

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Thema:

DMEplusX

Zuwendungsempfänger:

TEC4FUELS GmbH

Förderkennzeichen:

19I20018C

Laufzeit:

01.02.2021 - 31.01.2024

Monat der Erstellung:

Juli 2024

Ansprechpartner:

TEC4FUELS GmbH
Kaiserstr. 100
52134 Herzogenrath
Simon Eiden
Tel: +49 2407 55830-13
simon.eiden@tec4fuels.com

Autoren:

Simon Eiden, Visha Ikumar Patel, Werner Willems, Klaus Lucka

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Document (e.g. report, publication) Abschlussbericht		
3. Title Abschlussbericht des Verbundvorhabens DMEplusX			
4. Author(s) (Last Name, Given Name) Eiden, Simon Patel, Vishalkumar Willem, Werner Lucka, Klaus		5. End of Project 31. Januar 2024	
		6. Publication Date 05. July 2024	
		7. Form of Publication Abschlussbericht	
8. Performing Organization(s) (Name, Address) TEC4FUELS GmbH Kaiserstr. 100 52134 Herzogenrath		9. Originator's Report No.	
		10. Reference No.*	
		11. No. of Pages 30	
12. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhornstr. 34-37 10115 Berlin		13. No. of References 6	
		14. No. of Tables 3	
		15. No. of Figures 15	
16. Supplementary Notes			
17. Presented at (Title, Place, Date)			
18. Abstract Im Rahmen des vom BMWK geförderten Verbundprojekts "DMEplusX - DME-haltige erneuerbare Kraftstoffe für den Einsatz in der Altflotte" wurden dieselmotorische Anwendungen von DME (Dimethylether) als Beimischungskomponente zu Dieselmotorkraftstoffen bis hin zu DME als Ersatzkraftstoff untersucht. Wie in vorangegangenen Projekten gezeigt wurde, kann DME als Nachrüstlösung für konventionelle Dieselfahrzeuge eingesetzt werden, was allerdings mit einem gewissen Aufwand (Einspritz- und Tanksystem, Verbrennungsprozess, Austausch der Abgasnachbehandlung) verbunden ist. Durch die Einführung eines Blendkonzepts kann dieser Aufwand minimiert und sogar ein Flex-Fuel-Betrieb des nachgerüsteten Fahrzeugs ermöglicht werden. Im Rahmen dieses Projekts wurden die Mischungsdefinition, die Materialkompatibilität und mögliche Problemlösungen durch Additivierung untersucht.			
19. Keywords Power-to-X, DME, DME-blends, CO ₂ -Neutralität, Materialverträglichkeit, HiL, Additivierung			
20. Publisher		21. Price	

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
I. Ziele	13
I.1. Einleitung und Problemstellung	13
I.2. Aufgabenstellung.....	13
I.2.1. Übergeordnetes Ziel des Projektes	13
I.2.2. Teilziel der Firma TEC4FUELS GmbH.....	14
I.3. Stand der Technik.....	14
I.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
II. Ablauf des Vorhabens	15
III. Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen	16
III.1.1. Prüfstands Konzept und -anpassung	16
III.2. Cluster B.1 Ergebnisse.....	18
III.2.1. Hardware-in-the-Loop Untersuchungen unadditivierte Blends	18
III.2.1.1. Versuchslauf 1: Dieselkraftstoff - Referenz	18
III.2.1.1. Versuchslauf 2: DME	21
III.2.1.1.1. Fazit der Untersuchungen	29
III.3. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises	30
III.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	30
III.5. Verwertung	30
III.6. Erkenntnisse von Dritten.....	30
III.7. Veröffentlichungen	30
IV. Quellenverzeichnis.....	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Projektentwicklung im zeitlichen Ablauf der clusterübergreifenden Projektergebnisse.....	15
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des DMEplusX-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand.....	16
Abbildung 3:	Drucktank des Prüfstandes (links: CAD Modell; rechts: Foto während des Aufbaus	17
Abbildung 4:	Modifikation an der HDP	17
Abbildung 5:	Auszug der Messdaten von Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive; Laufzeit 200 h, 700 bar Raildruck, 230 °C Temperatur _{Injektorspitze} , Systemdruck 12 bar	19
Abbildung 6:	Fotodokumentation HDP Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive.....	19
Abbildung 7:	Fotodokumentation HDP Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive.....	20
Abbildung 8:	Fotodokumentation Injektor Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive.....	20
Abbildung 9:	Fotodokumentation Rail Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive.....	21
Abbildung 10:	Auszug der Messdaten von Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive; Laufzeit 200 h, 700 bar Raildruck, 230 °C Temperatur _{Injektorspitze} , Systemdruck 12 bar	21
Abbildung 11:	Fotodokumentation HDP Versuchslauf 2: reines DME	22
Abbildung 12:	Fotodokumentation HDP Versuchslauf 2: reines DME	22
Abbildung 13:	Fotodokumentation Injektor Versuchslauf 2: reines DME	23
Abbildung 14:	Fotodokumentation Rail und Tank Versuchslauf 2: reines DME....	23
Abbildung 15:	Modifizierter Korrosionstest (links); mitte-links: Stahl-Stift-Platte neu; mitte-rechts: Stahl-Platte im Korrosionstest; rechts: exemplarisch Stahl-Platte nach Versuchsende (26 d, RT).	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tests mit verschiedenen Varianten zur Vermeidung von Kavitation in der HDP. **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 2: Zusammenfassung der durchgeführten Versuche **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 3: Eigenschaften Methanol im Vergleich zu Benzin, Ethanol und Butanol [7,9,10] **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abkürzungsverzeichnis

CoCoS	Complete Commonrail System (Eigenname für einen Gesamtsystemprüfstand nach dem Hardware-in-the-loop Konzept)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DK	Dieselmotorkraftstoff
ENIAK	Projekt der OWI GmbH mit der Langbezeichnung: Entwicklung eines nichtmotorischen Injektor-Verkokungsprüfstandes für alternative Kraftstoffe; FKZ 22000611
FKZ	Förderkennzeichen
HDP	(Kraftstoff-) Hochdruckpumpe
MM	Mannmonate
OEM	Original Equipment Manufacturers (Erstausrüster)
PKW	Personenkraftwagen
V	(hier:) Versuch

