

# **Automatisierte Kraftstoffsysteme für zukünftige Schiffskraftstoffe**

**„FlexiFuel“**

Abschlussbericht der MAN Energy Solutions SE (MAN)

*Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Gefördert durch:

Förderkennzeichen: 03SX473B  
Autoren: M. Brinkmann, M. Mang, C. Kunkel  
Datum: 26.02.2024



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Inhaltsverzeichnis**

<b>I Kurze Darstellung .....</b>	3
1. <b>Einleitung .....</b>	3
2. <b>Aufgabenstellung .....</b>	3
3. <b>Voraussetzungen unter denen das Projekt durchgeführt wurde .....</b>	4
4. <b>Planung und Ablauf .....</b>	4
5. <b>Stand der Technik .....</b>	5
6. <b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	7
<b>II Ausführliche Darstellung .....</b>	8
1. <b>Zielvorgaben vs. Zielerreichungen .....</b>	8
1.1 <b>Ergebnisse aus den Motoruntersuchungen (WP 2) .....</b>	8
1.1.1 <b>Untersuchungen HFO (S&lt;0,5%) am Diesel Marinemotor .....</b>	8
1.1.1.1 <b>Versuchsablauf und Versuchsträger .....</b>	11
1.1.1.2 <b>Versuchsergebnisse .....</b>	11
1.1.1.3 <b>Zusammenfassung der Untersuchungen am Motor (Diesel Marine) .....</b>	13
1.1.2 <b>Untersuchungen Dual Fuel Marinemotor (B100 als Pilotöl) .....</b>	13
1.1.2.1 <b>Versuchsablauf und Versuchsträger .....</b>	14
1.1.2.2 <b>Zusammenfassung der Untersuchungen am Motor (DF) .....</b>	18
2. <b>Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....</b>	18
3. <b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....</b>	18
4. <b>Nutzen und Verwertbarkeit .....</b>	18
5. <b>Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens .....</b>	19
6. <b>Veröffentlichungen .....</b>	19
6.1. <b>Erfolgte Veröffentlichungen .....</b>	19
6.2. <b>Geplante Veröffentlichungen .....</b>	19
<b>III Abbildungsverzeichnis .....</b>	20
<b>IV Tabellenverzeichnis .....</b>	20

## I Kurze Darstellung

### 1. Einleitung

Das Forschungsvorhaben FlexiFuel – Automatisierte Kraftstoffsysteme für zukünftige Schiffskraftstoffe - wurde im Jahre 2018 beantragt und genehmigt. Aufgrund der in der Aufgabenstellung dargelegten und zu dem Antragszeitpunkt vermuteten Befürchtungen wurde ein Antrag auf vorzeitigen Maßnahmenbeginn gestellt und schon bald die ersten Motorversuche mit zwei Kraftstoffen durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die von den Vorhabenspartnern bereitgestellten Kraftstoffe problemlos in dem Versuchsmotor verbrannt werden konnten. Dieses für die internationale Schifffahrt erfreuliche Ergebnis stellte jedoch die weiteren geplanten Versuche in Frage.

Das Auftreten der Covid19-Pandemie in Deutschland ab Januar 2020 hat die geplanten Arbeiten ab diesem Zeitpunkt massiv erschwert. Durch die Unvorhersehbarkeit der Covid19-Pandemie wurde Mitte 2020 vom Konsortium ein Projektaufstockungs- und Verlängerungsantrag skizziert. Für die MAN ES wurde das Projekt kostenneutral verlängert mit der positiven Hoffnung, dass für die im Jahr 2022 geplanten Motorversuche weitere Problemkraftstoffe im Markt auffallen.

Im weiteren Verlauf des Projektfortschrittes ergaben sich keine Hinweise auf das Auftreten von (weiteren) Schlechtkraftstoffen im Schifffahrtssektor. Um die Kapazitäten dennoch sinnvoll einzusetzen zu können, wurde mit dem Mittelgeber vereinbart, stattdessen Versuche mit zwei Biodiesel-Varianten als Pilotfuel an einem DF-Einzyylinder-Versuchsmotor sowie Versuche mit einer Diesel-Methanolmischung durchzuführen. Diese Anpassung geschah in Vorausschau auf zukünftige Umweltauflagen, die die Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz zum Ziel haben. Hier können oben genannte Kombination einen sinnvollen Beitrag leisten. Zudem stand weiterhin die Kraftstoffkompatibilität im Fokus, nun bezogen auf Blends und Drop-In Fuels.

