL-Rail1}$ ) zur Dieseldieseltemperatur von  $79,2 \pm 1,4 \text{ °C}$  ( $T_{Rail}$ ) bis  $86 \pm 0,6 \text{ °C}$  ( $T_{VL-Rail1}$ ) geringer aus als im ND. Die Temperaturmesswerte in der Rücklaufleitung der Injektoren ( $T_{RL-inj}$ ) liegen bei beiden zwischen 99 bis 101 °C. Der Rapsölkraftstoff ist daher vor allem im Niederdruckkraftstoffsystem höherem thermischen Stress ausgesetzt als der Dieseldieselkraftstoff.

Neben der Leistung an der Zapfwelle kann auch die Veränderung des Kraftstoffflusses durch die Injektoren als eine weitere Kenngröße betrachtet werden, welche das Vorhandensein von Ablagerungen anzeigt. Abbildung 89 zeigt, dass die Injektoren im Ausgangszustand bei 250 Bh (Injektorsatz A) und bei 1.490 Bh (Injektorsatz B) mit Rapsöl- und Dieseldieselkraftstoff über den gesamten Drehzahlbereich höhere gemessene Einspritzmengen ( $m_{Mess}$ ) in mg/Hub aufweisen als nach 1.200 bzw. 280 Bh Einsatzzeit. Die aus den ECU-Daten berechneten Einspritzmengen  $m_{Calc}$  bleiben hingegen gleich, da diese primär von der konstanten Bestromungsdauer des Injektoröffnungsventils abgeleitet werden.

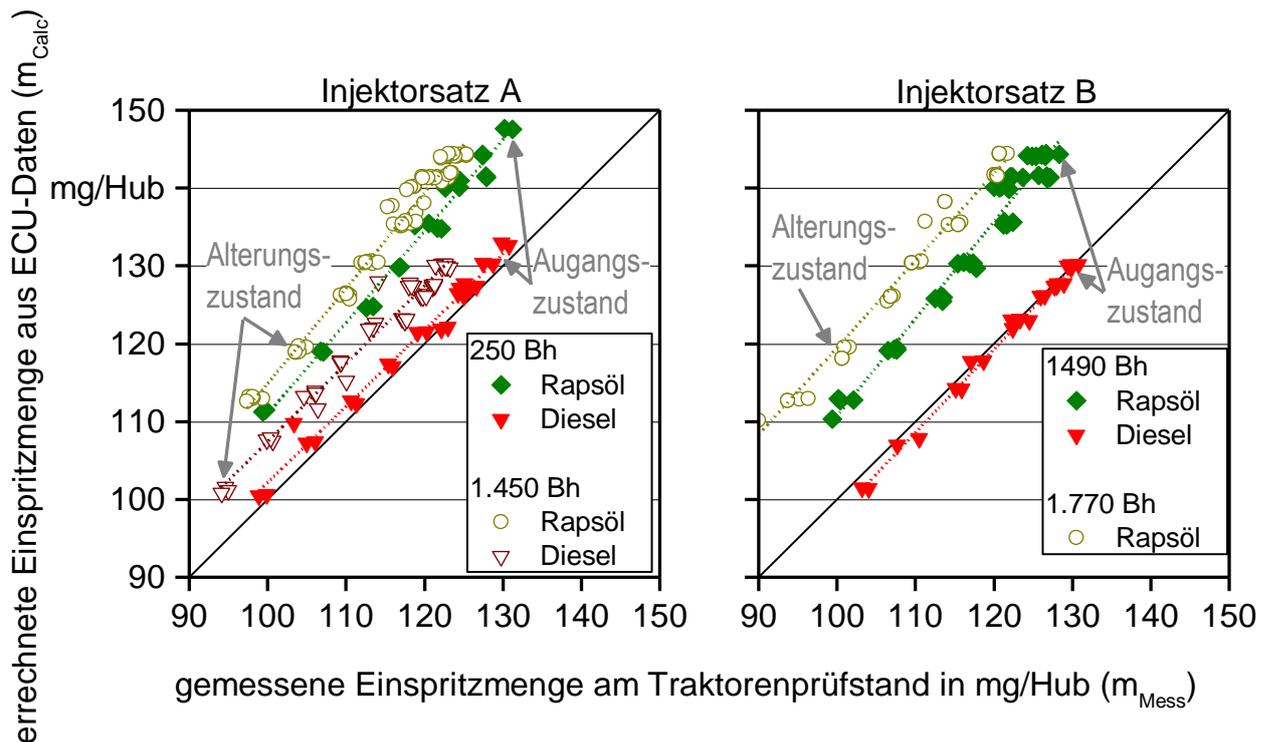


Abbildung 89: Gemessene ( $m_{\text{Mess}}$ ) und aus ECU-Daten errechnete Einspritzmenge ( $m_{\text{Calc}}$ ) bei Motordrehzahlen von 1.000 bis 2.100  $\text{min}^{-1}$  unter Volllast mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff am Traktor FE-S

Bei den Injektoren im Neuzustand stimmen die mit Dieselmotorkraftstoff gemessenen Einspritzmengen ( $m_{\text{Mess}}$ ) mit den aus den ECU-Daten errechneten Einspritzmengen ( $m_{\text{Calc}}$ ) mit einer Abweichung von  $\pm 2$  mg/Hub sehr gut überein. Im Rapsölbetrieb ist die gemessene Einspritzmenge  $m_{\text{Mess}}$  um ca. 10 mg/Hub geringer als die berechnete Einspritzmenge  $m_{\text{Calc}}$ , da das Berechnungsmodell für den Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff kalibriert ist und die höhere Dichte und Viskosität von Rapsölmotorkraftstoff nicht berücksichtigt.

Die Abweichung zwischen der tatsächlich gemessenen Einspritzmenge  $m_{\text{Mess}}$  und der berechneten ECU-Einspritzmenge  $m_{\text{Calc}}$  könnte als Indikator zur Feststellung von Injektorablagerungen dienen. In der Praxis wäre es denkbar, die Einspritzmengenabweichung in Fachwerkstätten mit einem Kraftstoffdurchflussmessgerät zu prüfen.

Mit den Messungen am Traktorenprüfstand soll geprüft werden, ob sich die Ablagerungen am Injektor auf die Rohemissionen vor der Abgasnachbehandlung auswirken. Bei den Messungen mit dem Injektorsatz A sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Rohabgas in den Prüfphasen 1 bis 4 (Nenn Drehzahl von 2.100  $\text{min}^{-1}$ ) im Diesel- und Rapsölbetrieb auf einem vergleichbaren Niveau, wie in Abbildung 90 zu sehen ist.

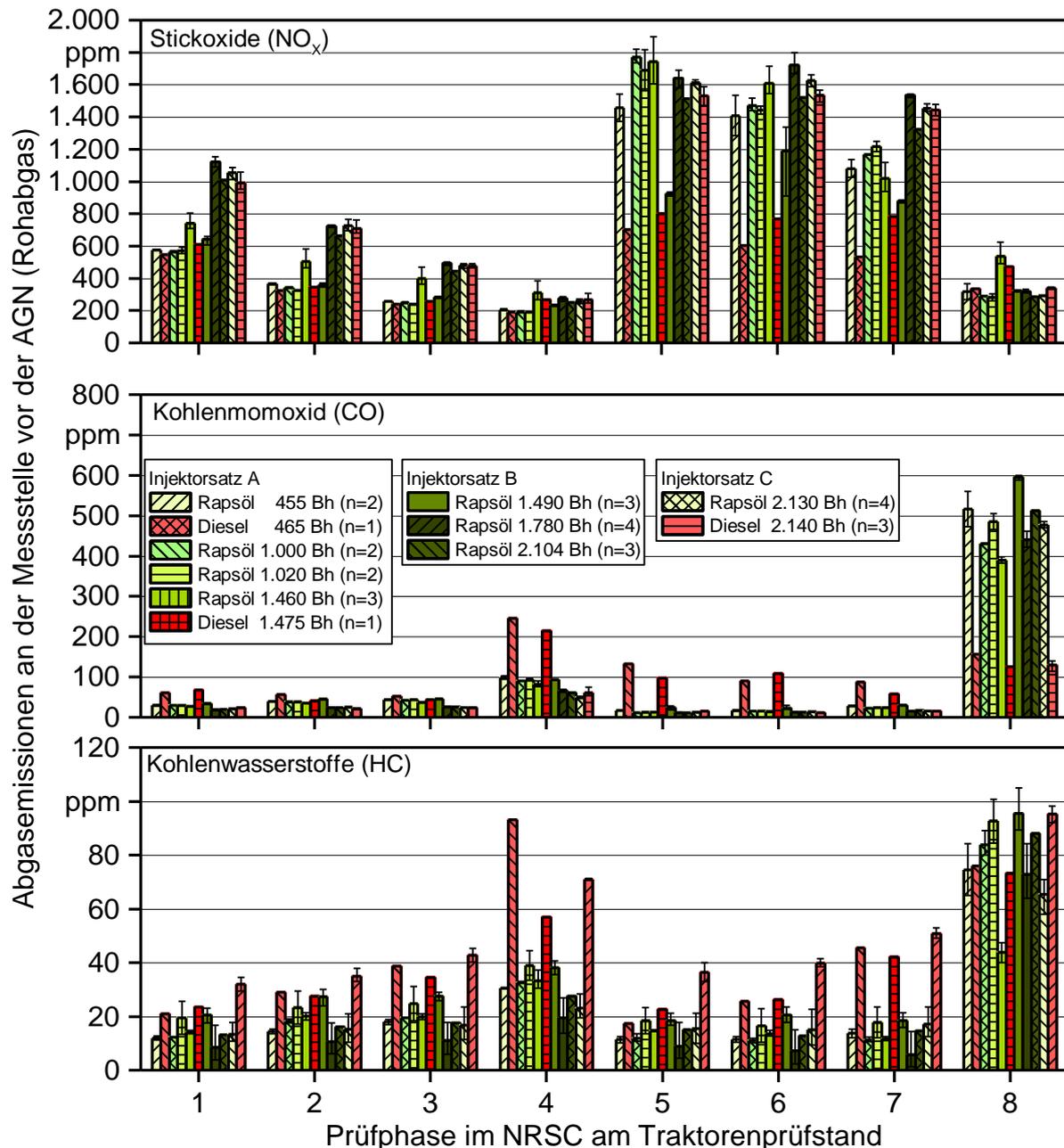


Abbildung 90: Mittelwerte und Spannweiten der  $\text{NO}_x$ -, CO- und HC-Emissionen des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff im Rohabgas vor der Abgasnachbehandlung (AGN)

Bei Nenndrehzahl liegt das Niveau der  $\text{NO}_x$ -Emissionen vor der AGN unter 800 ppm. Abbildung 91 zeigt, dass die Abgasrückführungsrate (AGR-Rate) bei den Prüfphasen 1 bis 4 der Nenndrehzahl bei beiden Kraftstoffen mit dem Injektorsatz A zwischen 19 % und 26 % beträgt. In den Prüfphasen 5, 6 und 7 (Zwischendrehzahl von  $1.500 \text{ min}^{-1}$ ) fallen die  $\text{NO}_x$ -Rohemissionen mit Rapsöl in etwa doppelt so hoch aus wie mit Diesel. Grund hierfür ist, dass im Betrieb mit Rapsölkraftstoff die Abgasrückführung durch die Motorsteuerung nicht aktiviert wurde, im Dieselbetrieb jedoch schon.

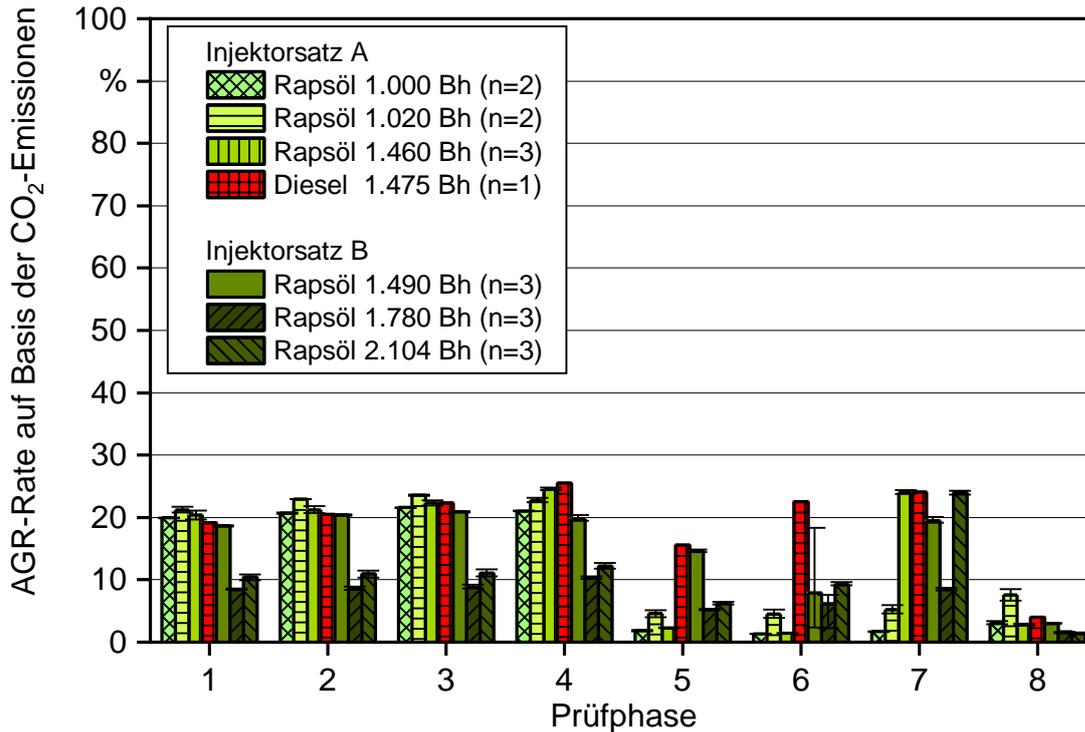


Abbildung 91: Mittelwerte und Spannweiten der Abgasrückführrate (AGR) des Traktors FE-S in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff

Auch bei den Messungen mit dem Injektorsatz B wird deutlich, dass die Unterschiede bei den Rohabgasemissionen primär aus unterschiedlichen AGR-Raten bei den verschiedenen Prüfphasen resultieren. So ist bei den Messungen mit Rapsölkraftstoff bei 1.780 Bh die AGR-Rate in den meisten Prüfphasen nur knapp halb so hoch. Folglich ergeben sich überwiegend höhere  $\text{NO}_x$ - und zugleich niedrigere CO- sowie HC-Emissionen im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen mit Rapsölkraftstoff. In den meisten Prüfphasen waren die HC- und CO-Emissionen mit Dieselmotorkraftstoff vor der AGN höher als mit Rapsölkraftstoff, wie in Abbildung 90 zu sehen ist. Dies ist auf den höheren Sauerstoffanteil im Rapsölkraftstoff im Vergleich zum Diesel zurückzuführen [18][16][13][46].

Im Leerlauf sind hingegen die CO-Emissionen mit Rapsöl höher als mit Diesel. Der Leerlauf (Prüfphase 8) ist geprägt durch eine schlechte Gemischaufbereitung, weil nur wenig Kraftstoff mit geringem Druck eingespritzt wird und sich der Motor abkühlt. Untersuchungen von LÜFT et al. (2009) [40] zur Kraftstoffzerstäubung von Rapsöl- und Dieselmotorkraftstoff in Druckkammern zeigen, dass bei der Einspritzung von Rapsöl längere und schmalere Einspritzstrahlen und größere Tropfendurchmesser entstehen und damit schlechtere Bedingungen für eine schadstoffarme Verbrennung vorherrschen.

Die Höhe der AGR-Rate, die kraftstoffspezifischen Eigenschaften (z. B. Heizwert- oder Viskositätsunterschiede zwischen Diesel- und Rapsölkraftstoff) und gegebenenfalls auch noch weitere Einflussgrößen überlagern die Effekte von Ablagerungen auf die Einspritzcharakteristik und damit auf das Emissionsverhalten. Ein Zusammenhang der

Rohemissionen mit der Ablagerungsbildung an den Injektoren ist somit nicht erkennbar. Die Abgasemissionen sind daher als Zeigergröße für die Ablagerungsbildung nicht geeignet.

### **Leistungs-, Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmessung am Traktors JD-Wö**

Der Traktor JD-Wö der Abgasstufe IV mit Abgasnachbehandlung und Abgasrückführung wurde vom Hersteller auf den Pflanzenölbetrieb optimiert. Im Gegensatz zum vorher beschriebenen Traktor Fendt FE-S wurden bei diesem Traktor auch Änderungen an der Motorsteuerung vorgenommen. Die Leistungs- und Emissionsmessung im Rahmen des Vorhabens erfolgten vor und nach einem Injektorentausch.

Die in Abbildung 92 dargestellten Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessungen konnten ohne Störung durchgeführt werden. Nach rund 505 Bh im Feldtest mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 erfolgten die Messungen mit dem gealterten Injektorsatz A. Die Messungen bei 510 Bh wurden mit dem neuen Injektorsatz B durchgeführt. Bei 528 Bh wurde untersucht, ob die Optimierung der AGR-Rate durch den Traktorhersteller die Leistung und den Kraftstoffverbrauch beeinflusst.

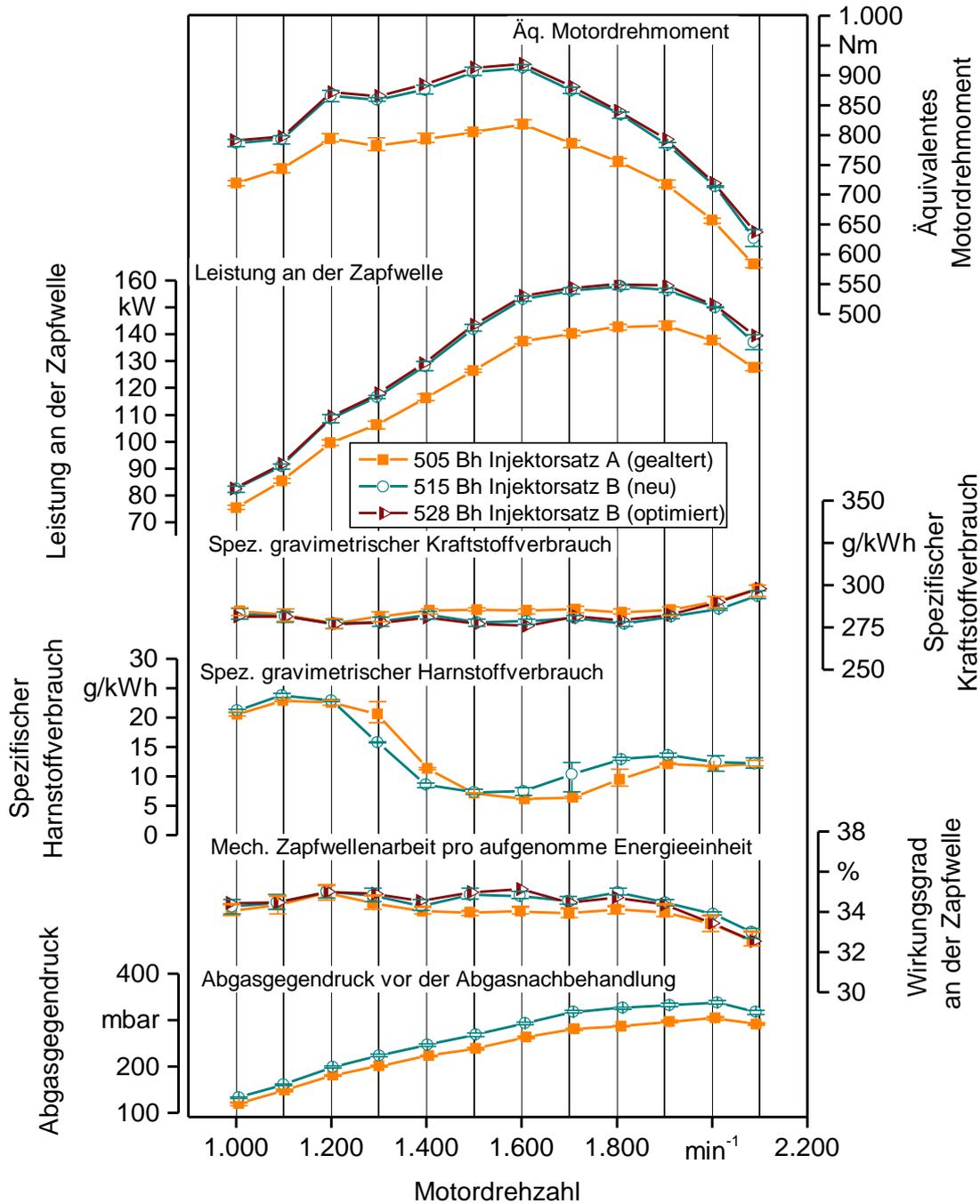


Abbildung 92: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des spezifischen Kraftstoff- und des Harnstoffverbrauchs sowie Wirkungsgrad an der Zapfwelle des John Deere 6215R (JD-Wö) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff (n=3)

Die maximale Leistung an der Zapfwelle (ohne aktiviertem Boost) mit Rapsölkraftstoff liegt mit den gealterten Injektoren (A) bei 143 kW und mit den neuen Injektoren (B) bei 156 kW. Der Abgasgegendruck stieg nach dem Injektorentausch um 26 mbar an, was den Verbrennungsprozess kaum beeinflusst und auf den vorhandenen Leistungsanstieg zurückzuführen ist. Auch der spezifische gravimetrische Harnstoffverbrauch änderte sich kaum. Über alle Drehzahlen (2.100 bis 1.000 min<sup>-1</sup>) betrachtet hat der Traktor mit den neuen Injektoren

(B) eine um 8,8 % höhere Leistung an der Zapfwelle und einen um 1,4 % geringeren spezifischen gravimetrischen Kraftstoffverbrauch. Dies lässt auf das Vorhandensein von Ablagerungen im gealterten Injektorsatz A schließen. Die maximale Einspritzmenge  $m_{\text{Mess}}$  von 135 mg/Hub mit dem gealterten Injektorsatz A ist im Vergleich zur Einspritzmenge des neuen Injektorsatzes B mit 148 mg/Hub in Abbildung 93 dargestellt.