I. Ziele

I.1. Einleitung und Problemstellung

Die Auswahl geeigneter effizienter und nachhaltiger Antriebstechnologien für zukünftige Mobilitätsanforderungen ist komplex und wird neben dem Bedarf hinsichtlich Umweltverträglichkeit (CO₂ und Schadstoffe), Sicherheit und Machbarkeit vor allem durch Bezahlbarkeit beim Verbraucher bestimmt. DME zeichnet sich hierbei als attraktive Lösung besonders aus. Zum einen ist die Energiedichte des bei moderatem Druck verflüssigten Kraftstoffs hinreichend hoch und für den Einsatz im Schwerlastverkehr gut geeignet [4]. Zum anderen lassen sich CO₂ (Tank-to-Wheel ~ 10 %; Well-to-Wheel als eFuel > 90 %) und Emissionen gleichermaßen reduzieren [5]. Aufgrund seiner, dem Diesel vergleichbaren, Zünd- und Verbrennungseigenschaften mit signifikant niedriger Rußbildung ist DME, als der bislang neben OME am besten untersuchten Vertreter der Methylethergruppe für Dieselmotoren schon seit Jahren ein Forschungsthema [6]. Die in vorangegangenen Projekten demonstrierte, signifikante Rußminderung erlaubt die Erhöhung des Kompressionsverhältnisses und damit eine Steigerung des thermodynamischen Wirkungsgrades und somit einen reduzierten Kraftstoffverbrauch. Der Einsatz kostenintensiver Abgasnachbehandlungstechnologien kann potenziell auf ein Mindestmaß reduziert werden, was sich auch in niedrigeren Fahrzeugkosten und Kraftstoffverbrauch widerspiegeln wird.

Die Entwicklung eines Retrofit-Ansatzes mit minimalem Aufwand mit Hilfe von DME-Blends ist neuartig und wurde bislang noch nicht detailliert untersucht.

I.2. Aufgabenstellung

I.2.1. Übergeordnetes Ziel des Projektes

Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung und Bewertung geeigneter Blends von DME mit flüssigen fossilen oder erneuerbaren Kraftstoffkomponenten (Paraffinischer Kraftstoff EN15940, RME, UCOME, EN590) für die Anwendung in selbstzündenden Verbrennungsmotoren (PKW, LKW). Mit Hilfe dieses neuartigen Ansatzes können DME-Nachrüstlösungen für Fahrzeuge in der Bestandsflotte besonders kostengünstig dargestellt werden, da sich mit Hilfe der Blends sowohl die Schmiereigenschaften als auch der Energieinhalt signifikant verbessern und potentiell sogar einen Betrieb mit bereits installierten konventionellen Systemkomponenten im Gegensatz zu 100 % DME-Retrofitlösungen ermöglicht. Die Technologie wäre selbst bei Fahrzeugen mit niedrigen Emissionsstandards anwendbar und würden sich somit durch die Einbindung von DME vorteilhaft auf die Schadstoffbildung (rußarme Verbrennung) auswirken. Die zu untersuchenden Kraftstoffgemische lassen sich einerseits vorgemischt betanken (statische Mischung), würden aber auch eine Mischung beider Komponenten vor der Kraftstoffhochdruckpumpe (potentiell dynamisches Blending) erlauben und würden somit bei Beibehaltung der ursprünglichen Dieselsystems sogar einen Flex-Fuel-Betrieb (Diesel oder DME/Diesel) ermöglichen.

Der Einfluss der Verunreinigungen auf Verbrennung und Emissionen wurde noch nicht hinreichend erforscht und sollte deshalb in die Untersuchungen einbezogen werden. Die Erkenntnisse sollen unter anderem auch die bereits laufenden Normungsaktivitäten (DIN 51598) für DME als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren unterstützen.

I.2.2. Teilziel der Firma TEC4FUELS GmbH

Die Aufgabenstellung der TEC4FUELS GmbH innerhalb des DMEplusX Projektes bestand zum Einen in der Entwicklung einer Labormethode um Additiv-Pakete bzgl. der Korrosionsschutzwirkung zu benchmarken. Zum Anderen sollte ein Hardware-in-the-Loop Prüfstand (HiL) zur Testung von Materialverträglichkeiten verschiedener DMEplusX Blend entwickelt, aufgebaut und betrieben werden. Ziel war es, mögliche Anteile von DME in bestandskompatiblen Systemkomponenten zu untersuchen. Beide Arbeitsschwerpunkte waren in Arbeitspaket B1 „Materialverträglichkeit“ aufgehoben. Im Rahmen von B.1.1 wurde die DME Verträglichkeit mit Standard-Systemkomponenten untersucht. Innerhalb B.1.2 lag der Fokus auf der Additivierung der DMEplusX-Blends und der Einfluss auf die Systemverträglichkeit im Hardware in the Loop. Die Auswahl des passenden Additivpakets wurde innerhalb B.1.3 in einem Labor-Korrosionstest durchgeführt.

Das Gesamtsystem sollte alle relevanten Systemkomponenten von Tank, Intankpumpe, Kraftstofffilter, Hochdruckpumpe und Einspritzdüse umfassen. Je nach Anwendungshintergrund und Verträglichkeit können die verschiedenen Parameter wie Zyklen, Temperatur, Druck oder Frequenz eingestellt werden.

I.3. Stand der Technik

Für die Untersuchungen zur Einsatztauglichkeit von Kraftstoffen, aber auch der Motorkomponenten wie Förderpumpen und Injektoren und selbstverständlich auch zur Erforschung von wissenschaftlichen Zusammenhängen ist es von großer Wichtigkeit, eine geeignete Prüfmethode zur Verfügung zu haben. 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 [1]. Aktuell wird die Variante „DW10c“ (CEC-F-110-16), eingesetzt. 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 [2]. Ein weiterer Test ist der XUD9-Test (CEC F-23-01) [3]. Dieser ist kostengünstig, schnell und erprobt, verwendet jedoch einen veralteten Nebenkammerdieselmotor aus den 1990ern. Er ist dennoch nach wie vor verbreitet.

Zertifizierte oder gar genormte Einspritzsystemprüfstände vergleichbar zu dem bei der-TEC4FUELS eingesetzten CoCoS wurde im Rahmen der üblichen Informationsrecherche nicht gefunden. Als Hausmethoden werden bei OEMs und Komponentenherstellern häufig „Hydraulik-Prüfstände“ eingesetzt. Diese dann jedoch selten als Gesamtsystem. Eine

Veröffentlichung zur vollständigen Abbildung inklusive Injektor-Beheizung wurde ebenfalls nicht gefunden.

Die Untersuchungen zur Korrosionsneigung von Kraftstoffen ist ein weit verbreitetes und standardisiertes Verfahren. Für Flüssiggase wurden in der Literaturrecherche keine standardisierten Laborschnelltests zur Prüfung der Wirksamkeit von Additiven identifiziert.