Während die Biodiesel-Pilotversuche am Einzyylinderprüfstand erfolgreich in Augsburg durchgeführt werden konnten, kam es bei den Methanolversuchen zu unvorhersehbaren Problemen. Es kam beispielsweise zu einem Kapitalschaden an der Wasserbremse, welcher nicht mehr rechtzeitig behoben werden konnte, um die geplanten Versuche in dem zur Verfügung stehenden Zeitfenster durchführen zu können. Lediglich Zündversuche (FCA) verschiedener Diesel-Methanolmischungen konnten für diesen Versuchsblock im Labor erfolgreich durchgeführt werden.

### 2. Aufgabenstellung

Im Folgenden wird die Aufgabenstellung zu Beginn des Vorhabens beschrieben.

Ab der Einführung des Kraftstoffschwefel-Grenzwertes von 0,5% in 2020 war am Markt mit einer Vielfalt an verschiedenen Brennstoffen zu rechnen, die als Schifffahrts-Kraftstoffe zum Einsatz kommen werden und nicht mehr den klassischen Schwerölen entsprechen. Die Annahme war, dass diese Vielfalt zu betrieblichen Problemen seitens der Kraftstoffsysteme und der Motoren führen wird. Bereits im Mai 2018 traten in der Gegend um Houston Schäden bei mehr als 100 Schiffen auf, welche auf unzureichende Kraftstoffqualitäten zurückgeführt werden, obwohl viele dieser Kraftstoffe nach Standardtestverfahren der ISO8217:2017 zulässig wären. Es wurde befürchtet, dass dieses Ereignis als Auftakt zu zahlreichen weiteren Ausfällen im Rahmen der Einführung neuer Kraftstoffe ab 2020 zu werten ist.

Ziel des Teilvorhabens ist, die 100%ige Ausfallsicherheit der Diesel- und DualFuel-Motoren (als Schiffshaupt- und Hilfsantriebe) und deren Komponenten gegen wechselnde Kraftstoffqualitäten sicherzustellen. Dazu werden Erkenntnisse gewonnen und Vorentwicklungen getätig, um den Motorbetrieb bezüglich der Standfestigkeit von Motorkomponenten sowie der stabilen Verbrennung durch Anpassung der verbrennungsrelevanten Betriebsparameter sicherzustellen.

Konkreter heißt das, dass bis zum Ende des Teilvorhabens

- Bekannt ist, welche 2020-Kraftstoffe und welche zukünftigen, alternativen Kraftstoffe in Umschaltvorgängen miteinander kombinierbar sind.
- Der Einfluss der Kraftstoffe und ihrer Bestandteile auf die Standzeit von Triebraumkomponenten evaluiert und ggf. Entwicklungsbedarf identifiziert ist.
- Betriebsstrategien für das Kraftstoffsystem und sichere Verbrennung der Kraftstoffe konzipiert sind.
- Eine Liste mit Eingangsgrößen für die Motorsteuerung vorliegt, die aus dem Kraftstoffsystem bezogen werden müssen.

- Die Voraussetzungen für die Implementierung einer kraftstoff-adaptiven Steuerung geschaffen sind.