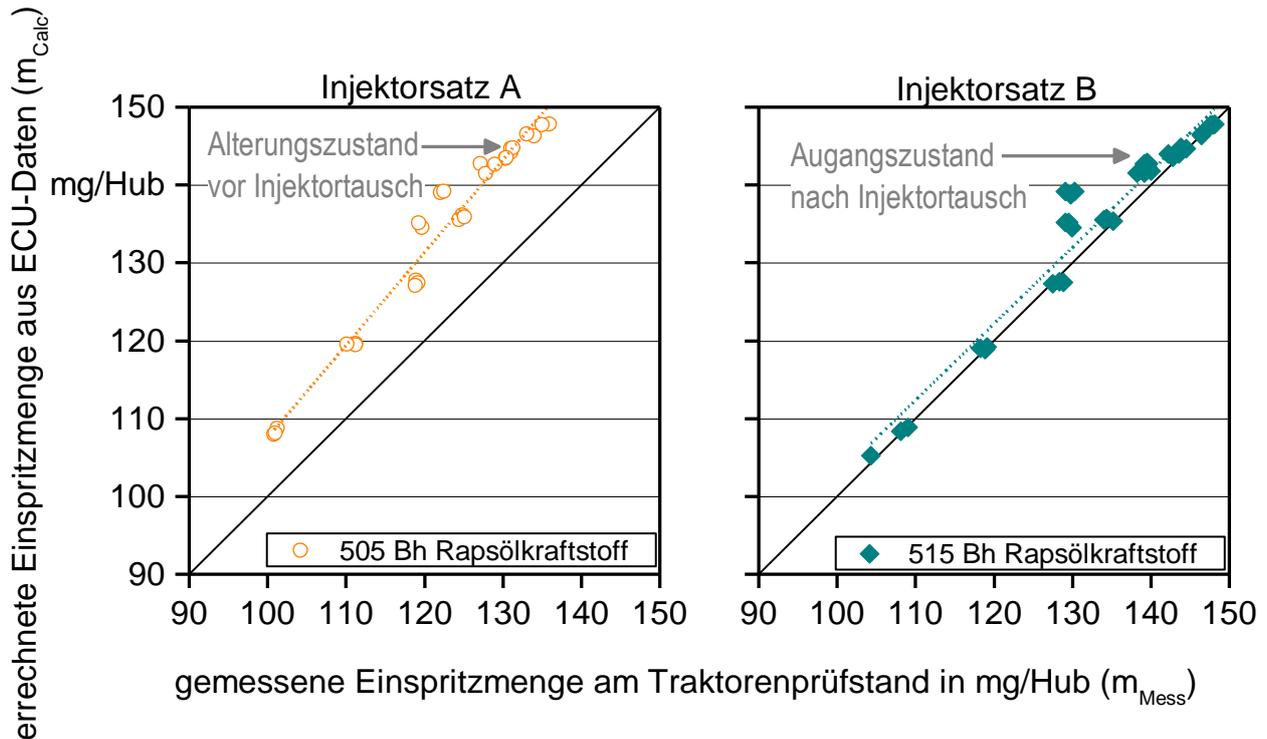


Abbildung 93: Gemessene ( $m_{\text{Mess}}$ ) und aus ECU-Daten errechnete Einspritzmenge ( $m_{\text{Calc}}$ ) bei Motordrehzahlen von  $1.000 \text{ min}^{-1}$  bis  $2.100 \text{ min}^{-1}$  unter Volllast mit Rapsölkraftstoff am Traktor JD-Wö

Bei den Messungen mit Rapsölkraftstoff und den neuen Injektoren (B) bei 515 Bh stimmen die gemessene ( $m_{\text{Mess}}$ ) und die aus Daten der Motorsteuerung (ECU) errechnete Einspritzmenge ( $m_{\text{Calc}}$ ) gut überein. Wie auch beim Traktor FE-S weisen die gealterten Injektoren eine größere Abweichung zwischen  $m_{\text{Mess}}$  und  $m_{\text{Calc}}$  auf.

Die Leistungssteigerung aufgrund des Injektortauschs bewirkte im Mittel um 45 % höhere CO-Emissionen vor der Abgasnachbehandlung, da durch die gestiegene Einspritzmenge das Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  von 1,36 auf 1,26 (z. B. bei  $1.500 \text{ min}^{-1}$ ) nahe zur Rußgrenze ( $\lambda < 1,2$ ) absinkt. Der Traktorhersteller optimierte daraufhin die Einstellungen der Abgasrückführung. Die Messung bei 528 Bh zeigt, dass dadurch weder die Leistung noch der Kraftstoffverbrauch signifikant beeinflusst wurden.

Die Stickstoffoxid- ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid- (CO) und Kohlenwasserstoffemissionen (HC) des Traktors JD-Wö wurden im Rohabgas, das heißt vor der Abgasnachbehandlung (AGN) erfasst.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Rohabgas bewegen sich in einem Bereich von 180 ppm bis knapp über 600 ppm und damit auf einem eher niedrigen Niveau. Die Ergebnisse in Abbildung 94 zeigen zudem keinen signifikanten Unterschied der NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betrieb mit gealterten (A) oder neuen Injektoren (B).

Wie in Abbildung 94 zudem zu sehen ist, sind in den Volllast-Prüfphasen 1 und 5 die CO-Emissionen im Rohabgas mit dem neuen Injektorsatz B knapp doppelt so hoch wie mit dem Injektorsatz A. Die Zunahme des CO-Ausstoßes wird, wie bereits oben erwähnt, auf das gesunkene Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  aufgrund der höheren eingebrachten Kraftstoffmenge zurückgeführt. In den übrigen Prüfphasen ist kein wesentlicher Unterschied zwischen den Messungen erkennbar, wenngleich sich in den Prüfphasen 4 und 8 bei geringster Last mit dem neuen Injektorsatz B geringere CO-Emissionen abzeichnen als mit Injektorsatz A.

Die HC-Emissionen sind mit den gealterten Injektoren (A) überwiegend höher als mit den neuen Injektoren (B). Dies könnte auf interne Ablagerungen (IDID) hinweisen, durch die sich unter anderem der Zeitpunkt der Einspritzung verändern kann, was sich wiederum auf die HC-Emissionen auswirkt. Aufgrund der geringen Differenz von weniger als 10 ppm kann dieser Zusammenhang jedoch nicht eindeutig belegt werden.

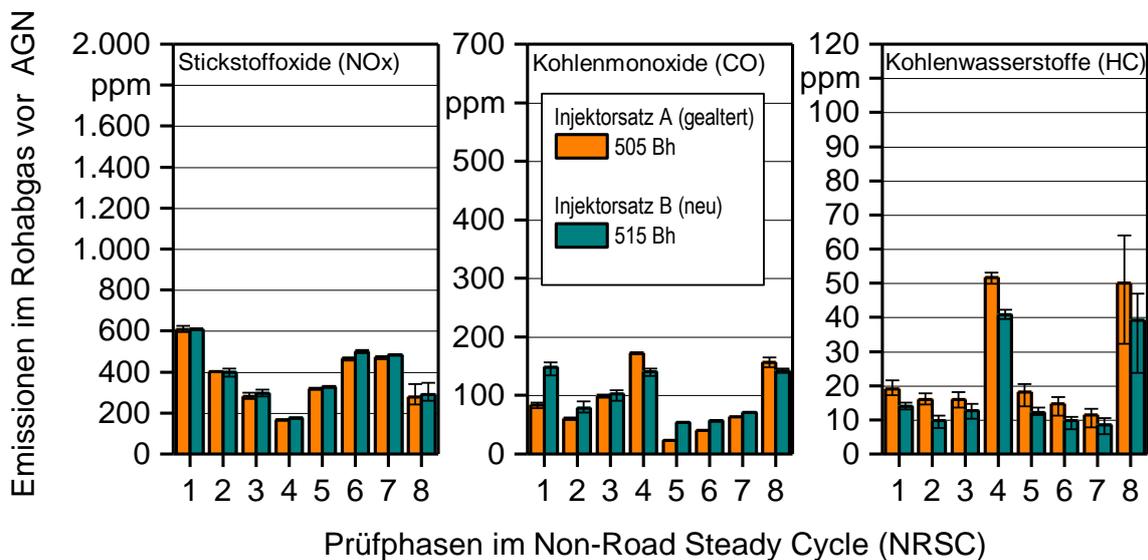


Abbildung 94: Mittelwerte und Spannweiten der NO<sub>x</sub>-, CO- und HC-Emissionen des Traktors JD-Wö in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsölkraftstoff im Rohabgas vor der AGN (je n=3)

Trotz der reduzierten Einspritzmenge im Volllastbetrieb mit dem gealterten Injektorsatz A am Traktor JD-Wö wirkt sich der Einbau der neuen Injektoren (B) kaum auf die Roh-emissionen aus. Das Emissionsverhalten vor der AGN wird also durch die Ablagerungsbildung kaum beeinflusst und eignet sich deshalb nicht als Zeigergröße für ein Vorhandensein von Ablagerungen. Abbildung 95 zeigt, dass sich die Kraftstofftemperaturen im Niederdruck-

und Hochdruckkraftstoffsystem durch den Tausch der Injektoren nicht unterscheiden. Es kann ausgeschlossen werden, dass sich der Leistungsanstieg nach dem Injektortausch aufgrund einer längeren Ansteuerungsdauer des Injektorsatzes B ergibt. So zeigt Abbildung 96, dass sich im Motorbetrieb unter Vollast (Prüfphasen 1 und 5) trotz der höheren Einspritzmenge mit Injektorsatz B die Ansteuerungsdauer nur geringfügig im Vergleich zu den gealterten Injektoren A ändert. Daher kann daher davon ausgegangen werden, dass die Motorsteuerung die Ablagerungsbildung nicht detektieren kann und die Einspritzmenge infolgedessen nachregelt. Zweifacheinspritzung erfolgt nur in den Phasen 4 und 8. In den restlichen wird pro Hub eine Haupteinspritzung durchgeführt. Die Daten aus Abbildung 95 und Abbildung 96 werden insbesondere zur Verwendung am Injektorprüfstand des Projektpartners OWI benötigt (siehe Kapitel II.1.5.2).

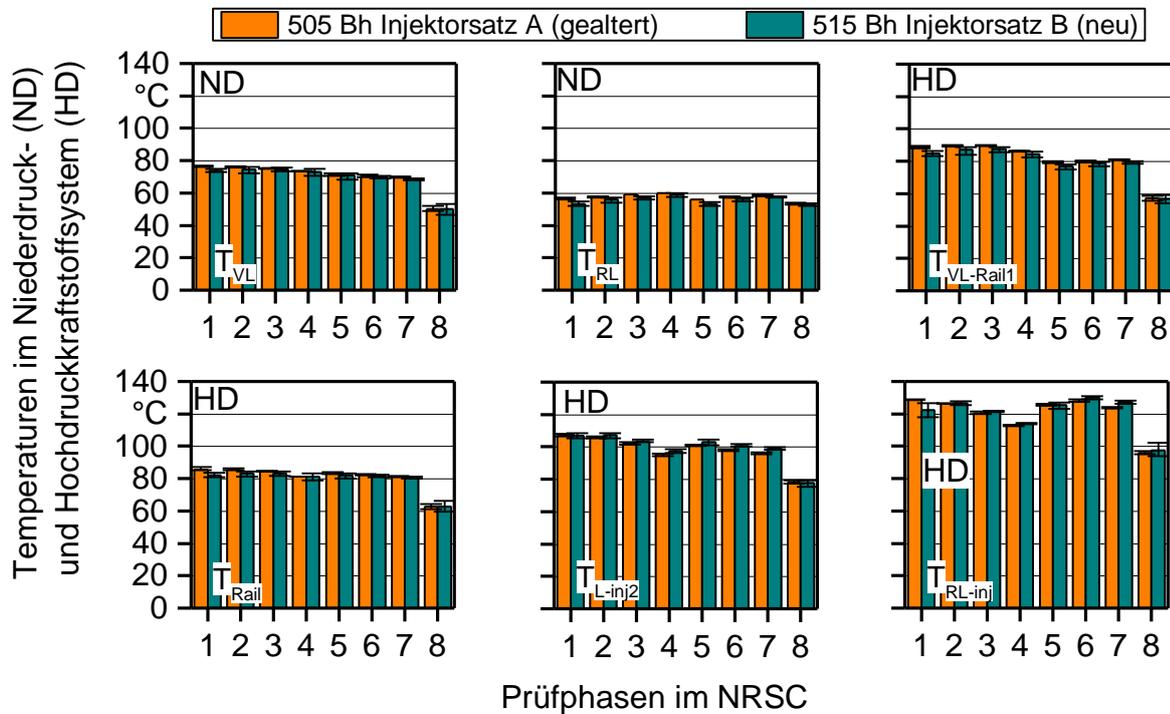


Abbildung 95: Mittelwerte und Spannweiten der Temperaturen im Kraftstoffsystem in den Prüfphasen des NRSC am Traktor JD-Wö mit Rapsölkraftstoff (n=3)

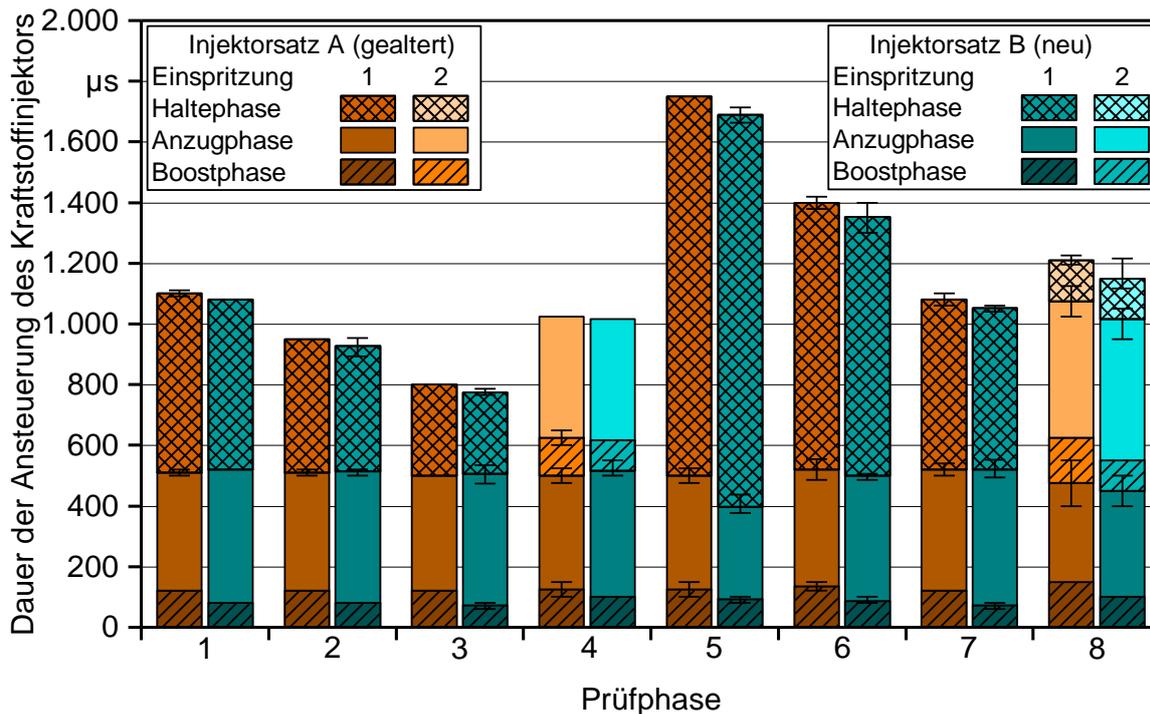


Abbildung 96: Mittlere Ansteuerungsdauer der Kraftstoffinjektoren auf Basis der Spannungs- und Stromsignale aus der ECU und die Unterteilung der Ansteuerdauer in Boostphase, Anzugsphase und Haltephase in den Prüfphasen des NRSC am Traktor JD-Wö ( $n=3$ )

### Begutachtung der Injektoren der Traktoren FE-S und JD-Wö

In Abbildung 97 sind die Injektoren im Neuzustand (0 Bh, links) und im gealterten Zustand der Traktoren FE-S und JD-Wö nach dem Feldtest mit Rapsölkraftstoff ohne Additivzusatz (RK\_oA) dargestellt.

Bei allen Einspritzlöchern des Injektorsatz A des Traktors FE-S waren die Austrittskanten frei von äußeren Ablagerungen. Je nach Injektor sind die Ablagerungen außerhalb des Wirkungsbereichs des Einspritzkegels unterschiedlich stark ausgeprägt. Die gut sichtbaren und freien Einspritzdüsenlöcher deuten darauf hin, dass die äußeren Ablagerungen das Einspritzverhalten nicht wesentlich beeinflussen. Vergleichbare Ergebnisse liegen auch für Injektoren von Traktoren der Abgasstufe IIIA und IIIB im Betrieb mit Rapsölkraftstoff vor [18][16][28].

In Abbildung 97 ist ein Injektor des Traktors JD-Wö im Neuzustand und der Injektorsatz A im gealterten Zustand (500 Bh) zu sehen. Im Vergleich zum Traktor FE-S sind deutlich mehr äußere Ablagerungen an den Injektorspitzen des Traktors JD-Wö vorhanden. Solch deutliche äußere Ablagerungen wurden bisher auch bei vergleichbaren Rapsöltraktoren noch nicht beobachtet [16][18]. Aber auch bei den Injektoren des Traktors JD-Wö waren bei allen Einspritzlöchern die Austrittskanten frei von äußeren Ablagerungen, so dass das Einspritzverhalten nicht oder nur wenig beeinträchtigt wurde.