I.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit FRIC und ERC durchgeführt. Neben Additiven und Systemkomponenten wurde ebenfalls Know-How bzgl. Additivchemie oder Systemsteuerung und Betriebsparameter ausgetauscht. Durch die enge Zusammenarbeit und den regen Austausch, auch von Voruntersuchungen, konnten die Prüfungen an der T4F entsprechend der Ergebnisse der Projektpartner angepasst und optimiert werden. Die Entwicklung des Projektes im zeitlichen Ablauf der clusterübergreifenden Projektergebnisse ist in Abbildung 1 dargestellt.

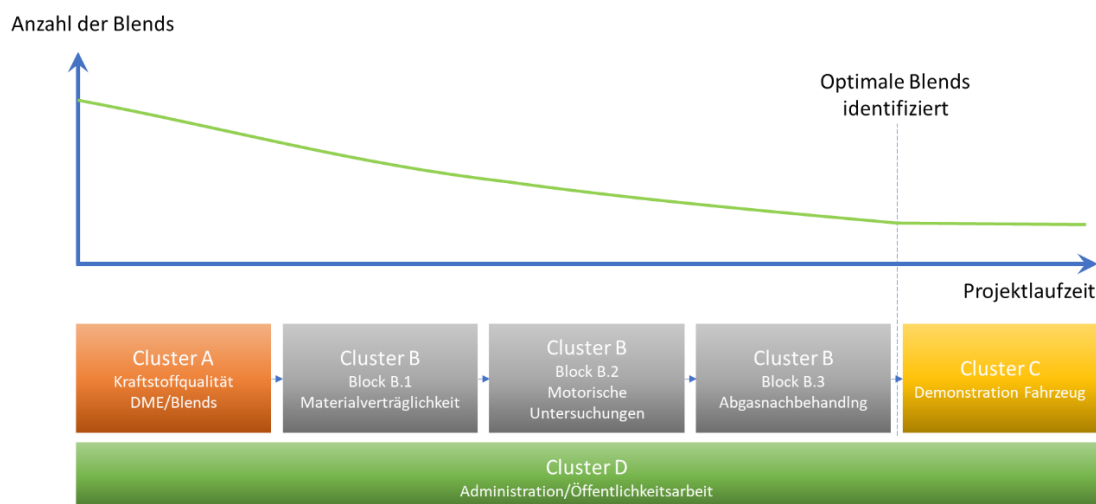


Abbildung 1: Projektentwicklung im zeitlichen Ablauf der clusterübergreifenden Projektergebnisse

II. Ablauf des Vorhabens

Nach der geplanten Beschaffung der Komponenten und der Kraftstoffe wurde der Prüfstand entsprechend der durchgeführten Konzeptionierung entwickelt und aufgebaut. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme wurden verschiedene Blends hergestellt. Die Versuchsmatrix basierte auf den Ergebnissen des Clusters A und der engen Abstimmung mit den Projektpartnern. Neben den Prüfungen am Gesamtsystemprüfstand wurde parallel ein Laborschnelltest zur Untersuchung der Korrosionsneigung von Flüssiggasen und Flüssiggas-Blends entwickelt und aufgebaut. Im Folgenden wurden sowohl verschiedene DME Blends als auch verschiedene Additivkomponenten bzw. -packages untersucht. Das aus den Untersuchungen als Favorit definierte Additiv wurde anschließend in Untersuchungen am Gesamtsystemprüfstand in verschiedenen DMEplusX Blends eingesetzt.

III. Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen

III.1.1. Prüfstands Konzept und -anpassung

Da der Prüfstand von einem Standard-PKW System zu einem Flüssiggas-System umgebaut wurde, war der Einbau eines Drucktanks und Leitungen und Verschraubungen für 30 bar nötig. Darüber hinaus musste die Steuerung erheblich modifiziert werden, u.a. auch wegen der höheren Anzahl an Sicherheitsabfragen im System. Des Weiteren galt es die entsprechenden Einspritzprofile der genutzten Injektoren zu hinterlegen.

Alle Änderungen wurden zu Beginn des Projekts über einen Zeitraum von 6 – 8 Monaten durchgeführt. Aufgrund des anliegenden Systemdrucks, wurde der Wellendichtring der Hochdruckpumpe im Betrieb nach „außen“ gedrückt und undicht. Der Prüfstand musste daher bzgl. der Hochdruckpumpe mit großem Aufwand modifiziert werden. Neben verschiedenen Wellendichtringen, verschiedenen Hochdruckpumpen und Druckvariationen, war die Kombination aus Druckreduktion und Umhausung des Wellendichtrings zielführend. Der Systemdruck konnte dabei auf 12 bar gesenkt werden, ohne dass das DME in den gasförmigen Zustand überging. Kritisch war hier der HDP-Rücklauf in den Tank, da hier hohe Temperaturen erwartet wurden ($\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), jedoch im Betrieb deutlich geringer ausfielen ($\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dadurch konnte der Systemdruck inkl. Sicherheitspuffer signifikant reduziert werden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

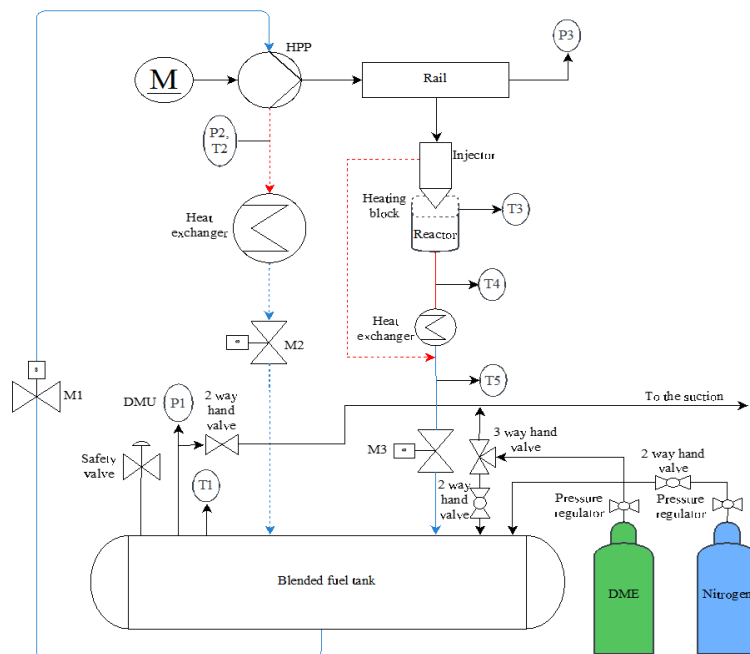


Abbildung 2: Schematische Darstellung des DMEplusX-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand

Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme wurde der Prüfstand unter Stickstoff betrieben. Stickstoff diente des Weiteren zur Einstellung des Systemdrucks. Der Drucktank wurde

eigens konzipiert und auf 45 bar Maximaldruck ausgelegt. Eine CAD Zeichnung und ein Foto des Drucktanks ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Gesamtsystem verfügt zudem über entsprechende Sensorik (Druck, Temperatur), Levelgeber und Überdruckventile mit geführter Abluftleitung.