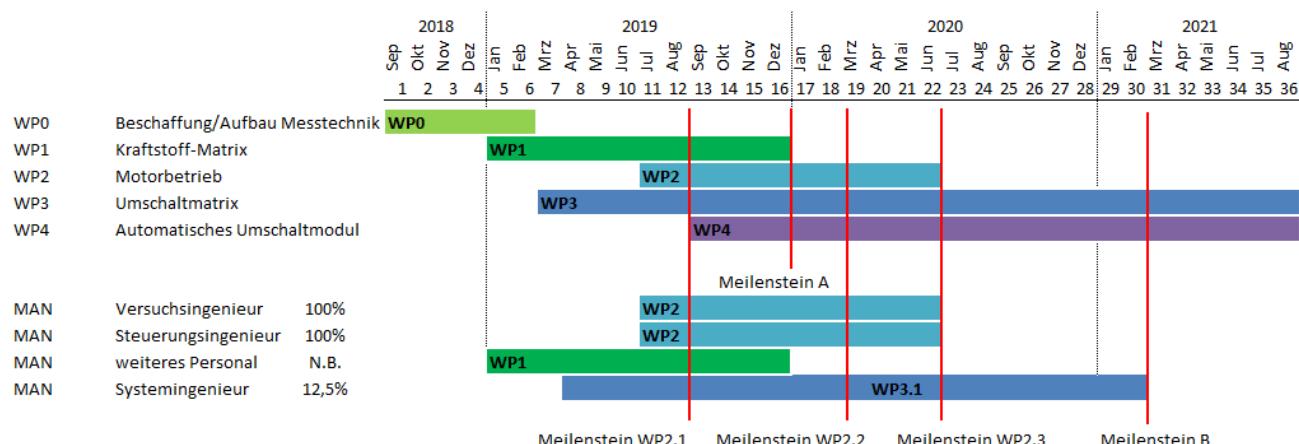
Diese Ziele werden als spezifisch, messbar, anspruchsvoll, realistisch und terminiert erachtet. All das war nach zum Projektstart nicht denkbar und würde einen enormen Vorsprung an Betriebssicherheit gegenüber dem Stand der Technik bedeuten.

### **3. Voraussetzungen unter denen das Projekt durchgeführt wurde**

Der Projektstart erfolgte leicht vorzeitig im Vergleich zum im Antrag kommunizierten Vorhabensbeginn. Die ersten Motorversuche mit zwei Kraftstoffen verliefen erfolgreich. Die Ausbreitung der Covid-19-Pandemie ab Januar 2020 machte jedoch vorerst einen weiteren Projektfortschritt unmöglich. Im weiteren Verlauf kam es zum Ausstieg des projektkoordinierenden Partners, wodurch Arbeitspakete auf andere Partner übertragen werden mussten. Dies führte zu weiteren Verzögerungen. Aufgrund der Nichtverfügbarkeit eines weiteren Schlechtkraftstoffs wurden die Motorversuche auf aussichtsreiche Brennstoffmischungen umgestellt. Leider konnte aufgrund von unvorhersehbaren Prüfstandsausfällen einer dieser Versuche nicht mehr durchgeführt werden.

## 4. Planung und Ablauf

Die Planung stellte sich zum Vorhabenstart wie folgt dar:



Meilenstein A:

WP1 ist abgeschlossen. Die Kraftstoffmatrix wurde erstellt.

In WP2 liegen erste Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe vor.

In WP3 ist die Beschaffung bzw. Fertigung des Modell-Kraftstoffsystems ohne die Mestechnik abgeschlossen.

Meilenstein B:

WP3.1 ist abgeschlossen.

Meilenstein WP2.1

Kraftstoffprobe 1 und 2 abgeschlossen

Meilenstein WP2.2

Kraftstoffproben untersucht. Dauerlauf durchgeführt

Abbildung 1: Planung zu Vorhabensbeginn

Im initialen Plan ist klar der strukturierte Ablauf unter den ursprünglichen Voraussetzungen erkennbar. Nach einer unterstützenden Tätigkeit bei Kraftstoffmatrix und Umschaltmatrix waren alle Motorversuche in Abfolge geplant.