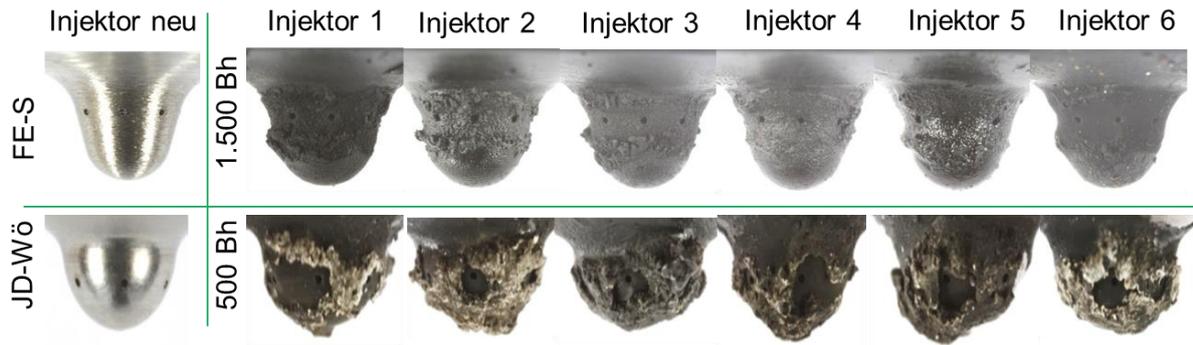


Abbildung 97: Injektoren im Neuzustand (links) und nach einer Alterung von 1.500 Bh beim Traktor FE-S und 500 Bh beim Traktor JD-Wö (je Injektorsatz A)

### Leistungs-, Emissions- und Zylinderdruckmessung am Traktors JD-K

Die Leistungs- und Emissionsmessung am John Deere 6930 Premium (JD-K) fanden mit Rapsölkraftstoff bei 5.580 Bh und 5.600 Bh statt. Zwischen den beiden Messreihen wurde der OWI-Betriebszyklus zur Ablagerungsbildung (siehe Kapitel II.1.5.2.2) angewandt, welcher für den nicht-motorischen Injektorenprüfstand konzipiert wurde und die Ablagerungsbildung im Kraftstoffsystem begünstigen soll.

Die Ergebnisse des Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung sowie des Wirkungsgrads sind in Abbildung 98 zu sehen. Die Messwerte aus früheren Untersuchungen [18] bei 50 Bh und bei 4.140 Bh dienen als zusätzliche Vergleichsbasis.

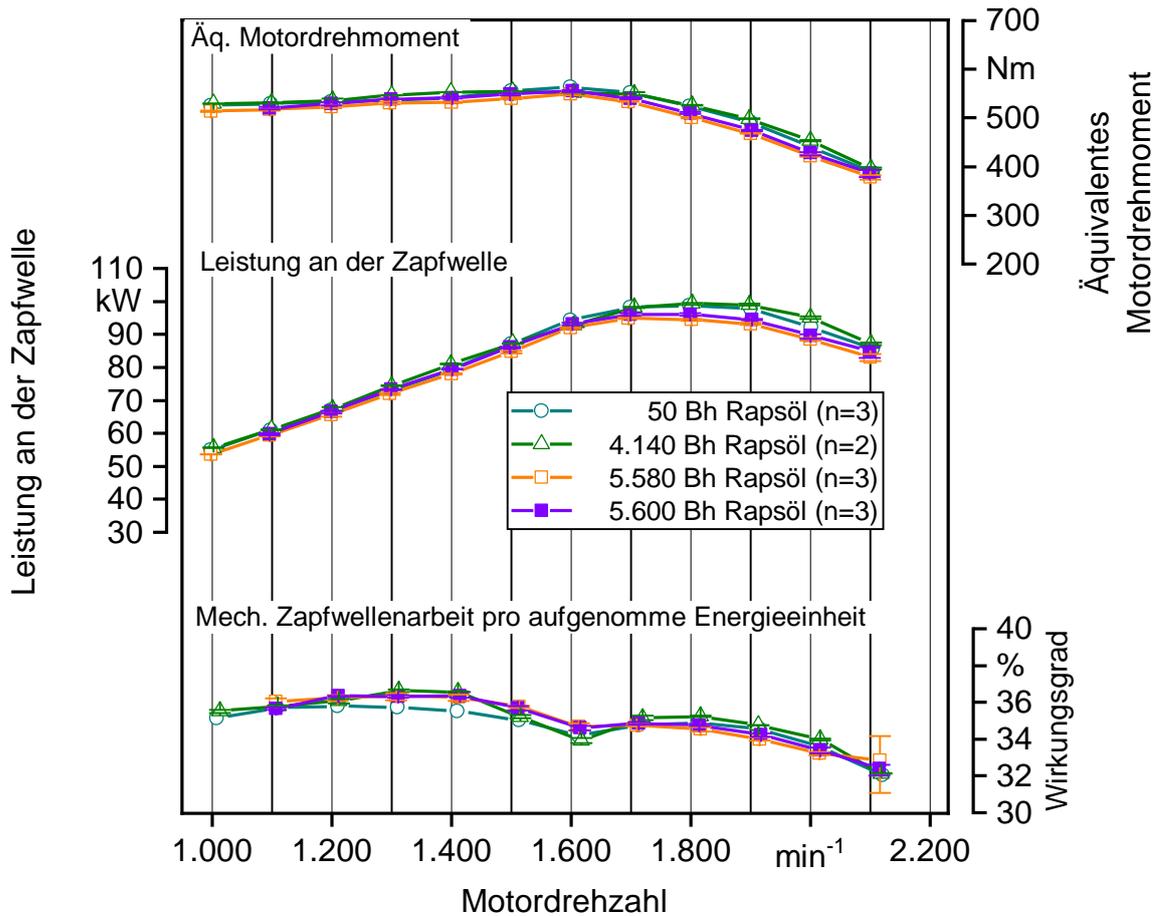


Abbildung 98: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung sowie des Wirkungsgrads des John Deere 6930 Premium (JD-K) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Die gemessene Zapfwellenleistung bei 4.140 Bh und 5.580 Bh liegt auf einem ähnlichen Niveau im Vergleich zum Neuzustand bei ca. 50 Bh. Geringfügige Abweichungen der Leistung zwischen 1 bis 3 % im Drehzahlbereich von 2.100 bis 1.600 min<sup>-1</sup> sind auf Anpassungen der Motorsteuerungssoftware durch den Hersteller in früheren Untersuchungen [18] zurückzuführen. Aufgrund des über die Laufzeit gleichbleibend hohen Wirkungsgrads kann davon ausgegangen werden, dass die verbauten Motorbauteile, wie z. B. die Injektoren, ordnungsgemäß funktionieren.

Die Anwendung des OWI-Betriebszyklus zur Generierung von Ablagerungen zwischen 5.580 und 5.600 Bh hatte keinen Einfluss auf die Leistung und den Wirkungsgrad. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich beim Zylinderdruckverlauf, welcher in Abbildung 102 für die acht Prüfphasen des NRSC zu sehen ist.

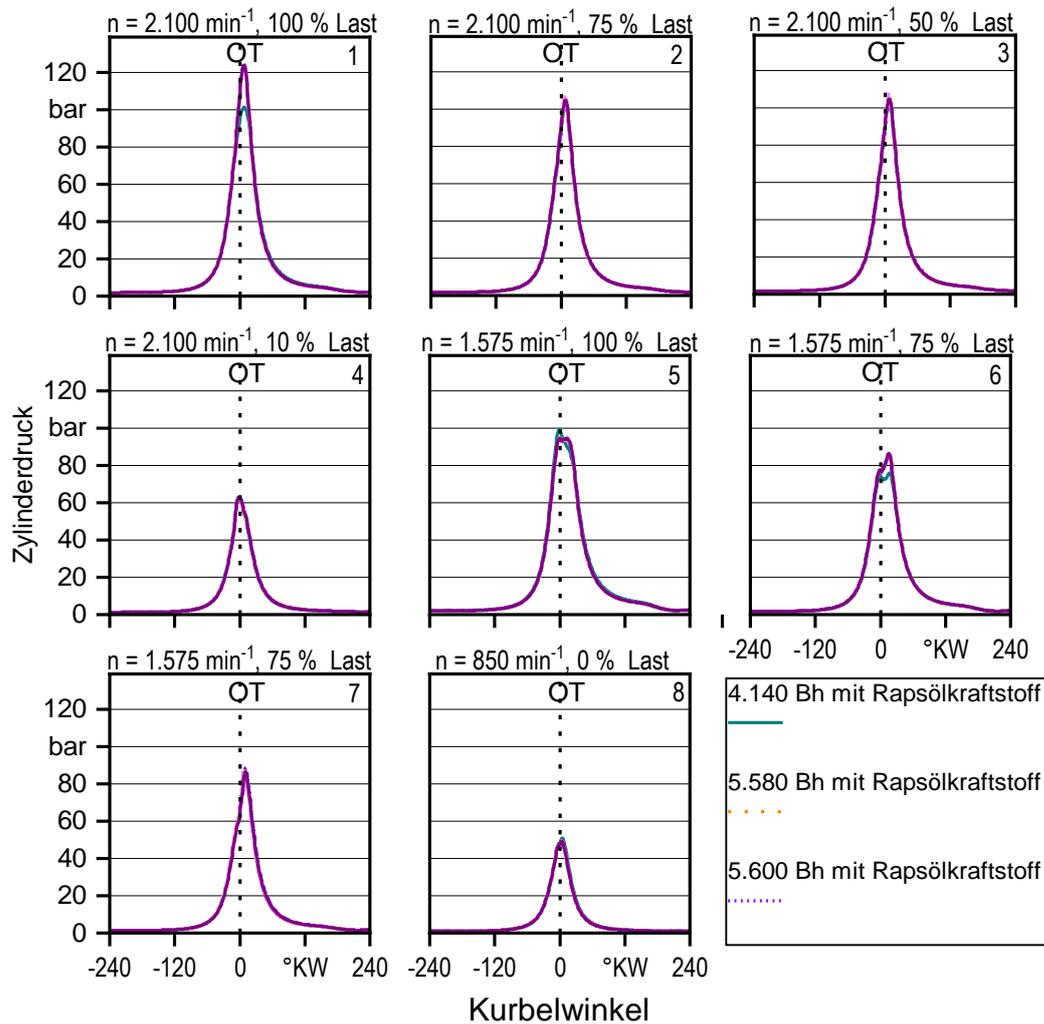


Abbildung 99: Zylinderdruckverlauf in den acht Prüfphasen des NRSC des John Deere 6930 (JD-K) im Betrieb mit Rapsölkraftstoff

Der deckungsgleiche Verlauf des Zylinderdrucks zwischen den Messungen vor und nach dem OWI-Betriebszyklus zur Generierung von Ablagerungen bei 5.580 Bh bzw. 5.600 Bh lässt keine Ablagerungsbildung an den Injektoren erkennen. Es ist keine starke Verschiebung des Einspritzzeitpunkts und der Zylinderdruckkurve durch eine Fehlfunktion des Injektors feststellbar. Einzig im Vergleich zu früheren Messungen bei 4.140 Bh treten geringe Abweichungen des Zylinderdruckverlaufs im Bereich des oberen Totpunkts (OT, 0 Grad Kurbelwinkel (KW)) in den Prüfphasen 1, 5 und 6 auf. Ebenso wie bei der Leistungsmessung (siehe Abbildung 98) kann dieser Unterschied auf die zwischenzeitlichen vorgenommenen Updates der Motorsteuerungssoftware zurückgeführt werden.

Abbildung 100 zeigt das Emissionsverhalten vor und nach dem OWI-Betriebszyklus zur Ablagerungsbildung bei 5.580 Bh und 5.600 Bh des Traktors JD-K mit Rapsölkraftstoff.

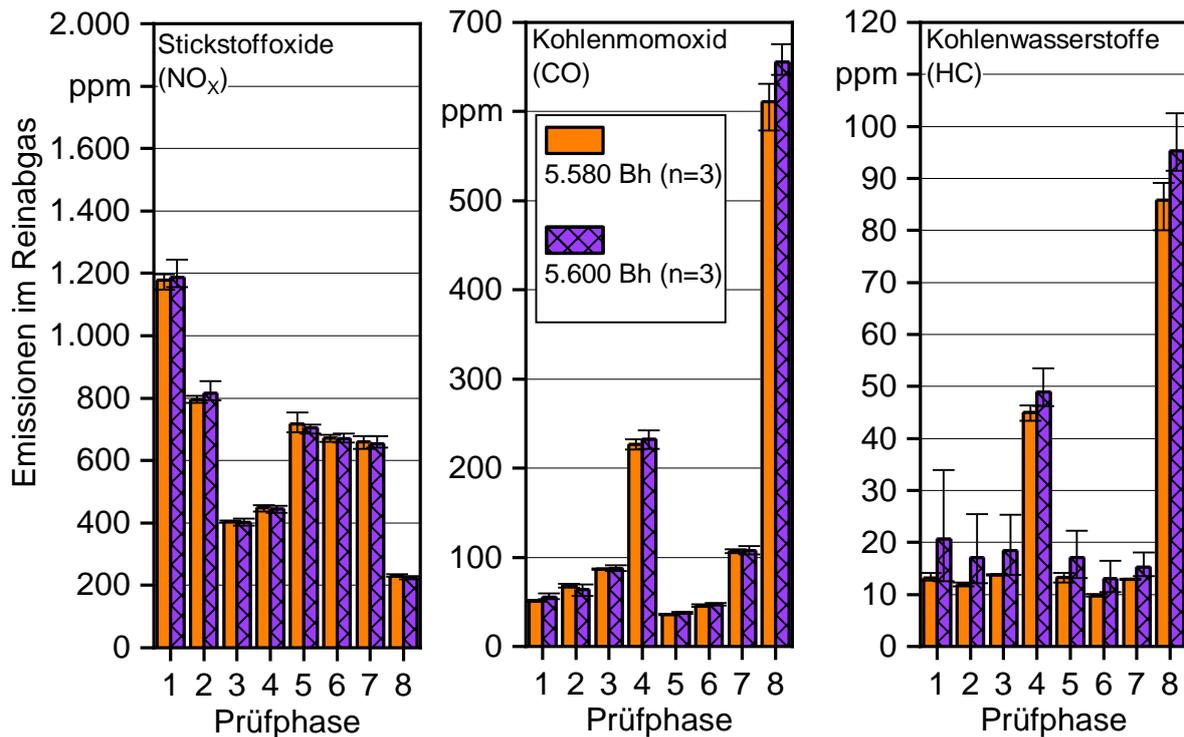


Abbildung 100: Mittelwerte und Spannweiten der NO<sub>x</sub>-, CO- und HC-Emissionen des Traktors JD-K in den Prüfphasen des NRSC mit Rapsölkraftstoff (je n=3)

Nach der Durchführung des OWI-Betriebszyklus zur Ablagerungsbildung bei 5.600 Bh bleibt das Niveau der NO<sub>x</sub>-Emissionen in allen Prüfphasen und bei den CO-Emissionen in den Prüfphasen 1 bis 7 im Vergleich zur Messung bei 5.580 Bh unverändert. Die HC-Emissionen nahmen im Mittelwert über drei Messungen betrachtet zu. Der HC-Anstieg ist jedoch nur in den Prüfphasen 4 und 8 bei niedriger Motorlast signifikant. Die HC-Messwerte waren unmittelbar nach der Anwendung des OWI-Prüfzyklus in der ersten Messwiederholung des NRSC am höchsten. Mit jeder hinzukommenden Wiederholungsmessung sanken die HC-Emissionen überwiegend auf das Ursprungsniveau vor der Anwendung des OWI-Betriebszyklus ab. Während der Motorbetriebs mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 wurden die vermeintlichen Ablagerungen im Kraftstoffstoffsystm innerhalb weniger Betriebsstunden wieder abgebaut. Möglicherweise war die Gesamtlaufzeit mit ca. 12 Bh im OWI-Betriebszyklus am Traktorenprüfstand zu gering, um dauerhafte Ablagerungen zu erzeugen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die im Traktor verbauten Injektoren einer älteren Generation entsprechen und mit geringeren Einspritzdrücken arbeiten und dadurch möglicherweise eine geringere Anfälligkeit gegen Ablagerungen aufweisen.

Insgesamt zeigen die Versuche am JD-K mit Rapsölkraftstoff, dass sich die Injektorlaufzeit von ca. 5.600 Bh sowie die kurzfristig kritischen Motorbetriebszustände im OWI-Betriebszyklus kaum auf das Betriebs- und Emissionsverhalten des Motors auswirken.

### II.1.7.2.3 Einsatztests entwickelter Maßnahmen

Nach der Alterung der Injektorsätze A und B des Traktors FE-S im Feld („dirty-up“, siehe Kapitel II.1.7.2.1) mit Rapsölkraftstoff ohne Additivzugabe erfolgen weitere Messungen am Traktorenprüfstand zur Untersuchung von Strategien zur Ablagerungsminderung („clean-up“). Tabelle 13 zeigt die Messwerte vor und nach einer Maßnahme.

*Tabelle 13: Mittelwert und Standardabweichung von Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad beim Betrieb mit Rapsölkraftstoff vor und nach einer Maßnahme zur Verringerung von Ablagerungen, prozentuale Abweichung (ABW) sowie Prüfung der Signifikanz (Sig.)*

Maßnahme/ Messgröße	vorher (n = 3)		nachher (n = 3)		ABW	Sig. <sup>1)</sup>
<b>DK_oA_kurz: Dieselkraftstoff ohne Additiv am Prüfstand für 5 Bh</b>						
Leistung an der Zapfwelle (kW)	122,2	±2,6	122,3	±0,5	0,0 %	Nein
Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /Hub)	124,1	±0,4	124,6	±0,7	0,4 %	Nein
Wirkungsgrad (%)	33,3	±0,6	33,2	±0,3	-0,2 %	Nein
<b>B100_oA_kurz: Biodieselmkraftstoff ohne Additiv am Prüfstand für 5 Bh</b>						
Leistung an der Zapfwelle (kW)	124,2	±2,3	125,5	±1,5	1,1 %	Nein
Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /Hub)	129,6	±1,2	128,8	±1,5	-0,6 %	Nein
Wirkungsgrad (%)	32,5	±0,7	33,1	±0,0	1,9 %	Nein
<b>B100_oA_lang: Biodieselmkraftstoff ohne Additiv im Feldtest für 90 Bh</b>						
Leistung an der Zapfwelle (kW)	114,2	±2,3	123,0	±1,0	<b>7,7 %</b>	<b>Ja</b>
Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /Hub)	118,2	±1,6	127,8	±0,3	<b>8,1 %</b>	<b>Ja</b>
Wirkungsgrad (%)	32,6	±0,3	32,6	±0,2	0,1 %	Nein
<b>RK_D2-1000_kurz: Rapsölkraftstoff mit 1.000 mg/kg Detergent 2 am Prüfstand für 5 Bh</b>						
Leistung an der Zapfwelle (kW)	118,1	±1,3	114,2	±2,3	-3,3 %	Nein
Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /Hub)	119,7	±0,2	118,2	±1,6	-1,3 %	Nein
Wirkungsgrad (%)	33,3	±0,3	32,6	±0,3	-2,2 %	Nein
<b>RK_D1-250_lang: Rapsölkraftstoff mit 250 mg/kg Detergent 1 / OX im Feld für 80 Bh</b>						
Leistung an der. Zapfwelle (kW)	123,0	±1,0	125,6	±0,6	<b>2,1 %</b>	<b>Ja</b>
Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /Hub)	127,8	±0,3	128,1	±2,0	0,3 %	Nein
Wirkungsgrad (%)	32,6	±0,2	33,3	±0,5	2,1 %	Nein
<b>RK_D1-500_lang: Rapsölkraftstoff mit 500 mg/kg Detergent 1 / OX im Feld für 100 Bh</b>						
Leistung an der. Zapfwelle (kW)	125,6	±0,6	119,6	±2,2	<b>-4,8 %</b>	<b>Ja</b>
Einspritzmenge (mm <sup>3</sup> /Hub)	128,1	±2,0	124,2	±0,6	<b>-3,1 %</b>	<b>Ja</b>
Wirkungsgrad (%)	33,3	±0,5	32,6	±0,6	-1,9 %	Nein

<sup>1)</sup> Ja = Unterschied signifikant    Nein = Unterschied nicht signifikant (t-Test, Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ )

Der Erfolg der Maßnahmen zur Verringerung von Ablagerungen wird anhand der mittleren Leistung, Einspritzmenge und des Wirkungsgrads unter Vollast im Drehzahlbereich zwischen  $1.400 \text{ min}^{-1}$  und  $2.100 \text{ min}^{-1}$  aus Messungen nach OECD Standard Code 2 abgeleitet. Ob sich die Messwerte vor und nach der Durchführung der Maßnahme signifikant unterscheiden, wird mit Hilfe des t-Tests bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  überprüft. (Ja = Unterschied signifikant / Nein = Unterschied nicht signifikant).