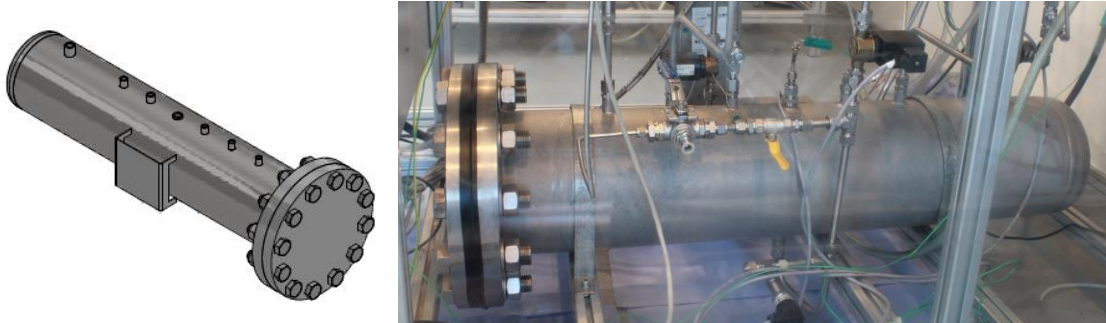


Abbildung 3: Drucktank des Prüfstandes (links: CAD Modell; rechts: Foto während des Aufbaus)

Alle Leitungen des Prüfstandes wurden in druckbeständigen Edelstahl ausgeführt. Die nötige Modifikation an dem Wellendichtring der Hochdruckpumpe ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Modifikation an der HDP

Das Prüfprinzip des Gesamtsystemprüfstandes beruht auf der Kreislaufführung des Kraftstoffes durch die Komponenten des Kraftstoffeinspritzsystems ohne den Kraftstoff zu verbrennen. Der über den Injektor eingedüste Kraftstoffnebel wird innerhalb des Reaktors kondensiert und in den Drucktank zurückgeführt. Dies ermöglicht die Verwendung von unter 30 Litern Kraftstoff und die Rückführung durch die kraftstoffführenden Bauteile. Der durch den weiderholten Kontakt zu den Bauteilen zusätzlich beanspruchte Kraftstoff, beschleunigt mögliche Materialinteraktionen. Um den Einfluss der Verbrennungswärme auf den Injektor nachzubilden, wird die Einspritzdüse zusätzlich auf die erforderliche Temperatur aufgeheizt- Die Prüfzyklen und die Prüfparameter können in Abstimmung mit den Projektpartnern einzeln variiert werden. Auf diese Weise lässt sich die Kompatibilität von Kraftstoffen mit den Bauteilen in kurzen Versuchszeiten ermitteln.

III.2. Cluster B.1 Ergebnisse

Die Aufgaben im Arbeitspaket B wurden in enger Zusammenarbeit mit ASG, Ford und ERC durchgeführt. Die Versuchsmatrix umfasste HiL-Tests von 9 Kraftstoffmischungen sowie 34 Kraftstoffmischungen für die Korrosionstests jeweils in Doppelbestimmung. Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die eingesetzten Kraftstoffe und Additive.

Tabelle 1: Kraftstoffblends für die HiL Untersuchungen

ID	HiL-Tests
1	DK Ref 5 bar
2	DK Ref 12 bar
3	DME
4	DK + 20 % (V/V) DME
5	GtL + 20 % (V/V) DME
6	GtL + 20 % (V/V) UCOME + 20 % (V/V) DME
7	DME + Additive Champion
8	DK + 20 % (V/V) DME + Additive Champion

Tabelle 2: Links: Kraftstoffe für die Korrosionstest; Rechts: Additive für die Korrosionstests

ID	Fuels for Corrosion Tests	ID	Additives for Corrosion Tests
1	DME	1	Additiv 2.1
2	DK	2	Additiv 2.4
3	DK + 20 % (V/V) DME	3	Additiv 00194a
4	UCOME	4	Additiv 00191
5	UCOME + 20 (V/V) DME	5	Additiv 1220
6	RME	6	Additiv 00247
7	RME + 20 (V/V) DME	7	Additiv 1201
8	GtL		
9	GtL + 20 % (V/V) DME		

III.2.1. Hardware-in-the-Loop Untersuchungen unadditivierte Blends

III.2.1.1. Versuchslauf 1: Dieseldieselkraftstoff - Referenz

Innerhalb des ersten Versuchslaufs wurde ein reiner Dieseldieselkraftstoff ohne Performance-Additive als Referenzversuch durchgeführt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch einen Auszug aus der Messdatenaufzeichnung. Es waren keine Auffälligkeiten während der Versuchslaufzeit von 200 h ersichtlich.