# MAN Energy Solutions

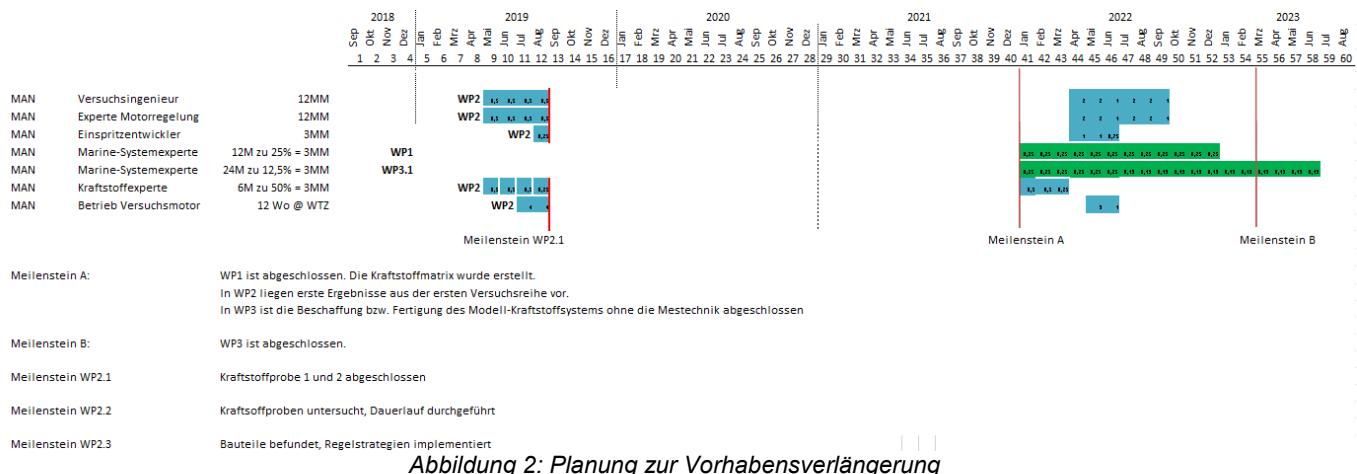


Abbildung 2: Planung zur Vorhabensverlängerung

Die letzte Planung aus dem Verlängerungsantrag zeigt deutlich eine durch Covid-19-Pandemie bedingte Vorhabenpause. Trotz der erhöhten Aufwände durch das Aufteilen und Verschieben von Arbeitspaketen konnte MAN ES die Verlängerung des Vorhabens kostenneutral realisieren. Die Vorhabenpause wurde zusätzlich verlängert durch die notwendigen Umschichtungen der Arbeitspakete aufgrund Wegfall eines Vorhabenspartners. Auch erkennbar in der Planung ist das Aufteilen der im ursprünglichen Plan zusammenhängenden Motorversuche. Schlussendlich wurde das Vorhaben nach diesem Plan zu Ende geführt mit der Einschränkung, dass der Diesel-Methanol-Versuch an der WTZ aufgrund von unvorhergesehenen Schäden am Prüfstand und der eng getakteten Prüfstandplanung nicht mehr durchgeführt werden konnte.

Kleinere Planungsänderungen sowie die Änderung der Motorversuche auf Biodiesel-Dual-Fuel Motoren und Diesel-Methanol-Mischung wurden fortlaufend in den Projekttreffen als auch projektbegleitend mit den Vorhabenspartnern und dem Mittelgeber abgestimmt und die Zustimmung eingeholt.

## 5. Stand der Technik

Die Einführung der strengen Grenzwerte innerhalb der SECA (Sulfur Emission Control Area) hat häufiges und schnelles Umschalten zwischen IFO und MGO zur Folge, woraus zahlreichen Probleme, Ausfälle und Schäden an Kraftstoffsystemen und Motoren resultieren. Die Probleme hängen wesentlich mit chemischen Unverträglichkeiten sowie Temperatur- und Viskositätsunterschieden der verwendeten Kraftstoffe zusammen. Die chemische Unverträglichkeit besteht zum Beispiel im möglichen Ausfall von Kohlenwasserstoffverbindungen (Asphaltenen), die bei Umgebungsbedingungen eine feste bzw. zähe Konsistenz haben und zum Zusetzen von Filtern und Systemkomponenten mit engen Querschnitten, wie beispielsweise Einspritzdüsen, führen können. Es ergeben sich grundsätzlich zwei Ursachen für Probleme: Viskositätsunterschiede und Temperaturunterschiede.

Die erste Ursache hängt mit den unterschiedlichen Viskositäten von Schweröl und MGO bei gleicher Temperatur zusammen. MGO ist bei Umgebungstemperatur recht dünnflüssig, während Schweröle sehr zähflüssig bis fest erscheinen (hohe Viskosität). Bei Erwärmung werden beide Kraftstoffe dünnflüssiger, bei Erkaltung zähflüssiger. Dies geschieht allerdings auf unterschiedlichem Niveau. Diese Tatsache kann dazu führen, dass bei einer hohen Viskosität der zähe Kraftstoff beim Einspritzvorgang keine ausreichende Zerstäubung stattfindet und somit die Verbrennung zu erhöhten Emissionen führen kann. Im ungünstigsten Fall kann der Kraftstoff die Bohrungen in der Einspritzdüse verstopfen.