Die mit Ablagerungen behafteten Injektoren des Traktors FE-S werden bei der Maßnahme **DK\_oA\_kurz** für ca. 5 Bh unter Vollast mit Dieselkraftstoff nach DIN 590 (DK) betrieben. Ein „Spülen“ der Injektoren durch den zwischenzeitlichen Einsatz von Dieselkraftstoff führte zu keiner signifikanten Änderung der Leistung, weshalb keine Rückschlüsse bezüglich etwaiger Ablagerungen an den Injektoren gezogen werden können.

Ferner wurde die Reinigungswirkung des kurzzeitigen Einsatzes von Biodiesel (B100) ohne Additivzugabe überprüft. Der B100-Einsatz über 5 Bh am Prüfstand (**B100\_oA\_kurz**) unter Vollast führte zu keiner signifikanten Veränderung der Leistungs- und Verbrauchskennwerte. Bei einer Einsatzdauer von ca. 90 Bh mit B100 im Feldtest (**B100\_oA\_lang**) stieg jedoch die mittlere Leistung im Vergleich zu den Messwerten vor dem B100-Einsatz um 7,7 % und die volumetrische Einspritzmenge um 8,1 % signifikant an. Damit bestätigt sich eine ablagerungsmindernde Wirkung durch den B100-Einsatz auch in der praktischen Anwendung am Traktor. Bisher wurde ein ähnlicher Effekt in Labortests an Prüfkörpern beobachtet [30]. In der Praxis wäre es zudem denkbar, dass in Zwei-Tanksystemen von Rapsöltraktoren Biodiesel anstelle des Dieselkraftstoffs als „Hilfskraftstoff“ zusätzlich eine "keep-clean"-Funktion übernimmt.

In der Untersuchung wurden die Injektorreinigungsadditive Detergent 1 und 2 sowie das „OX 1220 Biofuel“ (kurz OX) der ERC Additiv GmbH im Rapsölkraftstoff getestet.

Das Additiv Detergent 2 wurde am Traktorenprüfstand unter Vollast für ca. 5 Bh eingesetzt (**RK\_D2-1000\_kurz**). Die Konzentration des Additivs im Rapsölkraftstoff betrug dabei  $1000 \text{ mg/kg}$ . Nach Auskunft des Projektpartners ERC zielte die Formulierung selektiv auf die Reduzierung von inneren Injektorablagerungen (IDID) ab. Allerdings führte diese Maßnahme zu keiner signifikanten Änderung von Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad und damit wohl auch nicht zum Entfernen von Ablagerungen. Möglicherweise könnte eine längere Einsatzdauer zu einem Effekt führen.

Das Additiv Detergent 1 (Wirkstoff PIBSI) zur Minderung äußerer Injektorablagerungen (EDID) und das Antioxidantienpaket OX wurden im Feldtest in der Konzentration von je  $250 \text{ mg/kg}$  (**RK\_D1-250\_lang**) sowie von je  $500 \text{ mg/kg}$  (**RK\_D1-500\_lang**) dem Rapsölkraftstoff beigemischt. Nach dem Feldtest von 80 Bh war in der Variante **RK\_D1-250\_lang** mit der Additivdosierung von  $250 \text{ mg/kg}$  ein signifikanter Anstieg der Leistung um 2,1 % messbar. Nach dem Feldtest mit der Additivmischung in der erhöhten Konzentration von je  $500 \text{ mg/kg}$  im Rapsölkraftstoff (**RK\_D1-500\_lang**) waren die Messwerte für die Leistung an der Zapfwelle um 4,8 % und die Einspritzmenge um 3,1 % signifikant geringer als vor der Maßnahme.

Die optische Begutachtung der Injektoren nach der Maßnahme RK\_D1-500\_lang in Abbildung 101, zeigt tendenziell eine geringe Zunahme der Ablagerungen an an je einem Düsenloch der Injektoren in Zylinder 1 und 6 (siehe Zylinder 1, Injektorsatz B, 600 Bh, rechts) im Vergleich zum Neuzustand (0 Bh, links) und nach der Alterung im Feldtest mit Rapsölkraftstoff ohne Additiv (1.500 Bh, mittig). Ansonsten wiesen die Injektoren von Injektorsatz B (nach 600 Bh) eine geringe Ablagerungsbildung auf.

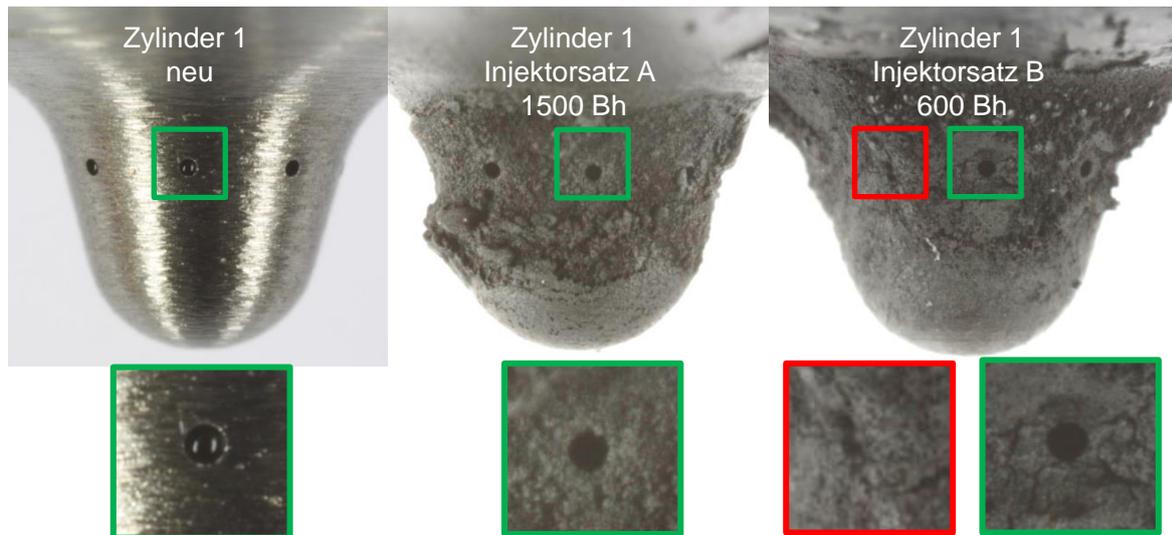


Abbildung 101: Einspritzöffnung an einem neuen (links), einem ca. 1.500 h gealterten (Injektorsatz A, mittig) und einem ca. 600 h gealterten Injektor (Injektorsatz B, rechts) des Traktors FE-S

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch die höhere Konzentration des Additivs festsetzende Ablagerungen im Kraftstoffsystem gelöst und in den Injektor transportiert wurden und diese dadurch dessen Funktion beeinträchtigt haben. Ferner wird in der Literatur diskutiert, dass PIBSI-basierte Additive mit freien Carbonsäuren im Kraftstoff reagieren und zur verstärkten Ablagerungsbildung beitragen können [31] [63].

Bei der Bewertung der Maßnahmen zur Ablagerungsminderung („clean-up“) aus Tabelle 12 gilt es zudem zu berücksichtigen, dass vor Beginn der jeweiligen Maßnahmen ein unterschiedlicher Grad an Ablagerungsbildung bzw. an Leistungsminderungen (siehe Tabelle 12) vorlag. Für nachfolgende Untersuchungen gilt es daher für eine bessere Vergleichbarkeit der Maßnahmen einen einheitlichen Alterungszustand herzustellen bzw. mit Untersuchungen an weiteren Traktoren einen größeren Stichprobenumfang zu schaffen.

Ferner erfolgten Messungen mit Injektoren, welche am OWI-Injektorenprüfstand künstlich gealtert wurden (siehe Kapitel II.1.5.5.1). Dieser Injektorsatz C wurde in den Traktor FE-S einbaut und die Auswirkungen auf mittlere Leistung, Einspritzmenge und mittleren Wirkungsgrad unter Vollast mit Rapsölkraftstoff untersucht, wie in Tabelle 14 zu sehen ist.

Tabelle 14: Mittelwert und Standardabweichung von Leistung, Einspritzmenge und Wirkungsgrad verschiedener Injektorsätze mit Rapsölkraftstoff

Injektorsatz	Leistung an der Zapfwelle in kW	Einspritzmenge in mm <sup>3</sup> /Hub	Wirkungsgrad in %
A (Ausgangszustand)	129,2 ±1,6	128,3 ±0,1	34,1 ±0,4
B (Ausgangszustand)	129,2 ±1,7	130,3 ±0,6	33,5 ±0,2
A (Alterung im Feldtest)	122,3 ±0,5	124,6 ±0,7	33,2 ±0,3
B (Alterung im Feldtest)	118,1 ±1,3	119,7 ±0,2	33,3 ±0,3
C (Alterung am Injektorprüfstand)	124,2 ±2,3	129,6 ±1,2	32,5 ±0,7

Die Leistung des Traktors mit dem Injektorsatz C, welcher am OWI-Injektorprüfstand künstlich gealtert wurde, ist im Mittel um ca. 5 kW niedriger als im Vergleich zum Ausgangszustand der Injektoren A und B. Zudem schwanken die Messwerte beim Injektorsatz C stärker als bei den Injektorsätzen A und B. Die Leistungsminderung des Traktors mit dem Injektorsatz C ist nicht primär auf eine Minderung der Einspritzmenge, wie bei der Alterung von Injektorsätzen A und B im Feld beobachtet wurde, sondern auf einen Rückgang des Wirkungsgrads im Vergleich zu den Messungen im Ausgangszustand zurückzuführen. Dies deutet darauf hin, dass im Feldeinsatz tendenziell äußere Injektorablagerungen (EDID) entstanden, welche die Einspritzmenge drosselten, und beim Injektorsatz C am Injektorprüfstand mehrheitlich innere Injektorablagerungen (IDID) erzeugt wurden, welche den Einspritzzeitpunkt und damit den Wirkungsgrad beeinflussten.

Trotz vergleichbarer Umgebungsbedingungen und präziser Messtechnik können z. B. unterschiedliche Verschleiß- bzw. Alterungszustände oder Motoreinstellungen an der „Black-Box“ Traktor mit den Teilsystemen Motor, Abgasnachbehandlung, Getriebe, Nebenaggregate das Messergebnis der Leistungs- und Emissionsmessungen beeinflussen. Die überwiegend geringe Schwankungsbreite der Messergebnisse unter den Wiederholungsmessungen deutet jedoch auf einen untergeordneten Einfluss dieser Störgrößen hin.

### II.1.7.3 Fazit

Im Praxiseinsatz treten an den getesteten pflanzenöлтаuglichen Traktoren der Abgasstufe IV Ablagerungen an drei Kraftstoffinjektorsätzen auf, welche zu einer geringfügigen Leistungsminderung von 6 % und bis 10 % führen. Die Nutzbarkeit der Traktoren für landwirtschaftlichen Arbeiten im Feld und das Emissionsverhalten im Vergleich zum Neuzustand werden jedoch nicht signifikant beeinflusst. Es traten keine schwerwiegenden Störungen oder längeren Ausfallzeiten auf, die im Zusammenhang mit dem Kraftstoffeinspritzsystem bzw. den -injektoren stehen. Um der Ablagerungsbildung vorzubeugen, gilt es zukünftig vor allem die Kraftstoffalterung im Rapsölkraftstofftank des Zwei-Tank-Systems, z. B. durch Absenkung des Kraftstofftemperaturniveaus, möglichst zu verlangsamen.

Der kurzzeitige Einsatz von Biodiesel als Maßnahme zur Verringerung von Ablagerungen an den Injektoren, welche bereits mit Ablagerungen behaftet waren, führte zu einer Leistungsanhebung des Motors. Der Einsatz von Additiven im Rapsölkraftstoff an gealterten

Injektoren kann, je nach Konzentration und Wirkstoff, die Leistung des Traktors reduzieren, stabilisieren oder wieder anheben. Die Strategien zur Ablagerungsminderung, z. B. durch den Additiveinsatz, gilt es jedoch in weiterführenden Untersuchungen im Feldtest oder am Injektorprüfstand zu bestätigen. Der Einbau von Injektoren am Traktor, welche am Injektorprüfstand künstlich gealtert wurden, führte ebenso wie bei im Feld gealterten Injektoren zu einer Leistungsminderung im Vergleich zu neuen Injektoren, jedoch als Folge einer Verringerung des Motorwirkungsgrads. Die nicht abweichenden Einspritzmengen deuten auch darauf hin, dass am Injektorprüfstand eine andere Art von Ablagerungen erzeugt wurden – vermutlich überwiegend innere Ablagerungen (IDID).

Der Zylinderdruckverlauf sowie Leistungs- und Emissionsmessungen eines rapsöltauglichen Traktors der Abgasstufe IIIA bestätigen die volle Funktionsfähigkeit der Injektoren nach einer Laufzeit von 5.600 Bh. Dies deutet darauf hin, dass Injektoren älterer Bauart, die mit geringeren Einspritzdrücken beaufschlagt werden und im Detail einen unterschiedlichen Aufbau aufweisen, unempfindlicher in Bezug auf die Ablagerungsbildung sind. Ungeklärt bleibt das Langzeitbetriebsverhalten der Injektoren in Rapsöltraktoren der Abgasstufen IV und V bei hohen Laufzeiten (z. B. im Bereich zwischen 5.000 und 10.000 Bh).

## **II.2 Verwertung**

Die Lösungsansätze für die Beeinflussung der Ablagerungsbildung bei der motorischen Verbrennung von Pflanzenölkraftstoffen (insbesondere Rapsöl) haben innovativen Charakter. Sowohl die Ablagerungsprodukte als auch die Ablagerungsbildungsmechanismen sind für reine Pflanzenöle noch nicht umfassend in modernen CR Motoren untersucht worden. Während die Problematik der Verhinderung von Ablagerungen in Motor, Injektoren und Düsen bei fossilen Kraftstoffen seit Jahrzehnten erforscht wird, finden sich Anwendungen mit Bioreinkraftstoffen in einer unbearbeiteten Nische wieder.

Das Vorhaben SAVEbio trägt mit folgenden partner-spezifischen Maßnahmen zur Verbreiterung der Wissensbasis und zum gezielten Transfer der Ergebnisse in die technische Anwendung bei.

### **II.2.1 OWI**

Für die OWI gGmbH als gemeinnützige Forschungseinrichtung sind der wirtschaftlichen Nutzung der Projektergebnisse klare Grenzen gesetzt. Dennoch stehen nach Projektende ein deutlicher Reputations- und Kenntnisgewinn zur Verfügung. Die Kernkompetenzen des OWI, insbesondere Untersuchungen der anwendungstechnischen Eigenschaften von Kraftstoffen und der kraftstoffbedingten Ablagerungsbildungsprozesse wurden gestärkt und im konkreten Anwendungsfeld für Rapsölkraftstoffe erweitert. Es wird erwartet, dass der erarbeitete Gewinn an Know-how in diesen Forschungsfeldern gemeinsam mit den weiterentwickelten Prüfkonzepten und Bewertungsmethoden nach Ende des Vorhabens zu der Akquirierung weiterer Forschungsprojekte führt. Wissenschaftliche Veröffentlichungen sind geplant und werden absehbar zum Transfer der Erkenntnisse in Wissenschaft und Industrie beitragen.

Das Konzept des nicht-motorischen Injektorablagerungsprüfstands ist schon während der Laufzeit des Vorhabens durch die T4F GmbH mit der konkreten Absicht der Kommerzialisierung weiterentwickelt worden, sodass der Ergebnis- und Erkenntnistransfer in die Industrie (KMU) teilweise bereits erfolgt ist.

### **II.2.2 T4F**

Wie auch im Ergebnisteil dargestellt, konnte das generelle Prüfstandskonzept stark vereinfacht werden. Dieses vereinfachte Konzept wird bei der TEC4FUELS unter dem Namen „CoCoS“ (Complete Commonrail System)-Prüfstand geführt. Es werden aktuell fünf solcher vereinfachten Prüfstände aufgebaut und sind teilweise bereits im Betrieb. Ein allgemeines Interesse der Industrie wird beobachtet. Konkrete Anfragen liegen aus der Mineralölindustrie, der Automobilindustrie und von Komponentenherstellern vor. Allgemeines Interesse wurde auch seitens der Additivindustrie geäußert.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt können insofern hinsichtlich des fortgeschriebenen Verwertungsplanes genutzt werden.

Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten stellen sich sehr gut dar. TEC4FUELS ist im Forschungsprojekt „NaMoSyn“ beteiligt und qualifiziert hier zwei CoCoS-Prüfstände für den Betrieb von angepassten Einspritzsystemen für den Betrieb von Oxymethylenether als synthetischen Dieseleratzkraftstoff und Dimethylcarbonat-Methylformiat als synthetischen Ottoersatzkraftstoff beteiligt. Eine Teilnahme an weiteren Forschungsvorhaben zum Einsatz von Methanolkraftstoffen und zum Einsatz von erneuerbaren Marinekraftstoffen ist absehbar. Auch in diesen Forschungsprojekten ist der Einsatz der CoCoS Prüfstände vorgesehen.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind ebenfalls sehr gut. So liegen bereits zwei kleinere (< 50.000 EUR) Industrieaufträge vor und weitere konkrete Anfragen befinden sich in der Angebotserstellung.

### **II.2.3 regineering GmbH**

Die regineering GmbH entwickelt seit Jahren technische Konzepte zur Anpassung von Dieselmotoren auf den Betrieb mit Pflanzenölkraftstoff. Hierdurch hat sich ein umfassendes Portfolio an Maßnahmen aufgebaut, welches in diesem Bereich eine Vorreiterrolle einnimmt. Mit den erarbeiteten Ergebnissen des vorliegenden Projekts zur Ablagerungsvermeidung konnte das „Umrüstpaket“ zur Anpassung der Motoren erweitert werden, wodurch die Konzepte künftig in optimierter Weise vermarktet werden können. Verfahren auf andere Anwendungsfelder werden ebenfalls in Betracht gezogen.

Mittelfristig könnten mit Hilfe des Projekts durch einen hohen Entwicklungsstandard neue Arbeitsplätze bei regineering und Entwicklungspartnern geschaffen werden. Unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit durch Verwendung von Biokraftstoffen kann mittels eines daraus resultierenden Produktportfolios die Wettbewerbssituation damit langfristig verbessert werden. Ebenso wäre es denkbar, durch den Vertrieb von kompakten Umrüstpaketen das System auf andere Anwendungsfelder, z.B. hinsichtlich der Verwendung weiterer Kraftstoffe, mittel- bis langfristig auszuweiten. Kurz- bis langfristig ist es durch dieses Projekt möglich, besser mit anderen Beteiligten der Branche in Kontakt zu treten. Denkbar sind hier Präsentationen und Diskussionen auf Tagungen wie beispielsweise dem Kongress „Kraftstoffe der Zukunft“ sowie Veröffentlichungen von Ergebnissen in Fachzeitschriften, etc. Durch das breitere Know-how in diesem Bereich wird zudem die Konkurrenzfähigkeit langfristig, beispielsweise durch Patentanmeldungen, erhöht. Durch die Erweiterung des Systems mittels eines entwickelten Umrüstpakets können mittel- bis langfristig serienreife Produkte in entsprechenden Unternehmensbereichen vermarktet werden. Durch die in vorliegendem Projekt erzielten erfolgreichen Ergebnisse liegt zudem hohes wissenschaftliches Potential für Folgeprojekte in diesem Bereich. So wären mittelfristig tieferegreifende Untersuchungen in weiteren Förderprojekten denkbar, die es erlauben, durch weiterführende Versuchsreihen noch praxisnaher auf verschiedenste Anwendungen reagieren zu können. Folgende Tabelle zeigt zusammengefasst die Verwertungsaussichten.