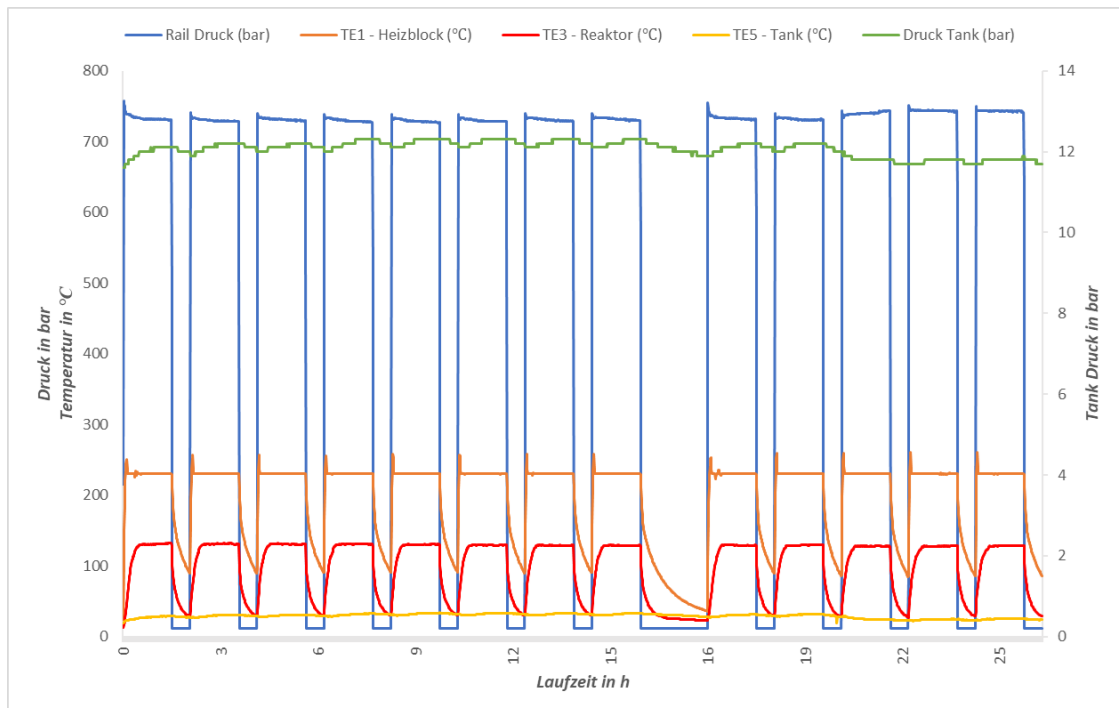


Abbildung 5: Auszug der Messdaten von Versuchslauf 1: Dieselkraftstoff ohne Performance-Additive; Laufzeit 200 h, 700 bar Raildruck, 230 °C Temperatur_{Injektorspitze}, Systemdruck 12 bar

Nach der erfolgten Versuchslaufzeit von 200 h wurden die Systemkomponenten optisch bewertet. In den folgenden Abbildungen ist die Fotodokumentation der einzelnen Komponenten dargestellt. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Hochdruckpumpe (HDP) nach dem Versuchslauf und der Inbetriebnahme des Prüfstands.



Abbildung 6: Fotodokumentation HDP Versuchslauf 1: Dieselkraftstoff ohne Performance-Additive

Es wurden keine signifikanten Auffälligkeiten beobachtet.

Dieselmkraftstoff: Hochdruckpumpe 2



Abbildung 7: Fotodokumentation HDP Versuchslauf 1: Dieselmkraftstoff ohne Performance-Additive

Abbildung 8 zeigt die Fotodokumentation des eingesetzten Injektors nach dem Versuchslauf mit reinem Dieselmkraftstoff ohne Performance-Additive. Aufgrund der thermischen Beanspruchung an der Injektorspitze, sind leichte Verfärbungen zu erkennen. Diese sind jedoch als nicht kritisch einzustufen. Die einzelnen Komponenten des Injektors, vor allem die bewegliche Nadel und das Ventilplättchen zeigen keine Auffälligkeiten.

Dieselmkraftstoff: Injektor



Abbildung 8: Fotodokumentation Injektor Versuchslauf 1: Dieselmkraftstoff ohne Performance-Additive

Abbildung 9 gibt einen Überblick über das eingesetzte Rail nach Versuchsende. Es wurden keine Auffälligkeiten beobachtet.



Abbildung 9: Fotodokumentation Rail Versuchslauf 1: Dieselkraftstoff ohne Performance-Additive

III.2.1.1. Versuchslauf 2: DME

Der zweite Versuchslauf wurde mit reinem DME durchgeführt. Abbildung 10 zeigt exemplarisch einen Auszug aus der Messdatenaufzeichnung. Es waren keine Auffälligkeiten während der Versuchslaufzeit von 200 h ersichtlich.

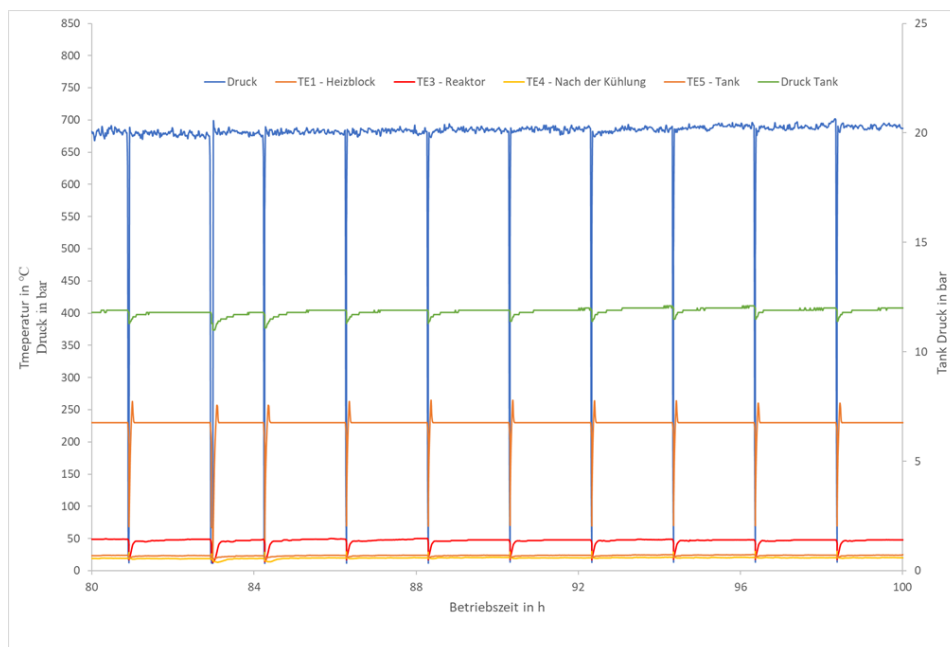


Abbildung 10: Auszug der Messdaten von Versuchslauf 1: Dieselkraftstoff ohne Performance-Additive; Laufzeit 200 h, 700 bar Raildruck, 230 °C Temperatur_{Injektorspitze}, Systemdruck 12 bar

Nach der erfolgten Versuchslaufzeit von 200 h wurden die Systemkomponenten optisch bewertet. In den folgenden Abbildungen ist die Fotodokumentation der einzelnen Komponenten dargestellt. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Hochdruckpumpe (HDP) nach dem Versuchslauf mit reinem DME.