Im Fall, dass der Kraftstoff eine zu niedrige Viskosität aufweist, hat dies einen Einfluss auf die Schmierfähigkeit, welche essentiell für die Schmierung der beweglichen Teile des Einspritzsystems ist. Im Falle einer zu geringen Schmierfähigkeit kommt es bei aneinander gleitenden Bauteilen durch die entstehende Reibung in kurzer Zeit zu einem erhöhtem Verschleiß bis hin zum „Fresser“ (Reibverschleiß mit anschließender Verschweißung der Komponenten). Zudem führt eine zu niedrige Viskosität zu erhöhten Leckagemengen.

Diese beiden Effekte können auch gleichzeitig auftreten, vor allem bei einem Vermischen der beiden Kraftstoffe.

Die zweite Ursache ist der Temperaturunterschied. Diese hängt mit unterschiedlichen Temperaturen bei gleicher Viskosität zusammen. Bei dieser Problemstellung liegt die thermische Ausdehnung der Komponenten im Fokus. Bei

Erwärmung, bzw. Abkühlung neigen nahezu alle Werkstoffe zur Ausdehnung, bzw. zur Schrumpfung. Dies ist auch der Fall bei den vorkommenden Stahlwerkstoffen. Bei gleichmäßiger Temperaturänderung stellt die Ausdehnung, bzw. Schrumpfung geeigneter Materialpaarungen kein Problem dar, da die Spaltmaße eingehalten werden. Eine Einschränkung stellt die unterschiedliche Geometrie der Bauteile dar, die einen Einfluss auf die Ausdehnung, bzw. Schrumpfung der Bauteile hat. Weitaus kritischer sind schnelle Temperaturänderungen zu betrachten. Auch hier kann es bei verschiedenen Komponenten im Einspritzsystem zu einer Verringerung des Spaltmaßes führen, bis hin zu einem Verklemmen des sich bewegenden Bauteils. Grund dafür ist, dass z.B. eine rasche Abkühlung zunächst an der Oberfläche der Komponenten stattfindet, der warme Kern der Komponente diesem aber entgegensteht. Durch die bei abnehmendem Spaltmaß steigende Reibung entsteht Wärme, welche wiederum zu einem Abfall der Viskosität und damit zu einem Versagen der Schmierfähigkeit führt.

Die beiden oben genannten Ursachen kommen in der Regel gemeinsam vor und haben einen verstärkenden Einfluss aufeinander. Neben den genannten Erscheinungen bzgl. Einspritzung des Kraftstoffes, besteht auch eine Auswirkung auf die Brenncharakteristiken des Kraftstoffes.

Bei den bekannten Kraftstoffarten MGO und Schweröl weist MGO eine höhere Zündwilligkeit, einen schnelleren Abbrand und einen höheren Heizwert auf. Schweröl hingegen ist aufgrund des relativ hohen Aromatenanteiles zündträger und einen geringeren Heizwert. Diese Eigenschaften wirken sich unterschiedlich auf den Brennverlauf (Wärmefreisetzung über Kurbelwinkel) aus. Die Unterschiede können wiederum durch unterschiedliche Einspritzmengen und v.a. durch die Anpassung des Einspritzbeginns kompensiert werden, was vor allem bei elektronisch gesteuerten Motoren möglich ist, wenn die Eigenschaften des momentan eingesetzten Kraftstoffes bekannt sind. Durch sämtliche brennverlaufrelevanten Eigenschaften und den hohen Anteil an Brennstoff-NOx wird zudem die Emission von Stickoxid beeinflusst, so dass auch die Einhaltung der NOx-Grenzwerte durch die unterschiedlichen Kraftstoffarten in Frage steht und ggf. eine Anpassung der Regelung im Katalysator erfolgen muss.