Tabelle 15: Verwertungsplan regineering GmbH

Verwertungskategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
wirtschaftliche Erfolgsaussichten	Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen bei regineering und Entwicklungspartnern	Hoher Entwicklungsstandard	mittelfristig
	Verbesserung der Wettbewerbssituation	Breiteres Produktportfolio,	langfristig
	Nachhaltigkeit	Verwendung von Bio-Reinkraftstoff	langfristig
	Nutzen für andere Anwendungsfelder	Vertrieb von kompakten Umrüstpaketen	mittel- bis langfristig
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	Höhere Konkurrenzfähigkeit durch breites Know How	Schutzrechte, Patente	langfristig
	Bessere Vernetzung mit anderen Beteiligten der Branche	Veröffentlichungen, Präsentation der Ergebnisse	kurz- bis langfristig
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	Folgeprojekte	Weitere verwertbare Projektergebnisse	mittelfristig
	Erweiterung der Unternehmensbereiche	Vermarktung von Serienlösungen	mittel- bis langfristig

#### II.2.4 ERC Additiv GmbH

Sofern die Untersuchungen zu geeigneten und gezielten Additivierungsstrategien geführt haben, kann die ERC Additiv GmbH die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse - insbesondere auch den Erkenntnisgewinn bezüglich der Entstehungsmechanismen von Injektorverkokungen - nutzen, die Strategien zur Additivierung von Kraftstoffen den Erkenntnissen anzupassen (s. Tabelle 16).

Ein entsprechend formuliertes Additiv kann dabei helfen, die Vermarktungs- und Verwendungschancen von Pflanzenölkraftstoffen im Markt zu verbessern und damit umgekehrt auch ein entsprechendes Produktionsvolumen für das Additiv generieren. Im Moment kann man zur wirtschaftlichen Verwertung keine Aussage treffen, da das Volumen und die Nachfrage nach dem Pflanzenölkraftstoff sehr gering sind. Dies liegt unter anderem dadurch begründet, dass der Einsatz von Pflanzenöl in den Verbrennungsmotoren nur unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich ist (s. Tabelle 16).

Tabelle 16: Verwertung und Erfolgsaussichten nach Abschluss des Projektes

Verwertungskategorie	Verwertung	Zeithorizont
wirtschaftliche Verwertung	Verbesserung der Wettbewerbssituation, Erarbeitung der Alleinstellungsmerkmale	mittel- bis langfristig
	Nachhaltigkeit	langfristig
	Image des innovativen Unternehmens	kurz-bis mittelfristig
	Nutzen für andere Anwendungsfelder	mittel- bis langfristig
	Höhere Wettbewerbsfähigkeit durch breites Know-how	kurz-bis mittelfristig
	Erweiterung des Produktportfolios, Umsatzsteigerung mit den neuen Produkten	mittel- bis langfristig
Wissenschaftliche und/oder technische Verwertung	Vernetzung und Networking mit anderen Beteiligten der Branche	kurz-bis mittelfristig
	Erkenntnisgewinn über die Wirkungsmechanismen der Additive, Entstehungsmechanismen der Ablagerungen und Alterungsmechanismen der Kraftstoffe	kurz-bis mittelfristig
Allgemeine Erfolgsaussichten	Erweiterung der Unternehmensbereiche	langfristig

## II.2.5 TFZ

Die beteiligten Projektpartner aus Industrie und Forschung sowie auch Dritte können die gewonnenen Erkenntnisse für die Entwicklung von Lösungen zur Umstellung der bisher noch weitgehend auf fossilen Energieträgern basierenden land- und forstwirtschaftlichen Antriebstechnologien auf erneuerbare Antriebe beziehungsweise Kraftstoffe nutzen.

Für das Technologie- und Förderzentrum ergab das Vorhaben weitere Kenntnisse hinsichtlich der Bildung und Vermeidung von Ablagerungen im Biokraftstoffbetrieb von Traktoren. Die Erkenntnisse können auch für weitere laufende und neue Forschungsvorhaben zum Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen genutzt werden.

Die Ergebnisse aus den Praxisuntersuchungen tragen dazu bei, die Betriebssicherheit und das Emissionsverhalten von Motoren, die mit Pflanzenölkraftstoff betrieben werden, weiter zu verbessern. Es konnten Optimierungsmaßnahmen an Zwei-Tank-Traktorkonzepten aufgezeigt sowie künftig Lösungsansätze zur Reduzierung von Ablagerungen im Kraftstoffinjektor z. B. durch den Einsatz von Biodiesel oder von Additiven demonstriert werden. Dies ist vor allem in Hinblick auf die Entwicklung der Einspritztechnik hin zu steigenden Einspritzdrücken und kürzeren Düsenöffnungszeiten sowie von

Mehrfacheinspritzungen von Bedeutung. Auch hinsichtlich des zukünftig geforderten Nachweises, dass die Emissionsanforderungen über die gesamte Lebensdauer eines Traktors eingehalten werden müssen, sind die erhobenen Messwerte zur Auswirkung von Injektorablagerungen auf das Emissionsverhalten hilfreich.

Die Ergebnisse aus dem Praxiseinsatz der rapsöltauglichen Traktoren können in vielerlei Hinsicht von Forschungseinrichtungen, der Industrie, Fachwerkstätten sowie derzeitigen und zukünftigen Betreibern von pflanzenöltauglichen Motoren verwertet werden. Die untersuchten Maßnahmen, z. B. des zwischenzeitlichen Biodieseleinsatz, einer Additivzugabe in den Kraftstoff und ein verbessertes Thermomanagement im Kraftstoffsystem, zur Vermeidung oder Minderung von Ablagerungen an Injektoren von Verbrennungsmotoren sind schnell von Betreibern und Fachwerkstätten in die Praxis umsetzbar.

Einen Nutzen aus dem Vorhaben können indirekt auch die dezentralen Ölmühlen in den überwiegend ländlichen Regionen ziehen, die derzeit nur geringfügig ausgelastet sind. Die durch die stärkere Marktdurchdringung des Rapsölkraftstoffs ausgelöste Stimulation des Absatzes von Rapsöl führt zu einer besseren Auslastung der Produktionskapazitäten der Ölmühlen und gleichzeitig zur Erhöhung des Selbstversorgungsgrads mit heimischem Eiweißfutter, dem Koppelprodukt bei der Rapssaatverarbeitung. Auch die vorgelagerten Bereiche des mittelständischen Maschinenbaus in Deutschland als Lieferant der Ölmühlentechnologie würden langfristig davon profitieren, wenn dezentral erzeugter Rapsölkraftstoff eine größere Marktbedeutung erlangen würde.

Die Ergebnisse sollen in Fachzeitschriften, im Internet sowie auf Tagungen publiziert werden. Daneben werden die Resultate des Vorhabens durch die vom TFZ durchgeführten Informations- und Beratungsaktivitäten einem breitgefächerten Besucherkreis dargebracht.

### **II.3 Erkenntnisse von Dritten**

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine wesentlichen Fortschritte auf dem konkreten Gebiet des Vorhabens von anderer Stelle bekannt geworden. Erwähnt sei allerdings der Austausch mit einem Teilnehmer des Kongresses „Kraftstoffe der Zukunft“ (20-21.01.2020), bei dem sich herausgestellt hat, dass eine Initiative des isländischen Verkehrsministeriums den Einsatz von Rapsölkraftstoff als umweltfreundliche Alternative für den Einsatz in der Fischereiflotte vorantreiben möchte.

### **II.4 Veröffentlichungen**

Ein Teil der im Rahmen des Projektes gewonnenen Ergebnisse zum Praxiseinsatz pflanzenöltauglicher Traktoren wurde beim International Rapeseed Congress 2019 am 18.06.2019 in Berlin und bei der 8. Statuskonferenz "Energetische Biomassennutzung" am 18.09.2019 in Leipzig präsentiert.

Geplant sind u. a. wissenschaftliche Veröffentlichungen auf dem Rostocker Bioenergieforum 2020 (angefragt) sowie auf dem Kongress „Kraftstoffe der Zukunft“ in Berlin 2021, da dort ein breit aufgestelltes Konsortium aus Experten der Biokraftstoffbranche vertreten ist. Zudem sollen die Ergebnisse auf den alljährlich stattfindenden Ölmüllertagen präsentiert werden. Da gerade dort viele Landwirte teilnehmen, kann die Thematik direkt den Nutzern von landwirtschaftlichen Maschinen praxisorientiert dargelegt werden.

### **III Anhang**

#### **III.1 Teilvorhaben 1: OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH**

OWI hat vorrangig das Arbeitspaket 4 bearbeitet. Weiterhin wurden das Arbeitspaket 3.1 und insbesondere die Arbeitspakete 3.2 sowie 5 mit Know-How und Laboruntersuchungen unterstützt.

##### **III.1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Vorrangiges Ziel der OWI gGmbH ist die Untersuchung von Ablagerungsbildungsprozessen in Heavy-Duty Dieselinjektoren. Hierzu soll basierend auf Erkenntnissen des ENIAK-Projektes ein nicht-motorischer Prüfstand entwickelt werden, dessen technische Umsetzung sowie Betriebsweise an die Anforderungen des Heavy-Duty-Systems (konkreter Einsatzbereich Landmaschine) angepasst werden müssen. Der Prüfstand wird innerhalb des Projektes für zwei gängige Common-Rail-Injektoren aus Landmaschinen ausgerüstet. Das wesentliche Ziel hinsichtlich des Prüfstands ist die Entwicklung einer Prüfumgebung für Injektoren für den Einsatzbereich der Landmaschinen. Hier wird ein Testzyklus entwickelt, der eine zeitgeraffte Prüfung unter realistischen bzw. verschärften Prüfbedingungen ermöglicht. Wissenschaftliches Ziel ist die belastbare Untersuchung der inneren Ablagerungsbildung bei Einsatz von Rapsöl in Heavy-Duty-Motoren sowie der Untersuchung von möglichen Reinigungs- und Vermeidungsstrategien.

##### **III.1.2 Bearbeitete Arbeitspakete**

Schwerpunkte der Arbeiten am OWI sind die Entwicklung des nicht-motorischen Prüfstands, der Betriebsweise/des Testzyklus sowie der Prüfmethodik. In diesem Zuge wurden u. a. umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. Weiterhin wurden Prüfung und Bewertungen von Injektoren aus Feldeinsätzen vorgenommen und Versuchsträger (Injektoren) für Vollmotortests konditioniert und bereitgestellt.

##### *AP 4.1: Aufbau eines Heavy-Duty Injektorablagerungsprüfstands*

Im Arbeitspaket 4.1 soll ein nicht-motorischer Injektorablagerungsprüfstand konzeptioniert und aufgebaut werden. Das grundlegende Konzept des Prüfstands ist es, ein vollständiges Common-Rail-System abzubilden, den eingespritzten Kraftstoff zu sammeln und im Kreis zu fahren. Hierdurch reduzieren sich die Anforderungen an die Laborinfrastruktur deutlich, da kein Motor und entsprechend notwendige Nebenaggregate betrieben werden müssen. Das generelle Konzept ist im früheren ENIAK-Projekt bereits angewendet worden, sodass Erfahrungen und Erkenntnisse übertragen werden konnten. Der Fokus des Prüfstands soll auf internen Ablagerungen liegen, jedoch ist zu erwarten, dass externe Ablagerungen ebenfalls auftreten. Für den Aufbau soll weitgehend auf Originalteile der Motorenhersteller

Deutz und John Deere zurückgegriffen werden. Die anspruchsvolle Ansteuerung der Einspritzsystemkomponenten wird durch eine externe Fachfirma umgesetzt.

#### *AP 4.2: Übertragung der Realdaten auf den Prüfstand und Versuchsdurchführung*

Aus bekannten Betriebsdaten von Landmaschinen soll ein praxisrelevanter Testzyklus für den nicht-motorischen Prüfstand abgeleitet werden. Ebenso soll in diesem Arbeitspaket die Entwicklung einer Bewertungsroutine für Heavy-Duty-Injektoren erfolgen, die in geeigneter Weise potenzielle Funktionsbeeinträchtigungen zunächst qualifizieren und später auch quantifizieren können soll.

Im Rahmen dieses Arbeitspaktes findet die wesentliche Versuchsdurchführung am OWI statt. Die Versuche teilen sich auf in Untersuchungen zur gezielten Ablagerungsbildung und Prüfung von potenziellen Regenerations- bzw. Vermeidungsstrategien, bei denen verschiedene Additive angewendet werden sollen. Zum Einsatz kommt neben Dieselmotorkraftstoff nach EN 590 auch Rapsölmotorkraftstoff nach DIN EN 51605.

#### *AP 4.3: Validierung kritischer und regenerativer Betriebsbedingungen*

Im Arbeitspaket 4.3 sollen identifizierte kritische und regenerative Betriebsbedingungen realer Anwendungen am nicht-motorischen Prüfstand verifiziert werden. Hierfür werden am Ablagerungsprüfstand entsprechende Versuchsreihen durchgeführt, um mit Erkenntnissen der realen Anwendungen verglichen werden zu können.

### **III.1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Im Gegensatz zum früheren ENIAK-Projekt stand im vorliegenden Projekt SAVEbio die forcierte Bildung von Injektorablagerungen ohne absichtlich hinzugefügte Kontaminanten wie Zinkneodecanoat (XUD9) oder DDSA + Natrium (DW10) im Vordergrund, da beide Kontaminanten in der Realität quasi nicht (mehr) vorkommen. Dementsprechend wurde das aufgegriffene Loop-Konzept des ENIAK-Prüfstands in modifizierter Form weiterverwendet.

Die notwendigen Modifikationen am Prüfstand und die Maßgabe, möglichst auf Originalteile zurück zu greifen, machte eine Neukonstruktion notwendig. Die wesentliche technische Änderung gegenüber früheren Einspritzprüfständen (u. a. aus ENIAK) betrifft die eingesetzte Kraftstoff-Hochdruckpumpe zur Druckerzeugung. Gegenüber den zumeist PWM-geregelten PKW-Hochdruckpumpen im Dieselmotorbereich stellte die drehwinkelgesteuerte Regelung der Heavy-Duty-Hochdruckpumpe eine große technische Herausforderung dar, weswegen eine externe Firma (Fa. VEMAC) mit der Auslegung eines separaten Steuergeräts zur Druckregelung beauftragt wurde. Der umfangreiche Mehraufwand zur technischen Umsetzung der Pumpenregelung wurde erst im Verlauf der Projektbearbeitung ersichtlich, wodurch der Meilenstein zur Inbetriebnahme erst später erreicht wurde. Um die thermische Belastung der Injektoren während des motorischen Betriebs nachzubilden, war

es erforderlich, die Injektoren von außen zu beheizen. Insgesamt bildet der Prüfstand den dieselmotorischen Betrieb nach, jedoch ohne den Kraftstoff umzusetzen.

Im Zuge der Entwicklung der Prüfmethodik war darauf zu achten, dass die Übertragbarkeit in die reale Anwendung weiterhin gegeben ist. Um dieses zu erreichen, wurden zusätzlich zu den vorhandenen Daten aus den Feldtests und dem NRSC die Prüfpunkte eines Injektordiagnosegeräts am OWI ausgewertet. Das Diagnosegerät DISU 6000 der Fa. Autotestgeräte Leitenberger GmbH wird am OWI unter anderem zur Prüfung der Injektorfunktion und Bewertung der Einspritzcharakteristik verwendet. Um den Bezug zur realen Anwendung nicht zu verlieren, hat sich OWI gemeinsam mit den Partnern TFZ und regineering auf einen relativ niedrigen Raildruck von ca. 800 bar und eine Bestromungszeit von 920  $\mu$ s verständigt. Diese Bedingungen entsprechen zum einen einem vom Injektorhersteller definierten Prüfpunkt im Diagnosegerät („TP4“). Zum anderen entspricht dieser Prüfpunkt nahezu den Bedingungen des NRSC Phase 8 („Leerlauf“, bzw. „Niedriglastpunkt“) hinsichtlich Kraftstoff-druck und Bestromungszeit. Dies geht aus den protokollierten Prüfstandsdaten des Partners TFZ hervor. Der Prüfzyklus setzt sich im ersten Teilbereich aus kurzen „AN“-Zuständen und „Aus“-Zuständen im Wechsel zusammen, beinhaltet im Teilbereich II eine längere, kontinuierliche Betriebsphase und abschließend eine längere Betriebspause. Der Zyklus besitzt eine Laufzeit von 360 Minuten (6 Stunden) und wiederholt sich fortlaufend bis die maximale Versuchszeit von etwa 180 Stunden erreicht ist.

Zur Bewertung der potenziellen Funktionsbeeinträchtigung eines Injektors wurden Einspritzmengenmessungen sowie die ermittelten Reaktionszeiten im Neuzustand und die entsprechenden Messungen nach Belastung von Injektoren im SAVEbio-Prüfstand gegenübergestellt. Es handelt sich bei der Methodik somit um eine „Deltawert-Methode“, bei der der Startwert (im Neuzustand) bekannt sein muss. Eine reine Endpunktdiagnostik ist nicht möglich.

Im Rahmen der Untersuchungen am nicht-motorischen Ablagerungsprüfstand wurden im Wesentlichen zwei Varianten durchgeführt: 1) Ablagerungsbildungsversuche und 2) Reinigungs- und Vermeidungsstrategien.

- 1) Bis auf wenige Ausnahmen zeigten alle eingesetzten Injektoren mehr oder weniger starke Funktionsbeeinträchtigungen (vgl. Kapitel II.1.5.5.1). Lediglich ein Injektor, der ohne Beheizung der Injektordüse im Prüfstand betrieben wurde, wies keine Veränderungen der Einspritzcharakteristik auf. Dies bestätigt die Wichtigkeit der gezielten Beheizung der Injektordüse im nicht-motorischen Prüfstand mit dem Fokus der forcierten Ablagerungsbildung. Einspritzmengen reduzierten sich um mehr als 5 % im Vergleich zum jeweiligen Neuzustand. In Einzelfällen beträgt die Reduzierung bis zu 25 %. Die Reaktionszeiten waren nur geringen Veränderungen unterworfen. Inwieweit diese Funktionsbeeinträchtigungen tatsächlich zu merkbareren Einschränkungen des Motorbetriebs führen, wurde in den Arbeitspaketen 2 und 5 behandelt.

Ein direkter Einfluss des Kraftstoffs (Dieselkraftstoff / Rapsölkraftstoff) auf die Ablagerungsbildung war nicht zu erkennen. Sowohl bei Einsatz von Dieselkraftstoff

(EN 590) als auch bei Verwendung von Rapsölkraftstoff (DIN EN 51605) wurden Funktionsbeeinträchtigungen der Injektoren nach der Beanspruchung festgestellt. Tendenziell waren die Beeinträchtigungen bei Rapsölkraftstoffeinsatz stärker. Vielmehr weisen die Ergebnisse jedoch darauf hin, dass unter den gegebenen Testbedingungen das Injektordesign die Ablagerungsbildung beeinflusst. Während die Denso-Injektoren vermehrt Abweichungen der Reaktionszeiten aufwiesen, zeigten die Bosch-Injektoren vorrangig Abweichungen der Einspritzmenge. In aktueller Literatur wird die herstellereinspezifische Injektorkonstruktion als potentieller Grund diskutiert.

- 2) Aus einem Feldtest wurde vom Partner TFZ ein Satz Denso-Injektoren aus dem Traktor John Deere 6215R (JD-Wö) mit äußerlich sichtbarer Ablagerungsbildung nach rund 505 h im Feldtest mit Rapsölkraftstoff bereitgestellt (siehe Kapitel). Vier der insgesamt sechs Injektoren wurden einer Reinigungsprozedur im nicht-motorischen Prüfstand unterzogen. Hierfür wurde Dieselkraftstoff mit dem Additiv Detergent 2 eingesetzt. Alle vier im Prüfstand gereinigten Injektoren wiesen nach Abschluss des 64-stündigen Reinigungslaufs („clean-up“) eine sehr deutliche Verbesserung der Agilität auf. Die Reaktionszeiten verbesserten sich um 15-18 %. In drei von vier Fällen erhöhte sich darüber hinaus die Einspritzmenge um etwa 5-7 %. Somit ist festzuhalten, dass die Injektoren während des Feldtests deutliche Beeinträchtigungen der Funktion entwickelt haben, die durch eine geeignete Reinigungsstrategie mit Detergent 2 zumindest teilweise zurückgebildet werden können.