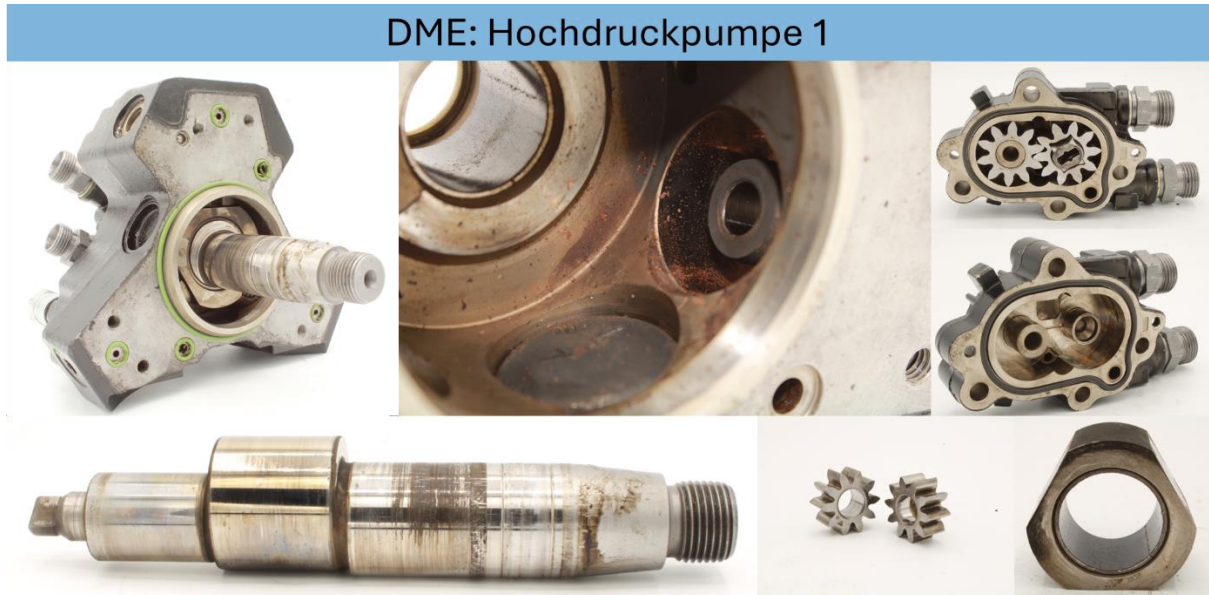


Abbildung 11: Fotodokumentation HDP Versuchslauf 2: reines DME



Abbildung 12: Fotodokumentation HDP Versuchslauf 2: reines DME

Sowohl innerhalb der internen Vordruckpumpe als auch in der HDP wurden deutliche Korrosionseffekte ersichtlich. Während der Laufzeit von 200 h führten die korrosiven Angriffe zu keinem Bauteilausfall oder Druckverlust. Die Materialverträglichkeit ist jedoch auf Dauer nicht ausreichend.

Abbildung 13 zeigt den Injektor nach dem Versuchslauf mit reinem DME. Im Vergleich zum Referenz-Dieselmotorkraftstoff sind deutliche Verfärbungen und Ablagerung auf der Injektornadel, der Feder sowie der Injektor-Spitze zu erkennen. An der Injektorspitze wurden zudem leichte korrosive Erscheinungen beobachtet. Ein Ausfall über die Versuchszeit von 200 h wurde nicht beobachtet.

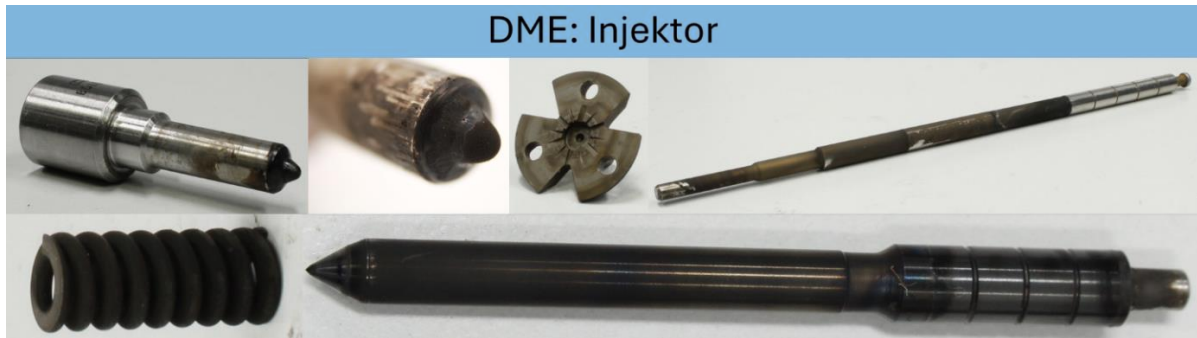


Abbildung 13: Fotodokumentation Injektor Versuchslauf 2: reines DME

Die Fotodokumentation des Rails und des Tanks nach dem Versuchslauf 2 mit reinem DME sind in Abbildung 14 dargestellt. Auffällig war die Beschädigung des Dichtrings des Drucksensors am Rail (Bild oben rechts). Zudem wurden grünliche Rückstände im Rail-Inneren aufgezeigt. Vermutlich stammen diese Rückstände aus den Dichtringen der HDP.



Abbildung 14: Fotodokumentation Rail und Tank Versuchslauf 2: reines DME

Der Tank zeigte eine deutliche Ablagerungsbildung und leichte korrosive Erscheinungen auf (Bild unten rechts). Es wurden keine Ausfälle während 200 h Laufzeit hervorgerufen.

In folgender Tabelle 3 werden die Versuche zusammengefasst.

Es zeigte sich nahezu allen untersuchten Basiskraftstoffen Auffälligkeiten bzgl. Korrosion und/oder Ablagerungsbildung. Keiner der untersuchten Kraftstoffe führte in der Versuchslaufzeit von 200 h zu einem Systemausfall. Es gilt jedoch anzumerken, dass die optischen Auffälligkeiten eine Materialunverträglichkeit in längeren Laufzeiten wahrscheinlich macht. Die Kraftstoffe DK + 20 % DME und GtL + 20 % DME zeigten vor allem einen erhöhten Verschleiß im Vergleich zum Referenzkraftstoff. Die Addition von Biodiesel führte, wie zu erwarten, im Folgenden zu einer Reduzierung der Verschleißerscheinungen.

Tabelle 3: Zusammenfassung der HiL Versuche der Basuskraftstoffe

	DK	DME	DK + 20 % DME	GtL + 20 % DME	GtL + 20 % UCOME + 20 % DME
Laufzeit in h	200	200	200	200	200
Auffälligkeiten	Keine	Druckschwankungen	Keine	Keine	Keine
HDP	Referenz	Verschleiß und Korrosion	Wenig Verschleiß und Korrosion	Wenig Verschleiß und Korrosion	Keine
Injektor	Referenz	Korrosion und Ablagerung	Korrosion am Schaft	Keine	Keine
Tank und Rail	Referenz	Wenig Partikel	Verschleißpartikel	Verschleißpartikel	Wenig Verschleißpartikel
Bewertung					

Zur Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit verschiedener Additivkompositionen wurde ein Stahl-Stift-Korrosionstest für Flüssiggas modifiziert (siehe Abbildung 15). Die Bewertung der korrosiven Angriffe erfolgt dabei in der Wasserphase, der Kraftstoffphase und der Atmosphäre. Neben der optischen Bewertung erfolgt ebenfalls eine gravimetrische Bewertung.