Die Umschaltung zwischen den beiden Kraftstoffen kann grundsätzlich auf zweierlei Arten erfolgen. Eine kostengünstige und von vielen Eignern bevorzugte Art ist eine manuelle Umschaltung von der Besatzung an Bord, die eine spezifizierte und vorgegebene Umschaltprozedur durchzuführen hat. Die zweite Möglichkeit stellt die automatisierte Umschaltung dar. Dabei wird ein Kraftstoffumschaltmodul installiert, das den Vorgang automatisiert ausführt. Wichtig dabei ist, dass ein Temperaturgradient von etwas 2K pro Minute eingehalten wird. Aufgrund der hohen Temperaturunterschiede zwischen Schweröl und MGO ergeben sich hier Umschaltzeiten von ca. 1 Stunde.

Die Beibehaltung manueller Umschaltvorgänge scheint aufgrund der hohen Fehleranfälligkeit sowie den oben genannten Problemstellungen als ausgeschlossen. Die bislang am Markt erhältlichen „Umschaltmodule“ sind auf die Funktionalität beschränkt, die Umschaltventile so zu steuern, dass ein vorgegebener Temperaturgradient nicht überschritten wird. Diese Funktionalität trägt aber nur dem grundsätzlichen Unterschied im Viskositäts-Temperatur-Verhalten zwischen Schweröl und Destillat Rechnung. Sie bietet keine Möglichkeit der Einbeziehung von Kühlern und Separatoren, bezieht keine Lastdaten des Motorbetriebes ein und ist nicht mit der Motorsteuerung verbunden, um die Einspritzparameter den Kraftstoffeigenschaften anzupassen.

Die beschriebenen Schwierigkeiten, die bereits bei der Umschaltung zwischen klassischen Kraftstoffen bestehen, aber erwartungsgemäß durch die zukünftige Kraftstoffvielfalt verstärkt werden, bergen verschiedene Sicherheitsrisiken. Zum einen entstehen durch Schäden an Komponenten des Kraftstoffsystems und des Motors hohe Kosten für Reparaturen und Ersatzteile. Zum anderen führt ein Ausfall der Motorenanlage, besonders bei Einmotorenanlagen, zu einem Verlust der Manövrierfähigkeit des Schiffes und ggf. zu einer folgenschweren Havarie mit Gefahr für den Seeverkehr, die Umwelt und Menschenleben. Es ist damit zu rechnen, dass eine Havarie unter bestimmten Voraussetzungen zu schwerwiegenden Unfällen mit Umweltfolgen führen wird.

In Bezug auf die bisherigen Erläuterungen sind im Stand der Technik zunächst die genannten einfachen Umschaltmodule bekannt. Zusätzlich existiert seitens der MAN ES ein Schutzzanspruch zu einer weiteren Entwicklungsstufe, die sicherstellt, dass diese Umschaltung unabhängig von der aktuellen Motorleistung erfolgen kann, indem überschüssige Rücklaufmengen aus dem Boosterkreis in den Tagestank zurückgeführt werden.

Bereits in den 1980er Jahren wurden Systeme entwickelt, um Schäden an Motoren durch die Analyse von Betriebsdaten des Motors und u.a. Kraftstoffeigenschaften zu vermeiden.

Keines dieser Systeme bzw. Produkte bezieht jedoch die ab 2020 zu erwartenden Kraftstoffe noch die Besonderheiten durch die Umschaltproblematik ein.

Aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft und Technik bieten die im Projekt gewonnen Erkenntnisse und Entwicklungsergebnisse die Möglichkeit, den Funktionsumfang bestehender Umschaltanlagen und die einbezogenen Parameter und Regelgrößen zu erweitern, um die zunehmende Vielfalt an Kraftstoffarten und – qualitäten beherrschen zu können. Dabei werden auch die Voraussetzungen geschaffen, um zukünftige alternative Flüssiggkraftstoffe nutzen zu können, die im Zuge der Energiewende auf den Markt kommen werden. Insbesondere die Erkenntnis der einzubeziehenden Stoffeigenschaften und deren Messbarkeit ermöglicht es, auch beliebige Qualitäten zwischen den heute absehbaren (die durch „Blending“ hergestellt werden) sicher einsetzen zu können.

## **6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen des Projektes fand eine Zusammenarbeit nur mit den im Antrag definierten Partnern statt. Andere externe Stellen wurden seitens MAN ES nicht eingebunden.