Weitere Regenerationsversuche wurden mit frischem Rapsölkraftstoff durchgeführt, dem das Additiv Detergent 1 zugegeben wurde, da bei den ausgewählten Injektoren hauptsächlich Hinweise auf äußere Ablagerungen (EDID) beobachtet wurden. Auch hier konnten in beiden durchgeführten Versuchen Verbesserungen der Einspritzcharakteristik erzielt und mit dem Prüfgerät nachgewiesen werden. Die Einspritzmengen erreichen in etwa wieder das Niveau des Neuzustands.

Im Rahmen der Entwicklung von Vermeidungsstrategien wurde der Einsatz einer „keep-clean“-Additivierung untersucht. Hierzu wurden dem Rapsölkraftstoff stabilisierende und reinigende Additive in geringerer Konzentration zugegeben, die die Bildung von Ablagerungen verhindern sollen. Geprüft wurde der Einsatz des Reinigungsadditivs Detergent 1 in Kombination mit dem Antioxidantienpaket. Die Einspritzmengenmessung nach der Betriebszeit des Prüfstands von 180 h zeigt lediglich eine geringe Abnahme von etwa 2 %. Dieser Wert liegt im Bereich der üblichen Streuung und ist daher nicht signifikant.

## III.2 Teilvorhaben 2: regineering GmbH

### III.2.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel der regineering GmbH liegt auf der Untersuchung von technischen Lösungen zur Vermeidung von äußeren Injektorablagerungen. Im Projektverlauf konnte teilweise direkt an Forschungsergebnisse aus dem Vorgängerprojekt (ABM) angeknüpft werden. Im Gegensatz zum ABM Projekt wurden die Motorprüfstandsversuche größtenteils am Vollmotorenprüfstand durchgeführt werden. Dies bildet nicht nur den realen Motorbetrieb besser ab, sondern ermöglicht auch eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf „reale“ landwirtschaftliche Maschinen. Die bereits erarbeiteten Ursachen für die Ablagerungsbildung konnten im vorliegenden Projekt im Zuge einiger Grundlagenversuche am Vollmotor nachgewiesen, Gegenstrategien verfolgt und die daraus entstehenden technischen Lösungen im Prüfstandsbetrieb getestet werden.

### III.2.2 Bearbeitete Arbeitspakete

#### *AP 1.1: Aufbereitung von Versuchsdaten aus dem ABM – Projekt*

Bereits im ABM - Projekt konnte eine starke Abhängigkeit der Kraftstoffkühlung auf die Ablagerungsbildung festgestellt werden. Dazu wurde in einem Motorversuch Rapsölkraftstoff in abwechselnden Intervallen aufgeheizt und gekühlt. In den Kühlphasen ist eine deutlich geringere bzw. nahezu keine Abnahme zu verzeichnen. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte im vorliegenden Projekt eine effiziente Kraftstoffkühlung entwickelt werden. In hochauflösenden Mikroskopaufnahmen (SEM, STEM) konnten die Ablagerungsschichten hinsichtlich ihrer Struktur analysiert werden, um die Rahmenbedingungen in Bezug auf Strategien zur Ablagerungsvermeidung herzustellen. Zudem war eine Abhängigkeit vom Betriebsprofil erkennbar. So wurde der Forschungsmotor im Rapsölbetrieb in unterschiedlichen Häufigkeiten gestoppt und wieder gestartet, wobei ein Einfluss auf den Durchfluss beobachtet werden konnte.

#### *AP 2.1: Grundlagenversuche am Vollmotor, Spezifizierung und Analytik*

In diesem Arbeitspaket konnten die Versuche aus dem Vorgängerprojekt erweitert und am Vollmotorenprüfstand durchgeführt werden. Dazu konnte zu Beginn parallel zum Umbau des Vollmotors am Einzylinder-Forschungsmotor die Temperatur an der Einspritzdüsen-spitze im laufenden Motorbetrieb gemessen und eine Abhängigkeit von der Temperatur des eingespritzten Kraftstoffs festgestellt werden. Am Vollmotor wurden dann folgende Effekte untersucht:

- Vergleich von originalen mit gekühlten Einspritzdüsen. Zur Auswertung wurden Durchflussmessungen sowie Nahaufnahmen der Düsen (SEM, STEM) herangezogen.
- Dieselreferenzversuche, um einen direkten Vergleich zwischen Rapsöl- und Dieselpetrieb herzustellen.

- Einfluss des Motorschmieröls. In der Strukturanalyse der Einspritzdüsen konnten unter anderem Kalzium und Zink in den Ablagerungen mit der Vermutung festgestellt werden, dass diese Bestandteile teilweise aus dem Motoröl stammen. Deshalb wurde in diesen Versuchsreihen ein Motorschmieröl eingesetzt, das verminderte Anteile dieser Additive enthält.
- Um die Abhängigkeit der Ablagerungsbildung vom Betriebspunkt genauer zu untersuchen, wurde der Vollmotor zusätzlich zur Volllast auch im Teillastbereich betrieben.
- Da die Ablagerungsbildung hauptsächlich der chemischen bzw. physikalischen Struktur des Rapsölkraftstoffs geschuldet ist, wurden gezielt Additive eingesetzt, um die Beschaffenheit des Kraftstoffs zu verändern. Es wurden Additive zum „clean up“ und zur „keep clean“ Strategie untersucht.

#### *AP 2.2: Konzepte gegen Ablagerungsbildung*

Im Zuge dieses Arbeitspakets wurden Maßnahmen zur Vermeidung von Ablagerungen entwickelt und umgesetzt. Hierbei wurden unter anderem die Ergebnisse aus den Grundlagenversuchen herangezogen. Hauptaugenmerk lag auf der Entwicklung eines Kraftstoffkühlsystems, mit dem es möglich ist, das Temperaturniveau des Kraftstoffs im Bereich der Hochdruck-Einspritzleitung kurz vor der Einspritzung abzusenken.

### **III.2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Im Laufe des Projekts stellte sich eine starke Abhängigkeit der Ablagerungsbildung vom Temperaturniveau des eingespritzten Kraftstoffs heraus. Dazu konnte die Temperatur an der Spitze der Einspritzdüse im laufenden Motorbetrieb gemessen und eine Absenkung der Temperatur nach Kühlung des Kraftstoffs beobachtet werden. Für den Einsatz am 4-Zylinder-Vollmotorenprüfstand wurde das Kühlsystem erweitert, womit der Kraftstoff zweier Einspritzdüsen im Bereich der Hochdruck-Einspritzleitung um 10 Kelvin abgekühlt werden konnte. Die zwei verbliebenen Düsen wurden dabei im Originalzustand belassen. Die Durchflussmessung der gekühlten Düse zeigt dabei über ein Betriebsintervall von 100 Stunden einen konstanten Verlauf, während bei der originalen Düsen Leistungseinbußen zu verzeichnen sind. Die mikroskopischen Nahaufnahmen der gekühlten und originalen Düse im Vergleich geben Aufschluss über die Struktur der Ablagerungen. Es ist zu erkennen, dass sich im Falle der ungekühlten Düse eine ausgeprägte Schicht aus Aschebildnerbestandteilen wie Phosphor, Schwefel und Kalzium bildet, welche bei der gekühlten Düse nicht in der Form vorliegt, der Hauptanteil der Ablagerungen jedoch aus Kohlenstoff besteht und der kraftstoffeigenen Kohlenwasserstoffstruktur geschuldet ist. Diese Kohlenstoffablagerung wiederum ist stark temperaturabhängig und kann durch Kühlung, vor allem am Eintritt des kühleren Kraftstoffs ins Düsenloch, geringgehalten werden.

Die Auswertung eines Dieselreferenzversuches zeigt, dass es auch im Dieselbetrieb zur Durchflussabnahme kommt, woraus sich auch hierbei auf eine Ablagerungsbildung schließen lässt.

Bei der Verwendung eines Motorschmieröls mit verringerten Anteilen an Additiven wie Kalzium und Zink konnte kein positiver Einfluss bzgl. der Vermeidung von Ablagerungen festgestellt werden, da diese Bestandteile im Vergleich zur Kohlenstoffablagerung eher nebenursächlich sind.

Die Veränderung des Betriebspunktes stellte einen deutlichen Einfluss dar. Vergleicht man die Ergebnisse des Motor-Volllastbetriebs mit denen des 50 % - Lastpunktes ist bei letzterem eine höhere Abnahme der Durchflussraten der Injektoren erkennbar. Dies ist zum einen auf die schlechtere Kühlwirkung des Kraftstoffs in den Düsenlöchern aufgrund der verringerten Durchflussmenge zurückzuführen. (Das prinzipiell niedrigere Temperaturniveau des Kraftstoffs im Gegensatz zur Düsen Spitze im Brennraum, auch ohne zusätzliche Kraftstoffkühlung, hat eine kühlende Wirkung auf die Düsenlöcher zur Folge). Zum anderen sind die Einspritzdrücke im Teillastbereich niedriger. Höhere Drücke haben dahingehend eine „reinigende“ Wirkung auf die Düsenlöcher, da es dabei zu kavitierenden Effekten im Düsenloch kommt.

Versuche zur Beeinflussung der chemisch/physikalischen Eigenschaften des Rapsölkraftstoffs durch den Einsatz von Additiven zeigten teilweise positive Effekte. In Versuchen zur „clean up“ Strategie sollten gealterte Düsen wieder gereinigt werden. Im Volllastbetrieb des Motors mit einer Mischung aus dem Detergent 1 - Additiv und dem Antioxidantienpaket wurden jedoch zum einen starke Leistungsschwankungen beobachtet, zum anderen verschlechterten sich die Einspritzdüsen enorm hinsichtlich des Durchflusses. Es wird vermutet, dass sich durch die Additivierung Stoffe aus kraftstoffführenden Leitungen gelöst haben, welche diese sowie die Einspritzdüsen zusetzen können. Auch im 50 % - Lastpunkt wurde eine deutliche Verschlechterung der Düsen verzeichnet. Ähnliche Effekte der Leistungsminderung unter Einsatz genannten Additivs wurden auch in den Feldtests des Projektpartners TFZ beobachtet. Bei der Untersuchung einer „keep clean“ Additivierung aus dem Detergent 2 zusammen mit dem Antioxidantienpaket waren im Volllastbetrieb ähnliche Phänomene wie beim „clean up“ Additiv beobachtet, da der Motor auch hier starke Leistungsschwankungen aufzeigte. Aus diesem Grund wurde der Motor dann im 50 % - Lastpunkt weiterbetrieben. Hierbei zeigten sich bessere Einspritzmengenwerte als im gleichen Betriebspunkt ohne Additiv.

Somit kann die „keep clean“ Additivierung im Rapsölbetrieb durch richtige Abstimmung von Additiv und Betriebspunkt neben der Kraftstoffkühlung als ablagerungsvermindernde Maßnahme eingesetzt werden. Es wäre notwendig die erzielten Ergebnisse in Form von Folgeprojekten unter realen Praxisbedingungen zu erproben und zu validieren, um auch äußeren Einflüsse (wechselnde Temperaturen, Staubemissionen, Kaltstartverhalten, schnell wechselnde Lastprofile, etc.) mit einfließen lassen zu können. Für die Umsetzung der Technologie wäre zudem eine Demonstration der Entwicklungen, auch im Hinblick auf die aktuelle Motorenentwicklung hinsichtlich neuer Abgasnormen, etc., denkbar.

### **III.3 Teilvorhaben 3: TEC4FUELS GmbH**

Die TEC4FUELS GmbH war am Projekt „SAVEbio“ mit dem Teilvorhaben 3, „Überführung der Prüfmethode in Dienstleistung“ beteiligt.

#### **III.3.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Ziel der Firma TEC4FUELS war es, die Prüfmethode dahingehend zu bewerten, dass nach Projektende als Dienstleistung für das Testing eine Prüfung mit einem nichtmotorischen Ablagerungsprüfstand angeboten werden kann. TEC4FUELS sollte dabei die Untersuchungen des OWI begleiten. Dies betraf die Prüfstandsplanung, den Aufbau und den Versuchsbetrieb.

TEC4FUELS sollte dabei ein besonderes Augenmerk auf die Eignung des Prüfstands für den Einsatz als Dienstleistung legen. Hierbei wurden andere Schwerpunkte gesetzt als in den wissenschaftlichen Untersuchungen des OWI. Hierzu gehörten insbesondere die Zeitraffung des Prüfzyklus und die Anpassung des Prüfstandsdesigns auf den Einsatz im Dienstleistungsbereich (z.B. schnelle, einfache Umrüstung, Reduktion auf die für die Dienstleistung wesentlichen Ausstattungsmerkmale).

#### **III.3.2 Bearbeitete Arbeitspakete**

Es wurde primär das Arbeitspaket 4 bearbeitet und unterstützt. Arbeitspaket 1 wurde im weiteren Sinne durch die Unterstützung der Literaturrecherche hinsichtlich bekannter allgemeiner Einflüsse auf das Ablagerungsverhalten unterstützt. Die anderen Arbeitspakete wurden in geringem Umfang durch die Einbringung von Expertise insbesondere hinsichtlich innerer Injektorablagerungen unterstützt.

#### **III.3.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Sowohl im Rahmen der Literaturrecherche zu Beginn des Projektes als auch im Rahmen der technischen Diskussionen innerhalb des Projektes konnte das vertiefte Verständnis hinsichtlich Injektorablagerungen hilfreich in das Projekt eingebracht werden. Dies betraf primär die Unterscheidung äußerer (EDID) und innerer Injektorablagerungen (IDID) und hierbei insbesondere ihre Erkennung. Der Transfer erfolgte sowohl durch die Dissertationsschrift als auch die Expertise von Herrn Dr. Hoffmann. Weitere Details zu den Erkenntnissen der Literaturrecherche finden sich in Kapitel II.1.6.1.

Das wichtigste Ergebnis war der geplante und erfolgte Transfer des Forschungsprüfstands in einen vereinfachten Prüfstand für Dienstleistungszwecke. Wie in Kapitel II.1.6.3 ausführlich dargelegt, wurde ein stark vereinfachtes Prüfstandsdesign entwickelt und implementiert. Die Ziele eines kostengünstigen und einfach umzurüstenden Prüfstandes konnten vollständig erreicht werden. Eine Raffung des Prüfzyklus wird durch schnellere Aufheizkurven, ältere (Euro 5) Kraftstofffilter und eine geringere Kraftstoffmenge erreicht, was zusammengenommen eine Verschärfung der Prüfbedingungen unter ansonsten

vergleichbaren Randbedingungen bedeutet. Das entwickelte Prüfstandskonzept kann deutlich flexibler als der SAVEbio Prüfstand auf den Einsatz anderer Injektortypen umgerüstet werden und war hinsichtlich der Baukosten deutlich billiger. Dies ist ideal für den angedachten Einsatz im Dienstleistungsgeschäft. Für den Einsatz in Forschungsprojekten wie SAVEbio ist der Prüfstand jedoch weniger gut geeignet als der SAVEbio Prüfstand. Dies betrifft insbesondere die vereinfachte Steuerung, die hinsichtlich dynamischer Änderungen der Prüfbedingungen deutlich weniger flexibel ist. Es betrifft jedoch auch die verwendete Hochdruckpumpe, bei der bewusst ein Modell aus einem Motor der Emissionsstufe Euro 5, also circa 2012 gewählt wurde. Solche Systeme sind im Feld noch umfassend vertreten, insofern nicht veraltet. Durch die Verwendung des Euro 5 Systems konnte die Druckregelung im Vergleich zu aktuellen Systemen deutlich einfacher gehalten werden. Moderne Systeme müssen winkelabhängig angesteuert werden, was neben offensichtlichen Komponenten wie einem Drehwinkelgeber auch eine deutlich schneller reagierende Steuerung voraussetzt. Zudem ist der maximale Druck für Untersuchungen auf 1.800 bar begrenzt. Diese Limitierungen sind für den Großteil der angefragten Dienstleistungen und auch für viele Kraftstoffkompatibilitätsuntersuchungen in Forschungsprojekten vernachlässigbar, sind für Detail- und Grundlagenuntersuchungen jedoch hinderlich.

### **III.4 Teilvorhaben 4: ERC Additiv GmbH**

#### **III.4.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Die Firma ERC Additiv GmbH trägt zu dem Projekt Know-how und Erkenntnisse aus dem Additiveinsatz in der Automobilindustrie bei. Das Ziel ist es, die Wirkfähigkeit von Reinigungsadditiven für den Einsatz von Pflanzenöl entweder zu verifizieren oder herzustellen. Hierzu sind als Zwischenziele die Erfassung pflanzenölspezifischer Effekte, die Überprüfung und Bewertung der Eignung des nichtmotorischen Ablagerungsprüfstands sowie, falls notwendig, die Erarbeitung einer dem Verwendungszweck angepassten Additivierungsstrategie. Zur Überprüfung/ Entwicklung der Additivierungsstrategie werden auch die Analyseergebnisse aufgetretener Ablagerungen und der Kraftstoffe genutzt. Ferner werden die Eigenschaften der verwendeten Kraftstoffe bewertet und gegebenenfalls mit Hilfe gezielter Additivierung eingestellt.

#### **III.4.2 Bearbeitete Arbeitspakete**

ERC Additiv GmbH hat im Rahmen des Verbundvorhabens das AP 3.1 „Entwicklung einer additivbasierten Vermeidungs- und/oder Reinigungsprozedur“ bearbeitet.

Die Additiventwicklung umfasste die Unterstützung bei der Interpretation und die Verwertung der Ergebnisse aller anderen Arbeitspakete und die Bereitstellung von Mustern für die Arbeitspakete, die Motor-, Fahrzeug- und Prüfstandversuche beinhalten. Die Bearbeitungsdauer des Arbeitspakets erstreckte sich auf die gesamte Projektlaufzeit.

#### **III.4.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

- Die physikochemischen Eigenschaften des OMEx als eines möglichen Alternativkraftstoffes für die Testmatrix wurden untersucht. Bei der ERC Additiv GmbH wurden die Messungen durchgeführt, die die Datenbank und das Verständnis der Thematik „OMEx“ erweitern. Als Prüfparameter wurden die ausgewählten, normrelevanten (DIN EN 590) Eigenschaften getestet: Dichte, Viskosität, Flammpunkt, CFPP, Cetanzahl und Schmierfähigkeit.
- Das Kälteverhalten der bereitgestellten Pflanzenöle wurde bei ERC rheologisch untersucht. Das Kaltstartverhalten durch den Zusatz eines Additivs wurde nicht verbessert.
- Aufgrund des möglichen FAME-Einsatzes als Zweitkraftstoff (und auch als mögliche Reinigungsstrategie, die sich als erfolgreich gezeigt hat (TFZ)) wurde auch das Kälteverhalten des FAME untersucht. Je nach FAME- Sorte (RapsölME, SoyaölME und UCOME (Used Cooking Oil Methyl Ester) zeigen die Additive unterschiedliche Wirkung. Es wurde ein Additiv gefunden, welches eine bessere Performance für UCOME (besonders interessant wegen seinem Klimabeitrag) und SME aufweist. ERC beobachtet den Markt der CFI und testet die neuen Produkte auch in Hinsicht

auf ihre mögliche Wirksamkeit für die Pflanzenöle: so, die vielversprechende CFI für FAME können auch als Kältefließverbesserer in den Pflanzenölen eingesetzt werden (ggf. je nach Ursprung der Öle).

- ERC stellte im Rahmen des Projektes verschiedene Additive zur Verfügung. Basierend auf der Literaturrecherche und eigenen Erfahrungen auf dem Gebiet der Additivierung wurde der Einsatz der Antioxidantien (als Präventive Maßnahme) und Detergentien als sinnvolle Strategie zur Ablagerungsminderung identifiziert. Die Auswahl der Additive erforderte als Erstes die Überprüfung deren Löslichkeit im Pflanzenöl. Die Löslichkeit der Additive im Pflanzenöl und FAME wurde untersucht bei Raumtemperatur und bei stark erhöhten Konzentrationen.
- Vermehrte Ablagerungsbildung und somit die im Pflanzenölbetrieb festgestellte Leitungsminderung hängt auch mit der Veränderung der Oxidationsstabilität des Kraftstoffes bei der Lagerung im Fahrzeugtank während der Testperiode. Die Alterungsprozesse tragen zur Veränderung der physikochemischen Eigenschaften der Pflanzenöle, wie z.B. Dichte und Viskosität. Insbesondere die letzte kann sehr stark auf das Einspritzverhalten der Injektoren auswirken. Durchgeführte forcierte Alterung des Pflanzenölkraftstoffes und anschließendes Vermessen der Dichten und Viskositäten zeigten den Anstieg beider Werte nach der Alterung, wobei die additvierten Proben weniger beeinträchtigt waren und somit sollte der Einspritzvorgang weniger betroffen sein.
- Sicherheitsrelevante Informationen zu den eingesetzten Additiven wurden zusammengestellt. Da der Einsatz der Pflanzenkraftstoffe in den landwirtschaftlichen und/oder ökologisch sensiblen Gebieten sinnvoll ist, sollten auch die Additive möglichst umwelt- und gesundheitsunschädlich sein. Die Kennzeichnung der Additivgemische wird primär durch das Lösungsmittel ausgelöst. Nur bei den Antioxidantien werden bestimmte H-Sätze durch die Wirkstoffe selbst ausgelöst. Würde man als Lösungsmittel z.B. FAME (nach CLP-Verordnung kennzeichnungsfrei) einsetzen, würden viele Kennzeichnungen des Additivs entfallen.