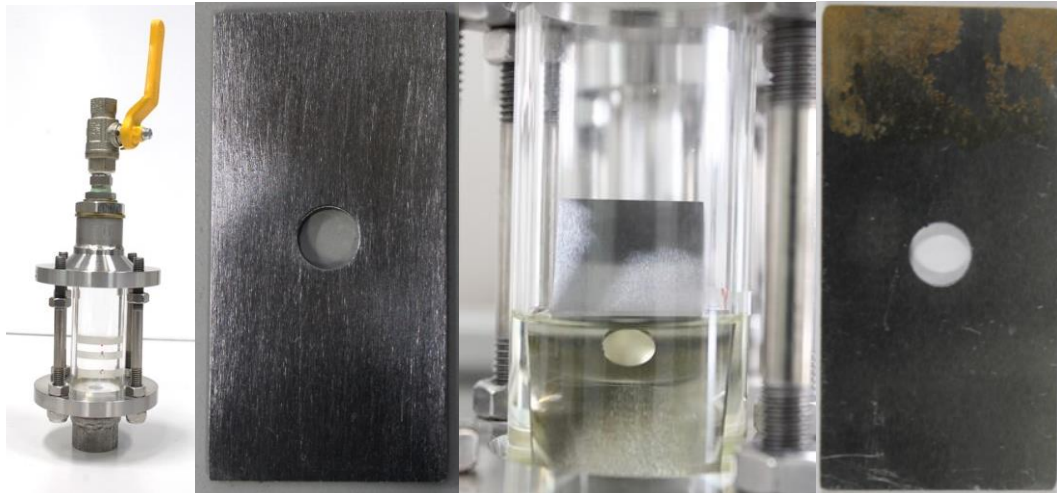


Abbildung 15: Modifizierter Korrosionstest (links); mitte-links: Stahl-Stift-Platte neu; mitte-rechts: Stahl-Platte im Korrosionstest; rechts: exemplarisch Stahl-Platte nach Versuchsende (26 d, RT).

Die Untersuchungen wurden jeweils in Doppelbestimmung durchgeführt. Die eingesetzten Additive via Nummern anonymisiert. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Korrosionstest der Diesel und Diesel-DME Kraftstoffe dargestellt. Sofern die Doppelbestimmung zu unterschiedlichen Ergebnissen führte, sind in der entsprechenden Zelle beide Bewertungen hinterlegt (bspw. DK + 20 % DME + Wasser + Add 2.1 in der Kraftstoffphase – Bewertung Gelb und Grün). Bereits in den Diesel und Diesel-DME Kraftstoffuntersuchungen konnten einige Additive aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden.

Tabelle 4: Übersicht der Korrosionstest der Diesel und Diesel-DME-Kraftstoffe. Schwarz: nicht vorhanden; Rot: deutliche korrosive Effekte; Gelb: einige korrosive Effekte; Grün: Wenig bis keine korrosiven Effekte.

Kraftstoff	Korrosion Wasserphase	Korrosion Kraftstoffphase	Korrosion Atmosphäre
DME			
DK + Wasser			
DK + Wasser+ Add 2.1			
DK + Wasser+ Add 2.4			
DK + Wasser+ Add 00194a			
DK + Wasser+ Add 00191			
DK + 20 % DME			
DK + 20 % DME + Wasser			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 00191			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 00194a			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 2.1			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 2.4			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 1220			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 00247			
DK + 20 % DME + Wasser + Add 1201			

In Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Korrosionstests der übrigen Kraftstoffe zusammengefasst. Aufgrund der Performance einiger Additiv-Packages, konnte die Versuchsmatrix gekürzt werden.

Tabelle 5: Übersicht der Korrosionstest der UCOME und UCOME-DME-Kraftstoffe. Schwarz: nicht vorhanden; Rot: deutliche korrosive Effekte; Gelb: einige korrosive Effekte; Grün: Wenig bis keine korrosiven Effekte.

Kraftstoff	Korrosion Wasserphase	Korrosion Kraftstoffphase	Korrosion Atmosphäre
UCOME + Wasser			
UCOME + 20 % DME + Wasser			
UCOME + 20 % DME + Wasser + Add 00191			
UCOME + 20 % DME + Wasser + Add 00194a			
UCOME + 20 % DME + Wasser + Add 1220			
UCOME + 20 % DME + Wasser + Add 00247			
UCOME + 20 % DME + Wasser + Add 1201			

Tabelle 6: Übersicht der Korrosionstest der RME und RME-DME-Kraftstoffe. Schwarz: nicht vorhanden; Rot: deutliche korrosive Effekte; Gelb: einige korrosive Effekte; Grün: Wenig bis keine korrosiven Effekte.

Kraftstoff	Korrosion Wasserphase	Korrosion Kraftstoffphase	Korrosion Atmosphäre
RME + Wasser	Rot	Grün	Grün
RME + 20 % DME + Wasser	Gelb	Grün	Grün
RME + 20 % DME + Wasser + Add 00191	Grün	Grün	Grün
RME + 20 % DME + Wasser + Add 00194a	Grün	Grün	Grün
RME + 20 % DME + Wasser + Add 1220	Grün	Grün	Grün
RME + 20 % DME + Wasser + Add 00247	Rot	Grün	Grün
RME + 20 % DME + Wasser + Add 1201	Grün	Grün	Grün

Tabelle 7: Übersicht der Korrosionstest der GtL und GtL-DME-Kraftstoffe. Schwarz: nicht vorhanden; Rot: deutliche korrosive Effekte; Gelb: einige korrosive Effekte; Grün: Wenig bis keine korrosiven Effekte.

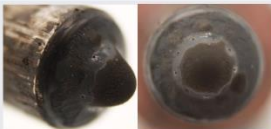
Kraftstoff	Korrosion Wasserphase	Korrosion Kraftstoffphase	Korrosion Atmosphäre
GtL + Wasser	Rot	Grün	Rot
GtL + 20 % DME	Rot	Grün	Grün
GtL + 20 % DME + Wasser	Rot	Grün	Grün
GtL + 20% DME + Wasser + 00191	Rot	Grün	Grün
GtL + 20% DME + Wasser + 00194a	Rot	Grün	Grün

Der modifizierte Korrosionstest war in der Lage, die korrosiven Eigenschaften aus dem Feld im Labor nachzustellen. Entsprechende Feldanlagen sind im Bericht des Projektpartners Ford dargestellt. In den Korrosionstests zeigte sich ein klarer Additiv-Champion mit Additiv 00194a. Für die weiteren HiL Untersuchungen wurde daher das Additiv genutzt und die mögliche Optimierung des Gesamtsystemprüfstandes untersucht. Das Additiv beinhaltet eine aminische und amidische funktionelle Gruppe (hoch polar) und ist in einem Lösemittelgemisch aus Methanol, Ethanol und 2-Ethylhexanol gelöst.