## II Ausführliche Darstellung

### 1. Zielvorgaben vs. Zielerreichungen

Im Folgenden soll im Hinblick auf Zielvorgaben und Zielerreichungen näher auf die durchgeführten Motorversuche und die daraus gewonnenen Ergebnisse eingegangen werden.

#### 1.1 Ergebnisse aus den Motoruntersuchungen (WP 2)

Die Untersuchungen gliedern sich in zwei grundsätzlich Untersuchungsblöcke:

1. Untersuchungen der im Projekt (im WP1) festgelegten **HFO-Kraftstoffe (S<0,5%)** an einem **Diesel-Marinemotor**
2. Untersuchungen der im Projekt festgelegten Pilotölkraftstoffe (**B100**) an einem **Dual Fuel Marine Motor**

Der zweite Untersuchungsblock war initial nicht im Projektantrag integriert, sondern wurde in Absprache mit dem PtJ und nachfolgendem Nachtrag festgelegt und anschließend durchgeführt.

##### 1.1.1 Untersuchungen HFO (S<0,5%) am Diesel Marinemotor

Von den im Antrag geplanten drei Kraftstoffen (neben den beiden Vergleichskraftstoffen DMA und Standard HFO mit S<3,5%) konnten nur zwei Kraftstoffe untersucht werden. Grund hierfür ist, dass im Projektzeitrahmen kein Kraftstoff organisiert werden konnte, dessen Untersuchung für das Projektergebnis einen Mehrwert ergeben hätte.

Es wurden mit den folgenden Kraftstoffen Separationsuntersuchungen durchgeführt und anschließend wurden die Kraftstoffe am Versuchsmotor untersucht:

- RMD 80 mit dem Hauptspezifikum hoher Paraffingehalt
- RMG 380 ein repräsentativer HFO Kraftstoff (S<0,5%)

Ergebnis der Separationsuntersuchungen ist, dass die Kraftstoffe eine Empfindlichkeit hinsichtlich höherer Temperaturen aufwiesen. Dies äußert sich in einem Ausfall des enthaltenen Paraffins. Darüber hinaus wurde bei der Separation vom RMG 380 eine vergleichsweise hohe Separationsmenge abgeschieden.



**ASG**  
Analytik-Service  
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH  
Trentiner Ring 30 • 86356 Neuäss • Germany

TU Hamburg  
Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau (M-12)  
Am Schwarzenberg-Campus 4 C  
21073 Hamburg

Ihr Zeichen : Krafft/Henze  
Ihr Auftrag : 2019/182  
Ihr Auftrag vom : 14.10.2019  
Eingegangen am : 15.10.2019  
Probenahme : Kunde  
Prüfbericht vom : 16.10.2019  
Seite : 1 von 1

## Prüfbericht : 2707648-1 Teilergebnisse

Prüfmuster	ASG-ID	Prüfparameter	Methode	Prüfergebnis	Einheit
Kraftstoffprobe 047-2019, RMD80	2707648_001	Kohlenstoffgehalt	ASTM D 5291 :2016	85,0	% (m/m)
		Wasserstoffgehalt		12,0	% (m/m)
		Stickstoffgehalt		<0,5	% (m/m)
		Schwefelgehalt	DIN EN ISO 14596 :2007	0,48	% (m/m)
		Heizwert [Hu,p]	DIN 51900-2 :2003 mod.	42205	J/g
		Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185 :1997	896,6	kg/m³
		Kin. Viskosität (50 °C)	ASTM D 7042 :2016	14,31	mm²/s
		CCAI	DIN ISO 8217 Anh. F :2018	806	-
Kraftstoffprobe 048-2019, RMD80	2707648_002	Rückstellung			

Jürgen Bernath (Technischer Leiter)

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter [www.asg-analytik.de](http://www.asg-analytik.de)

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH  
Trentiner Ring 30  
86356 Neuäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0  
fax +49 (0) 821 486 2519  
e-mail info@asg-analytik.de

General Manager  
Dr. Thomas Wilharm  
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

Abbildung 3: Laborergebnis RMD80



**ASG**  
Analytik-Service  
Gesellschaft

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH  
Trentiner Ring 30 • 86356 Neuäss • Germany

TU Hamburg  
Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau (M-12)  
Am Schwarzenberg-Campus 4 C [R 3.017]  
21073 Hamburg