### III.5 Teilvorhaben 5: Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

Seit Jahrzehnten wird die Abgasgesetzgebung in der EU kontinuierlich verschärft [21]. In Landmaschinen werden daher modernste Motorensysteme eingesetzt, um die limitierten Schadstoffkomponenten Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) zu reduzieren. Neben der Verwendung von Abgasnachbehandlungssystemen, spielt dabei die zuverlässige Funktion des Common-Rail Kraftstoffeinspritzsystems eine wesentliche Rolle. Die in modernen Einspritzsystemen gängigen Injektoren ermöglichen ein hohes Druckniveau sowie Mehrfacheinspritzungen. Daraus ergibt sich ein großes Potential zur Verringerung von gesetzlich limitierten Abgaskomponenten sowie des Kraftstoffverbrauchs und damit auch von Treibhausgasemissionen (THG). Ablagerungen im und auf dem Kraftstoffinjektor bewirken einen geringeren Kraftstoffdurchfluss, eine verzögerte Bewegung der Düsennadel oder sogar einen Funktionsausfall. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ablagerungsbildung stellen die Konstruktion des Injektors, die Kraftstoff- sowie Brennraumtemperatur und die Kraftstoffeigenschaften dar [39].

Für landwirtschaftliche Maschinen ist der Einsatz flüssiger Biokraftstoffe wie Biodiesel und Rapsölkraftstoff eine vielfach erprobte Möglichkeit zur Minderung des Ausstoßes klimawirksamer Gase [53]. Mit Rapsölkraftstoff können die kraftstoffbedingten Treibhausgasemissionen landwirtschaftlicher Produktionsverfahren um 57 bis 91 % im Vergleich zu fossilem Diesel reduziert werden [15]. Genormter Rapsölkraftstoff nach DIN 51605:2016 [9] eignet sich auch für den Einsatz in neuen Motorengenerationen. So funktionierten bei Untersuchungen von Ettl et al. (2019) bei 15 Traktoren die Injektoren mit Rapsölbetrieb bis zu 5.000 Bh ohne Störung, und es war keine Veränderung der Leistung und des Kraftstoffverbrauchs messbar [18]. Bei einzelnen Traktoren der Abgasstufe IIIB und IV traten hingegen geringfügige Leistungsschwankungen auf [18]. Diese werden oft auf Ablagerungen am und im Injektor zurückgeführt, die sowohl im Dieselbetrieb als auch bei der Verwendung von Biokraftstoffen auftreten können [34][30]. Hinsichtlich der Ursache und Verringerung der Ablagerungsbildung in und auf den Injektoren moderner Traktoren im praktischen Betrieb mit Biokraftstoffen liegen bislang aber kaum Erfahrungen vor.

#### III.5.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel der Arbeiten des TFZ im Rahmen des Vorhabens ist es daher, die Ablagerungsbildung und -vermeidung von in Traktormotoren eingebauten Injektoren im Betrieb mit Rapsölkraftstoff am Traktorenprüfstand und im Praxiseinsatz zu untersuchen. Dabei sollen die Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Injektoren erfasst und Einflüsse auf die Bildung von Ablagerungen ermittelt werden. Außerdem sollen Kenngrößen identifiziert werden, die während des Betriebs Informationen über die Ablagerungsbildung an Injektoren liefern. Schließlich sollen Strategien validiert werden, welche der Bildung von Ablagerungen entgegenwirken bzw. bereits bestehende Ablagerungen wieder entfernen.

### III.5.2 Bearbeitete Arbeitspakete

Die wesentlichen Aufgaben des TFZ im Rahmen des Vorhabens umfassen die Erfassung der Einsatzbedingungen von Injektoren, die Alterung und Begutachtung von Injektoren im Praxiseinsatz, die Ermittlung von Kenngrößen, die die Bildung von Ablagerungen am Injektor beschreiben sowie die Validierung von Maßnahmen zur Vermeidung von Ablagerungen an Injektoren im Traktormotor

Der Feldtest sowie die Prüfstandstests verliefen überwiegend planmäßig, so wie im Projektantrag beschrieben. In der Projektlaufzeit wurden dabei drei Traktoren im Feld und am Prüfstand untersucht und ca. 140 Kraftstoffproben gezogen. Es wurde in knapp über 50 Einzelmessungen Leistung, Kraftstoffverbrauchs und Abgasemissionen erfasst. Verzögerungen bei den Arbeiten am TFZ ergaben sich im Arbeitspaket 5 (Einsatztests der entwickelten Maßnahmen) dadurch, dass der Injektorenprüfstand des Projektpartners OWI später als ursprünglich geplant in Betrieb genommen wurde und nicht alle entwickelten Maßnahmen im Feldtest bzw. am Prüfstand validiert werden konnten.

#### *AP 1.2: Daten aus Feldtests und publizierten Realdaten (TFZ)*

Zur Auswahl der Traktoren wurden vorhandene Daten und Betriebsprofile von insgesamt 20 pflanzenöлтаuglichen Traktoren geprüft, um ein passendes Versuchsfahrzeug für anstehende Messaufgaben zur Injektoralterung für das Projekt SAVEbio auszuwählen. Die Auswahl passender Injektorbaureihen erfolgte in Abstimmung mit dem Projektpartner OWI GmbH sowie der Deutz AG und John Deere GmbH & Co. KG. Ziel war es dabei, eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den Untersuchungen im Feld, am Traktorenprüfstand des TFZ sowie am Injektorenprüfstand des OWI herzustellen. Am TFZ wurden bereits vorhandene Daten, insbesondere die des Traktors Fendt Vario 724 S4 (FE-S) ausgewertet und auch weitere Untersuchungen mit den Traktoren im Praxiseinsatz und am Traktorenprüfstand durchgeführt. Die Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Injektoren (z. B. Motordrehzahl und -last, Temperaturen am Injektor) am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) wurden mit einem Datenlogger aufgezeichnet und ausgewertet. Zusätzlich wurde über die gesamte Betriebsdauer des Traktors FE-S ein Betriebstagebuch geführt. Die Messdaten aus den Prüfzyklen des Traktorenprüfstands wurden für die Weiterentwicklung des nichtmotorischen Injektorenprüfstands dem OWI zur Verfügung gestellt. Nach Ausbau der Injektoren am Fendt Vario 724 S4 (FE-S) und John Deere 6215R (JD-Wö) wurden die Ablagerungen analysiert und charakterisiert, was einen Abgleich der im realen Betrieb auftretenden Ablagerungen mit den am Prüfstand generierten Ablagerungen ermöglicht.

#### *AP 3.2: Untersuchungen am Traktorenprüfstand und Validierung mit Daten*

Gemäß der Vorhabensbeschreibung wurden am Traktorenprüfstand mehrere Messreihen mit neuen und gebrauchten Injektoren durchgeführt. Am Traktorenprüfstand wurden im Feldtest gealterte und neue Injektoren der Traktoren FE-S und JD-Wö untersucht. Dabei wurden die Leistung an der Zapfwelle, der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen

sowie weitere Betriebsdaten (z. B. Abgastemperaturen, Kühlmitteltemperaturen) unter Anwendung ausgewählter Prüfzyklen erfasst und mit den im Feldtest „erzielten“ Ablagerungen an den Injektoren abgeglichen. Die 18 im Feld gealterten Injektoren (drei Injektorsätze) wurden dem Projektpartner OWI zur weiteren Vermessung am Injektorenprüfstand zur Verfügung gestellt. Neben dem Einsatz unterschiedlich „vorgealterter“ Injektoren erfolgten am Traktorenprüfstand auch Testläufe im Vergleich zwischen dem Rapsöl- und Dieselkraftstoffbetrieb. Das am TFZ vorhandene Zylinderdruckindiziersystem konnte an einem John Deere 6930 Traktor der Abgasstufe IIIA installiert und der Zylinderdruckverlauf gemessen werden. Gleichzeitig wurde geprüft, ob bestimmte Zeigergrößen, wie Leistung, Abgastemperatur etc. die Ablagerungsbildung an Injektoren im eingebauten Traktormotor zuverlässig anzeigen können. Die maximale Leistung an der Zapfwelle und die Kraftstofffeinspritzmengen erscheinen als zuverlässige Zeigergrößen für das Auftreten von Ablagerungen.

#### *AP 5: Einsatztests der entwickelten Maßnahmen*

In diesem Arbeitspaket sollen Maßnahmen zur Vermeidung oder Minderung von Ablagerungen getestet werden. Am TFZ wurden Vermeidungsstrategien für den Feldeinsatz getestet. Die Festlegung der zu untersuchenden Vermeidungsstrategien (Einsatz von Additiven und Einsatz von Biodiesel) erfolgte gemeinsam mit den Projektpartnern ERC und OWI. Aufgrund des verzögerten Beginns der Messungen am Injektorprüfstand des OWI lagen die dort gewonnenen Erkenntnisse z. B. zur Additivwirksamkeit zu Beginn des Feldtests noch nicht vor. Die Versuche in Labor und Praxis wurden daher mit identischen Maßnahmen zeitlich parallel durchgeführt und die Ergebnisse im Nachgang abgeglichen. Zudem wurde auch auf aus der Literatur bekannte Maßnahmen zur Minderung oder Vermeidung von Ablagerungen zurückgegriffen, wie z. B. den B100-Einsatz. Die Installation und die Untersuchung von bereits mit Ablagerungen behafteten Injektoren aus Prüfstandsläufen des Projektpartners OWI in den Versuchstraktoren wurde erfolgreich durchgeführt.

### **III.5.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Die Untersuchungen zur Ablagerungsbildung von Injektoren am TFZ fanden an pflanzenöлтаuglichen Traktoren sowohl im Feld unter Praxisbedingungen als auch bei Messungen am Prüfstand statt. Dabei wurden im Wesentlichen folgende Ergebnisse erzielt:

Die pflanzenöлтаuglichen Prototyp-Traktoren Fendt Vario 724 S4 (Kurzbezeichnung FE-S) und John Deere 6215R (Kurzbezeichnung JD-Wö), die beide die Abgasstufe IV erfüllen, absolvierten rund 2.100 (FE-S) bzw. 500 (JD-Wö) Betriebsstunden (Bh) im Feldtest mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605. Die Betreiber und Fahrer zeigten sich mit der Leistung und dem Einsatzverhalten der Pflanzenöltraktoren sehr zufrieden. Es traten keine schwerwiegenden Störungen oder längeren Ausfallzeiten auf, die im Zusammenhang mit dem Kraftstofffeinspritzsystem bzw. den -injektoren stehen.

Die Untersuchungen zu den Einsatzbedingungen der Injektoren ergaben, dass im Rapsölbetrieb das Temperaturniveau im Kraftstoffsystem unmittelbar vor und nach den Injektoren um etwa 10 K höher war als im Betrieb mit Dieselkraftstoff (FE-S). Die Oxidationsstabilität des getankten Rapsölkraftstoffs nach DIN 51605 sank während des Einsatzes im Fahrzeugtank des Traktors FE-S deutlich ab. Rapsöl mit einer geringen Oxidationsstabilität bzw. die Alterungsabbauprodukte stellen eine mögliche Ursache für die Ablagerungsbildung im Einspritzsystem dar. Eine Additivierung des Rapsöls mit einem Oxidationsstabilisator konnte die Alterung im Fahrzeugtank verzögern, jedoch wurde dennoch der Grenzwert der Oxidationsstabilität nicht eingehalten. Der Injektortausch und die zunehmende Betriebszeit im Feldtest beeinflussten die Kraftstofftemperaturen nicht. Um eine Ablagerungsbildung aufgrund von beschleunigter, thermisch begünstigter Alterung des Rapsölkraftstoffs vorzubeugen, sollten zusätzliche technische Maßnahmen im Rapsölkraftstoffsystem ergriffen werden, wie z. B. die Absenkung des Kraftstofftemperaturniveaus. Die Motorbetriebsdaten aus dem tatsächlichen Betrieb wurden zudem für die Entwicklung von Belastungsprofilen für den Injektorprüfstand am OWI genutzt.

Bei wiederholten Leistungs- und Emissionsmessungen am Traktorenprüfstand wurde festgestellt, dass die maximale Leistung an der Zapfwelle der Traktoren FE-S und JD-Wö im Bereich von 6 % bis 10 % abnahm. Abbildung 102 zeigt exemplarisch die relative Veränderung der maximalen Leistung des Traktors FE-S im Vergleich zum Ausgangszustand mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff.

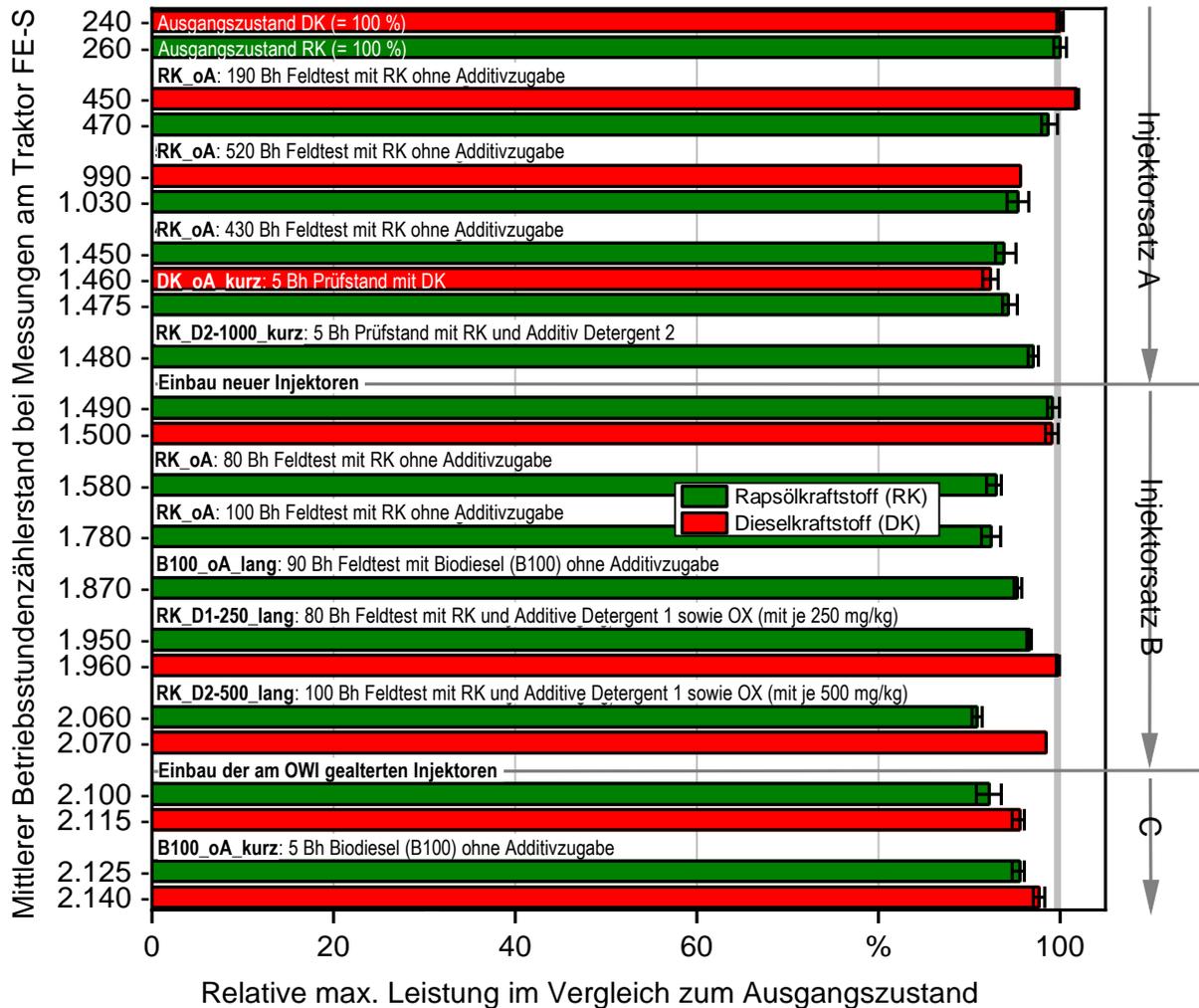


Abbildung 102: Relative Veränderung der Leistung des Traktors FE-S im Vergleich zum Ausgangszustand mit Rapsöl (RK)- und Dieselmotorkraftstoff (DK)

Der Rückgang der Leistung kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Ablagerungen in den Injektoren zurückgeführt werden. Der Tausch der gealterten gegen neue Injektoren führte bei beiden Traktoren zum Anstieg der Leistung auf das Ausgangsniveau. Die optische Begutachtung der im Feldtest mit Rapsölkraftstoff ohne Additiv gealterten Injektoren der Traktoren FE-S und JD-Wö zeigen freie Einspritzlöcher mit umliegenden äußeren Ablagerungen. Von einer Beeinträchtigung des Einspritzbildes wird nicht ausgegangen.

Nach erfolgtem Feldeinsatz der Traktoren weichen die am Traktorenprüfstand mit den gealterten Injektoren gemessenen Einspritzmengen ( $m_{\text{Mess}}$ ) stärker von den anhand der Motorsteuerungsdaten errechneten Einspritzmengen ( $m_{\text{Calc}}$ ) ab als im Vergleich zum Neuzustand der Injektoren. Auch weitere Kenngrößen, wie Motoröltemperatur oder Abgastemperatur korrelieren bei Vollast mit dem Rückgang der Einspritzmengen. Diese Erkenntnisse können gegebenenfalls für die Diagnose von Ablagerungen anhand der Veränderung von Betriebsdaten z. B. bei der Service-Werkstätte genutzt werden.

Ein Zusammenhang der Ablagerungsbildung an den Injektoren mit den Rohemissionen vor der Abgasnachbehandlung war in den acht Prüfphasen des stationären Testzyklus NRSC nicht nachweisbar. Die Rohemissionen des Traktor FE-S werden von anderen Einflüssen, wie z. B. der von der Motorsteuerung geregelten Abgasrückführrate, überlagert. Auch anhand des Zylinderdruckverlaufs des John Deere 6930 Premium (Abgasstufe IIIA) waren keine Auswirkungen auf den Motorbetrieb am Kraftstoffinjektor messbar. Trotz des ablagerungskritischen Start-Stopp-Betriebs im Prüfzyklus des OWI gab es keine signifikante Veränderung im Zylinderdruckverlauf sowie im Emissionsverhalten. Insgesamt sind die Injektoren des Traktors der Abgasstufe IIIA auch nach ca. 5.600 Bh Laufzeit mit Rapsölkraftstoff voll einsatzfähig.

Strategien zur Ablagerungsminderung („clean-up“) wurden durch wiederkehrende Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsmessungen am Traktor FE-S im Betrieb mit gealterten Injektoren untersucht. Ablagerungsbedingte Leistungsverluste konnten durch ein kurzzeitiges Spülen der Injektoren über eine geringe Einsatzdauer von ca. 5 Bh mit Dieselmotorkraftstoff, Biodiesel oder Rapsölkraftstoff mit Additivzugabe (Detergent 2) nicht ausgeglichen werden. Signifikante Unterschiede in der Leistung bzw. Einspritzmenge zeigten sich erst bei den Varianten mit einer höheren Einsatzdauer zwischen 80 und 100 Bh. Nach dem Einsatz von Biodieselmotorkraftstoff (B100) im Feldtest über 90 Bh war die Leistung an der Zapfwelle unter Vollast um 7,7 % höher als vor dem B100-Einsatz. Auch nach Feldtest über 80 Bh mit der Zugabe von 250 mg/kg Additiv Detergent 1 (Wirkstoff PIBSI) und 250 mg/kg eines Oxidationsstabilisators im Rapsölkraftstoff war die Leistung an der Zapfwelle um 2,1 % angestiegen.