Im Folgenden wurde der Additiv-Champion mit unterschiedlichen Kraftstoffblends im Gesamtsystemprüfstand untersucht. Ziel war die Optimierung des Betriebs im Vergleich zum jeweiligen Referenzkraftstoff.

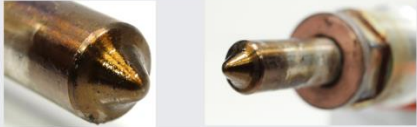
In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der HiL Tests des reinen DME mit und ohne Additiv 00194a zusammengefasst. Im Vergleich zum reinen DME konnte der additivierte Kraftstoff zwar die Korrosion verringern, allerdings führte der Kraftstoff nach 160 h zu einem Systemausfall. Grund waren Verklebungen bzw. ein Festsitzen eines Pumpenkolbens sowie der Injektornadel. Ebenfalls wurden Verschleißpartikel im Drucktank beobachtet.

Tabelle 8: Bewertung der HiL Ergebnisse von DME mit und ohne Additiv

	DME	DME + Additive Champion
Laufzeit in h	200	Ausfall Injektor – kein Durchfluss ~160 h
Auffälligkeiten	Keine	Druckschwankungen // Hohe Drehzahl nötig
HDP		
Injektor		
Tank + Rail		
Bewertung		Nadel und ein Kolben sitzen fest

In der Diesel + 20 % DME Mischung war das Schadensbild nicht eindeutig (siehe Tabelle 9). Im Pumpeninneren zeigte der additivierte Kraftstoff eine leicht höhere korrosive Bauteilbelastung, während der Injektorschacht geringere Korrosionsschäden mit dem additivierten Kraftstoff aufzeigte. Die Verschleißpartikel nahmen im Vergleich zum nicht additivierten Kraftstoff signifikant ab. Insgesamt kann das Additiv hier im Vergleich zum unadditivierten Kraftstoff positiv bewertet werden.

Tabelle 9: Bewertung der HiL Ergebnisse von DK + 20 % DME mit und ohne Additiv

	DK + 20 % DME	DK + 20 % DME + Additive Champion
Laufzeit in h	200	200
Auffälligkeiten	Keine	Keine
HDP		
Injektor		
Tank + Rail		
Bewertung		

In der GtL + 20 % RME + 20 % DME Mischung konnte durch das Additiv die Bildung der Verschleißpartikel im Vergleich zum nicht additivierten Kraftstoff signifikant abnehmen. Insgesamt kann das Additiv hier im Vergleich zum unadditivierten Kraftstoff positiv bewertet werden auch wenn die Korrosionserscheinungen in beiden Testläufen nicht auffällig waren.

Tabelle 10: Bewertung der HiL Ergebnisse von GtL + 20 % RME +s 20 % DME mit und ohne Additiv

	GtL + 20 % RME + 20 % DME	GtL + 20 % RME + 20 % DME + Additive Champion
Laufzeit in h	200 h	200 h
Auffälligkeiten	Keine	Keine
HDP		
Injektor		
Tank+Rail		
Bewertung		

III.2.1.1.1.

Fazit der Untersuchungen

Zusammenfassend wurden die Arbeiten im Forschungsvorhaben erfolgreich durchgeführt. Durch den modifizierten Korrosionstest wurden verschiedene Additive und Additivpakete erfolgreich und schnell gebenchmarkt. Dabei konnte das Laborverfahren die im Feld beobachteten Korrosionserscheinungen nachstellen. Die Neuentwicklung des HiL Verfahrens für Flüssiggas-Anwendungen ermöglichte den Betrieb bei 12 bar Gesamtsystemdruck, so dass DME in allen Systembereichen als flüssiges Medium vorlag. Durch die HiL Test-Serien konnten sowohl die Kraftstoff-Material-Verträglichkeit als auch die Wirksamkeit des Additiv-Champions untersucht werden.

Es zeigte sich, dass der zuvor im Labortest ermittelte Additiv-Champion im Gesamtsystem nicht in allen Kraftstoffen zu verbesserten Betriebsbedingungen führte. In einem Testlauf führte der additivierte Kraftstoff zu einem Systemausfall aufgrund einer festsitzenden Injektornadel und eines blockierten Pumpenkolbens. Vielversprechend war die Additiv Wirksamkeit im GtL-FAME-DME-Blend. Doch auch hier zeigte sich die Notwendigkeit, die Additivformulierungen gezielt auf den jeweiligen Kraftstoff zu entwickeln.

III.3. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind im Erfolgskontrollbericht dargelegt.

III.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten sind im Erfolgskontrollbericht dargelegt.

III.5. Verwertung

Die geplante Verwertung ist im Erfolgskontrollbericht dargelegt.

III.6. Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine wesentlichen Fortschritte auf dem konkreten Gebiet der Untersuchung der Kraftstoff-Material-Interaktion im Gesamtsystem der kraftstoffführenden Bauteile mittels CoCoS (Complete-Commonrail-System) Testung von anderer Stelle bekannt geworden.

III.7. Veröffentlichungen

Es erfolgte zum Projektende eine Pressemitteilung unter dem Titel „Dimethylether als alternativer Kraftstoff“, die am 22. Juni 2023 veröffentlicht wurde¹. Weitere Veröffentlichungen im Rahmen von Tagungen und Konferenzen sind vorgesehen. Zudem wird der Abschlussbericht über die TIB veröffentlicht.

IV. Quellenverzeichnis

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] VOLVO TRUCKS COOPERATION: [HTTP://WWW.VOLVOTRUCKS.COM/TRUCKS/NA/EN-US/PRODUCTS/ALTERNATIVEFUELS/CNG/PAGES/DME.ASPX](http://www.volvotrucks.com/TRUCKS/NA/EN-US/PRODUCTS/ALTERNATIVEFUELS/CNG/PAGES/DME.ASPX)
- [5] XME-DIESEL PROJEKTERGEBNISSE 2019
- [6] WERNER, M.; WACHTMEISTER, G.: STUDIE ZUR VERFÜGBARKEIT VON DIMETHYLETHER (DME) ALS ALTERNATIVER KRAFTSTOFF UND SEINER VERWENDUNG IN VERBRENNUNGSMOTOREN, ABSCHLUSSBERICHT (FVV-VORHABEN 1005), FRANKFURT, 2009