Insgesamt treten an den getesteten pflanzenölsauglichen Traktoren der Abgasstufe IV Ablagerungen am Kraftstoffinjektor auf, welche zu einer geringen Leistungsminderung im Bereich von 6 % und 10 % führen. Die Anwendbarkeit der Traktoren für landwirtschaftlichen Arbeiten im Feld und das Emissionsverhalten im Vergleich zum Neuzustand werden jedoch nicht signifikant beeinflusst. Um der Ablagerungsbildung vorzubeugen, gilt es zukünftig die Kraftstoffalterung im Rapsölkraftstofftank des Fahrzeugs, z. B. durch Absenkung des Kraftstofftemperaturniveaus, möglichst zu verlangsamen. Der zwischenzeitliche Einsatz von Biodiesel führte zu einer Leistungsanhebung des Traktors mit Injektoren, welche bereits mit Ablagerungen behaftet waren. Der Einfluss der getesteten Additive im Rapsölkraftstoff auf die Leistung des Traktors variiert in Abhängigkeit von der Konzentration bzw. dem Wirkstoff. Die Strategien zur Ablagerungsminderung, z. B. durch den Additiveinsatz gilt es in weiterführenden Untersuchungen im Feldeinsatz oder am Injektorprüfstand zu bestätigen. Der Einbau von Injektoren am Traktor, welche am Injektorprüfstand künstlich gealtert wurden, führte ebenso wie bei im Feld gealterten Injektoren zu einer Leistungsminderung im Vergleich zu neuen Injektoren. Der Zylinderdruckverlauf sowie die Leistungs- und Emissionsmessungen eines rapsölsauglichen Traktors der Abgasstufe IIIA bestätigen die volle Funktionsfähigkeit der Injektoren dieser Generation nach einer Laufzeit von 5.600 Bh. Ungeklärt bleibt das Langzeitbetriebsverhalten der Injektoren in Rapsöltraktoren der Abgasstufen IV und V bei hohen Laufzeiten (z. B. im Bereich zwischen 5.000 und 10.000 Bh).



## IV Quellenverzeichnis

- [1] ARONDEL, M.; RODESCHINI, H.; LOPES, M.; DEQUENNE, B. (2012): Fuel Additives for Reduction of Internal Diesel Injectors Deposits (IDID, "lacquering"): A Critical and Priority Route. SAE Technical Paper 2012-01-1687,
- [2] BARBOUR, R.; QUIGLEY, R.; PANESAR, A.; PAYNE, J.; ARTERS, D.; BUSH, J.; STEVENS, A. (2013): Finding a solution to internal diesel injector deposits. 9th International Colloquium Fuels Conventional and Future Energy for Automobiles, S. 177–187
- [3] BARKER, J.; SNAPE, C.; SCURR, D. (2013): Diesel Deposits. In: Bartz, W. J.; Keuper, R. (Hrsg.): Fuels 2013. Conventional and Future Energy for Automobiles. 9th International Colloquium. Technische Akademie Esslingen (TAE), January 15-17, 2013. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 149–156, ISBN 978-3-943563-04-07
- [4] BARKER, J.; REID, J. (2015): Injector and Fuel System Deposits. In: Bartz, W. J.; Keuper, R. (Hrsg.): Fuels 2015. Conventional and Future Energy for Automobiles. 10th International Colloquium. Technische Akademie Esslingen (TAE), January 20-22. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 263–270
- [5] CAPROTTI, R.; BHATTI, N.; BALFOUR, G. (2010): SAE Technical Paper 2010-01-2250 Deposit Control in Modern Diesel Fuel Injection Systems. Powertrains 2010, Fuels & Lubricants Meeting October 2010 San Diego CA USA Session: Fuel & Additive Effects on CI Engine Performance published SAE International Journal of Fuels and Lubricants 2010 . SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 1-16
- [6] CRUSIUS, S.; FINK, C.; HARNDORF, H.; ET AL. (2014): Kraftstoffbedingte Ablagerungen in Common-Rail-Injektoren - Ursachen und Maßnahmen. 9. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung 2014,
- [7] CRUSIUS, S.; LANGE, R.; JUNK, R.; SCHÜMANN, U. (2015): Using of SEM and EDS for Analysis of Internal Diesel Injector Deposits. In: Bartz, W. J.; Keuper, R. (Hrsg.): Fuels 2015. Conventional and Future Energy for Automobiles. 10th International Colloquium. Technische Akademie Esslingen (TAE), January 20-22. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 299–312
- [8] DEUßEN, R.; SCHLÜTER, V.; SCHMIDT, J.; SPRENGER, A.; ZOBEL, C. H. (2013): Meisterwissen im KfZ-Handwerk, Vogel, Würzburg, 2013, ISBN: 978-3-8343-3311-7
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN 51605: Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren, Ersatz für DIN 51605:2010-09, Januar 2016. Berlin
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN 51623: Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren – Pflanzenölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren, Ersatz für DIN SPEC 51623:2012:06, Dezember 2015 Berlin
- [11] EE, J.; Panesar, A.; Arters, D. (2009): Operation and Appetite: Our Experience with the CEC F-98-08 DW10 Nozzle Coking Test. 15<sup>th</sup> annual Fuels & Lubes Conference, March 04-06 2009, Hanoi, Vietnam

- [12] ELLENSCHLÄGER, A. (2012): Bildung von Ablagerungen durch Biodiesel in einem Führungsspiel und deren versuchstechnische Bewertung. Dissertation: RWTH Aachen, 156 Seiten
- [13] EMBERGER, P. (2013): Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhalten verschiedener Pflanzenöle. Dissertation. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, 158 Seiten, ISBN 978-3-84391105-4
- [14] EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2013): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 32, 125 Seiten, ISBN 1614-1008
- [15] ENGELMANN, C.; DRESSLER, D.; HAAS, R.; REMMELE, E.; THUNEKE, K. (2016): Klimaschutz durch Rapsölkraftstoff. TFZ-Kompakt, Nr. 13. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 16 Seiten
- [16] Ettl, J.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2016): Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB. Begleitforschung zum Einsatz pflanzenöлтаuglicher Traktoren auf bayerischen Versuchsgütern. In Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), John Deere - European Technology Innovation Center, BayWa AG. Berichte aus dem TFZ, Nr. 47. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 179 Seiten
- [17] Ettl, J.; BERNHARDT, H.; PICKEL, P.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P. (2018): Transfer of agricultural work operation profiles to a tractor test stand for exhaust emission evaluation. Biosystems Engineering, Jg. 176, S. 185–197
- [18] Ettl, J.; THUNEKE, K.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2019): Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV. Abgasemissionen, Effizienz und Betriebssicherheit pflanzenöлтаuglicher Traktoren auf den bayerischen Versuchsbetrieben. Berichte aus dem TFZ, Nr. 60. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 210 Seiten
- [19] ESCHRICH, R.; SCHRÖDER, J.; HARTMAN, F.; GLÄSER, R. (2015): Alterung von Dieselaugkatalysatoren im Betrieb mit Biokraftstoffen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Ausgabe 01/2015, <https://doi.org/10.1007/s35146-014-2010-0>, Springer Automotive Media, 2015
- [20] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2017): Delegierte Verordnung (EU) 2017/654 der Kommission vom 19. Dezember 2016 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich technische und allgemeiner Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typengenehmigung von Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 60, Nr. L 102 vom 13.4.2017, S. 1–333
- [21] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur

Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 59, Nr. L 252, S. 53–117

- [22] FELDHOFF, S.; HILDEBRANDT, K. (2019): Untersuchung und Bewertung der Einflüsse auf die Ablagerungsbildung in Dieselinjektoren sowie experimentell basierte Modellbildung mittels eines nichtmotorischen Injektorablagerungsprüfstands. DGMK Forschungsbericht 784. Hamburg
- [23] GIERSCH, R. J. (2007): Kraftstoffeinspritztechnik: Einspritzdüsen und Düsenhalter. In: Mollenhauer, K.; Tschöke, H.: Handbuch Dieselmotoren, VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 146-153
- [24] HAWTHORNE, M.; ROOS, J. W.; OPENSHAW M. J. (2008): SAE Technical Paper 2008-01-1806 Use of Fuel Additives to Maintain Modern Diesel Engine Performance with Severe Test Conditions. Powertrains, Fuels and Lubricants Congress June 23-25 2008 Shanghai China. SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 1-7
- [25] HOANG, A. T.; LE, A. T. (2018): A review on deposit formation in the injector of diesel engines running on biodiesel. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Jg. 41, Nr. 5, S. 584–599
- [26] HOFFMANN, H. (2015): Schlussbericht zum Verbundvorhaben: Entwicklung eines nichtmotorischen Injektorverkokungsprüfstands für alternative Kraftstoffe (ENIAK); Teilvorhaben 1: Prüfstandsentwicklung. FNR FKZ 22000611, 2015
- [27] HOFFMANN, H. (2018): A contribution to the investigation of Internal Diesel Injector Deposits. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, 143 Seiten
- [28] HUBER, G.; SCHOLZ, A.; STÖHR, M.; DÜSSELDORF, C.; FLIERL, R.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; PICKEL, P. (2015): Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl. In Zusammenarbeit mit: John Deere GmbH & Co. KG, Technische Universität Kaiserslautern, B.A.U.M. Consult GmbH. Berichte aus dem TFZ, Nr. 44. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 86 Seiten
- [29] JUDGE, R.; BEDUNEAU, J.-L.; BONCOMPTE, X.; CARDON, C.; DALE, M.; RALPH, M.; SCHIFFGENS, H.J. (2014): The next generation of Delphi common rail systems for light and medium duty commercial vehicles. In; Pischinger, S.; Eckstein, L.: 23. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Aachen, 2014, S. 733-756
- [30] JUNK, R.; NOWOTNY, M.; SCHÜMANN, U.; FINK, C.; BUCHHOLZ, B. (2018): Ablagerungen in Common Rail Injektoren – Kraftstoffseitige und konstruktive Vermeidungsstrategien. Quantitative Bewertung kraftstoffseitiger Einflussgrößen auf die Ablagerungsbildung im Inneren von Common-Rail Injektoren sowie Validierung systemischer und kraftstoffseitiger Maßnahmen unter motornahen Bedingungen. Schlussbericht zum Vorhaben; Förderkennzeichen 6011860 (FVV) und 22033814 bzw. 14NR338 (FNR), Laufzeit: 01.01.2015 bis 31.03.2017. Universität Rostock - Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik - Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (Hrsg.). Rostock, 131 Seiten
- [31] JUNK, R.; CRUSIUS, S.; RICHTER, B.; LAU, K.; SCHÜMANN, U.; FINK, C. (2015): Änderungen von Kraftstoffeigenschaften unter extremen Randbedingungen - Ablagerungen in Common Rail Injektoren II. Projektlaufzeit: 01.01.2012 - 30.09.2014, Förderkennzeichen 22032311 bzw. 11NR323. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Vorhaben-Nr. 1072, Stand: Januar 2015. Hg. v. Universität Rostock - Fakultät für

Maschinenbau und Schiffstechnik - Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren. Rostock.

- [32] KASTL, J.; REMMELE, E. (2011): Additivierung von Rapsölkraftstoff. Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 25, 212 Seiten, ISBN 1614-1008
- [33] KASTL, J.; WITZELSPERGER, J.; REMMELE, E. (2015): Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN51605 – Absenkung der Gehalte an Calcium, Magnesium und Phosphor. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 41, 104 Seiten, ISSN: 1614-1008
- [34] KLAISSE, M. (2012): Ablagerungsbildung beim Betrieb eines Dieselmotors mit Rapsölkraftstoff. Ursachen - Auswirkungen - Abhilfemaßnahmen. Dissertation. München: Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt; Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie, 220 Seiten
- [35] KNOCHE, K.-F. (1981): Technische Thermodynamik für Studenten des Maschinenbaus und der Elektrotechnik ab 1. Semester. Vieweg, Braunschweig, 1981, ISBN: 3-528-23023-1
- [36] LACEY, P.; GAIL, S.; KIENZT, J. M.; MILOVANOVIC, N.; GRIS, C. (2011): Internal Fuel Injector Deposits. SAE International, Warrendale
- [37] Lacey, P.; Gail, S.; Kientz; Benoist, G.; Downes, P.; Daveau, C. (2012): Fuel Quality and Diesel Injector Deposits. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, S. 1187–1198
- [38] LEPPERHOFF, G.; HOUBEN, M. (1993): SAE Technical Paper 931032 Mechanism of Deposit Formation in Internal Combustion Engines and Heat Exchangers. International Congress and Exposition, Detroit Michigan March 1-5 1993. SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 1-9
- [39] LIAQUAT, A. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; FAZAL, M. A.; KHAN, A. F.; FAYAZ, H.; VARMAN, M. (2013): Impact of palm biodiesel blend on injector deposit formation. Applied Energy, Jg. 111, S. 882–893
- [40] LÜFT, M.; BERNHARDT, S.; VELJI, A.; SPICHER, U. (2009): SAE Technical Paper 2007-01-2031 JSAE 20077255 Optimization of Injection of Pure Rape Seed Oil in modern Diesel Engines with Direct-Injection. In: SAE International; Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) (Hrsg.): P, F&L - Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting. Grand Hotel Mediterraneo, Florence, Italy, 15.-17.06. Warrendale, PA, USA, S. 1877–1885
- [41] MERKER, G. P.; TEICHMANN, R. (2014): Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik. 7., vollst. überarb. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 1132 Seiten, ISBN 978-3-658-03194-7
- [42] MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H. (2007): Handbuch Dieselmotoren, VDI-Buch, Springer, Berlin, 2007, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-72165-9
- [43] NEULEN, M.; FELDHOFF, S.; KOCH, W. (2015): Anwendungstechnische Eigenschaften flüssiger Brennstoffe mit biogenen Anteilen. DGMK Forschungsbericht 729. Hamburg

- [44] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) (2010): OECD Standard Codes - General Texts, Code 2 - for the official testing of agricultural and forestry tractors. February 2010. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 110 Seiten
- [45] PANESAR, A.; MARTENS, A.; JANSEN, L.; LAL, S.; RAY, D.; TWILLEY, M. (2000): SAE Technical Paper 2000-01-1921 - Development of a New Peugeot Xud9 10-Hour Cyclic Test to Evaluate the Nozzle Coking Propensity of Diesel Fuels. CEC/SAE Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, June 19-22 2000 Palais Congres Paris France; Session: Diesel Performance & Additives . SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 217-224
- [46] PICKEL, P.; DIERINGER, S. (2009): Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines. Workpackage WP2 Engine development Deliverable No 2.3. The 2ndVegOil Consortium (Hrsg.). Mannheim. URL: <http://www.2ndvegoil.eu/default.asp?Menu=138>. 27.10.2015
- [47] PLANK, M.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE E. (2017): Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.). Straubing. Berichte aus dem TFZ, Nr. 49, 205 Seiten, ISBN 1614-1008
- [48] QUIGLEY, R.; BARBOUR, R.; PANESAR, A.; ARTERS, D. V. (2009): A Review of Fuel and Additive Performance in the New CEC F-98-08 DW10 Injector Fouling Test. In: Bartz, W. J. (Hrsg.): Fuels 2009. Mineral Oil Based and Alternative Fuels. 7th International Colloquium. Esslingen, 14-15 January 2009. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 307–314, ISBN 3-924813-75-2
- [49] QUIGLEY, ROBERT, ET AL. (2011): Understanding the spectrum of diesel injector deposits. UNITI Mineral Oil Technology Congress
- [50] QUIGLEY, R.; BARBOUR, R.; BURTON, D. (2015): An Investigation of Internal Diesel Injector Deposits in Dynamometer Testing of Peugeot DW10B and DW10C Engines. In: Bartz, W. J.; Keuper, R. (Hrsg.): Fuels 2015. Conventional and Future Energy for Automobiles. 10th International Colloquium. Technische Akademie Esslingen (TAE), January 20-22. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 583–598
- [51] REMMELE, E. (2002): Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff - Untersuchungen zu Kenngrößen, Prüfverfahren und Grenzwerten. Dissertation. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Landtechnik, Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, 194 Seiten, ISBN Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG); 400
- [52] REMMELE, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 88 Seiten, ISBN 978-3-9803927-9-2
- [53] REMMELE, E.; ECKEL, H.; WIDMANN, B. (2014): Regenerative Energieträger und alternative Antriebskonzepte für mobile Arbeitsmaschinen. Landtechnik, Jg. 69, Nr. 5, S. 256–259
- [54] REIF, K. (2010): Moderne Diesel-Einspritzsysteme: Common Rail und Einzelzylinder-systeme. 1. Auflage, Vieweg+Teuber, 2010, ISBN: 978-3-8348-9715-2

- [55] REIF, K. (2014): Dieselmotor-Management im Überblick. Einschließlich Abgastechnik, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN: 978-3-658-06554-6
- [56] RICHTER, B.; CRUSIUS, S.; SCHÜMANN, U.; HARNDORF HORST (2013): Charakterisierung interner Ablagerungen in Common-Rail-Injektoren. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, Nr. 74, S. 796–803
- [57] SAE INTERNATIONAL: SAE J 1939 Serial, Control and Communications Heavy Duty Vehicle Network - Top Level Document, J1939\_201808
- [58] SCHWAB, S. D.; BENNETT, J. J.; DELL, S. J.; GALANTE-FOX, J. M.; KULINOWSKI, A. M.; MILLER, K. T. (2010): Internal Injector Deposits in High-Pressure Common Rail Diesel Engines. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Nr. 3, S. 865–878
- [59] TANAKA, A.; YAMADA, K.; OMORI, T.; BUNNE, T.; HOSOKAWA, K. (2013): Inner Diesel Injector Deposit Formation Mechanism. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Nr. 6, S. 755–761
- [60] TANG, J. (2010): Belagbildung in Einspritzdüsen direkteinspritzender Dieselmotoren. Dissertation: RWTH Aachen, 118 Seiten
- [61] THUNEKE, K.; GASSNER, T.; EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2009): Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 17, 177 Seiten, ISBN 1614-1008
- [62] ULLMANN, J.; GEDULDIG, M.; STUTZENBERGER, H.; CAPROTTI, R.; BALFOUR, G. (2008): SAE Technical Paper Series 2008-01-0926 Investigation into the Formation and Prevention of Internal Diesel Injector Deposits. Diesel Fuel Injection and Sprays, 2008 World Congress Detroit Michigan April 14-17 2008. SAE International (Hrsg.). Warrendale, PA, USA, 1-12
- [63] ULLMANN, J.; GEDULDIG, M.; STUTZENBERGER, H.; CAPROTTI, R.; BALFOUR, G.; HESS, D. (2009): Effects of Fuel Impurities and Additive Interactions on the Formation of Internal Diesel Injector Deposits. In: Bartz, W. J. (Hrsg.): Fuels 2009. Mineral Oil Based and Alternative Fuels. 7th International Colloquium. Esslingen, 14-15 January 2009. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 377–388, ISBN 3-924813-75-2
- [64] ULLMANN, J.; STUTZENBERGER, H. (2013): Internal Diesel Injector Deposit Formation - Reproduction in Laboratory, System Bench and Engine Tests. In: Bartz, W. J.; Keuper, R. (Hrsg.): Fuels 2013. Conventional and Future Energy for Automobiles. 9th International Colloquium. Technische Akademie Esslingen (TAE), January 15-17, 2013. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen (TAE), S. 109–119, ISBN 978-3-943563-04-07
- [65] WUNDERLICH, T. (2014): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben, Erfassung der grundlegenden Ablagerungsbildungsmechanismen im rapsölbetriebenen Forschungsmotor mit angeschlossener Übertragung der Ergebnisse auf einen Vollmotor; Teilvorhaben 1: Versuche am Einzylinder-Prüfmotor. FNR FKZ 22005411, 2014