Ihr Zeichen : Krafft/Berger  
Ihr Auftrag : 4600004516  
Ihr Auftrag vom : 04.09.2019  
Eingegangen am : 11.09.2019  
Probenahme : Kunde  
Beginn der Prüfung(en) : 11.09.2019  
Ende der Prüfung(en) : 25.09.2019  
Prüfbericht vom : 25.09.2019  
Seite : 1 von 1

**Prüfbericht : 2706725-1**

Prüfmuster : Kraftstoffprobe Nr.: 015-2019  
Gebinde : PE/PP - Flasche 1000 ml  
ASG-ID : 2706725\_001

Siegel-Nr. : -

Prüfparameter	Prüfmethode	Prüfergebnis	Einheit
Kohlenstoffgehalt	ASTM D 5291 :2016	<b>87,3</b>	% (m/m)
Wasserstoffgehalt		<b>11,5</b>	% (m/m)
Stickstoffgehalt		<b>&lt;0,5</b>	% (m/m)
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 14596 :2007	<b>5724</b>	mg/kg
Heizwert [Hu,p]	DIN 51900-2 :2003 mod.	<b>41410</b>	J/g
Dichte (15 °C)	DIN EN ISO 12185 :1997	<b>969,0</b>	kg/m³
Kin. Viskosität (50 °C)	ASTM D 7042 :2016	<b>474,2</b>	mm²/s
CCAI	DIN ISO 8217 Anh. F :2018	<b>828</b>	-
Wassergehalt	DIN EN ISO 12937 :2002	<b>199</b>	mg/kg



Jürgen Bernath (Technischer Leiter)

Dieser Prüfbericht bezieht sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfmuster und darf nicht ohne Genehmigung des Prüflaboratoriums auszugsweise vervielfältigt werden. Aufbewahrung der Prüfmuster: 4 Wochen ab Datum des Prüfberichts. Weitere Informationen siehe allg. Geschäftsbedingungen unter [www.asg-analytik.de](http://www.asg-analytik.de).

ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH  
Trentiner Ring 30  
86356 Neuäss • Germany

phone +49 (0) 821 450423-0  
fax +49 (0) 821 486 2519  
e-mail [info@asg-analytik.de](mailto:info@asg-analytik.de)

General Manager:  
Dr. Th. Wilharm, J. Bernath  
Amtsgericht Augsburg HRB 12297

*Abbildung 4: Laborergebnis RMG 380*

## 1.1.1.1 Versuchsablauf und Versuchsträger

Im ersten Schritt wurden mit repräsentativem DMA und repräsentativem HFO ( $S<3,5\%$ ) Basismessungen durchgeführt, um eine Vergleichsbasis für die Kraftstoffuntersuchungen zu generieren. Es wurden sechs unterschiedliche Lastpunkte untersucht: 100%, 85%, 75%, 50%, 25% und 10%. An diesen Lastpunkten wurde jeweils eine Einspritzbeginnvariation unter Beibehaltung der Leistung über Anpassung der Einspritzmenge, aber ansonsten gleichen Randbedingungen und Einstellparametern durchgeführt.

Mit den beiden o.g. Kraftstoffen wurden an den genannten Lastpunkten (Leistung jeweils konstant durch Einspritzmengenanpassung) folgende Untersuchungsreihen durchgeführt und mit der Basismessung verglichen:

- Gleiche Einstellparameter wie mit den Basiskraftstoffen
- Adaption des Einstellparameters Einspritzbeginn mit dem Ziel „gleiche NOx“ wie mit den Basiskraftstoffen
- Adaption des Einstellparameters Einspritzdruck mit dem Ziel „gleiche NOx“ wie mit den Basiskraftstoffen

Ziel der ersten Untersuchungsreihe war es, den Einfluss des Kraftstoffs in der realen Anwendung ohne zusätzlichen Kompensationseingriff im Vergleich zu den Basiskraftstoffen zu detektieren.

Ziel der zweiten und dritten Versuchsreihe war es, ein geeignete Regelstrategie zu entwickeln, die die Kraftstoffeigenschaften und deren Einfluss auf die Verbrennung und auf die Emissionsentstehung kompensiert.

Als Versuchsträger wurde ein MAN-Einzylinder eingesetzt, der mit Serienbauteile des MAN 32/44CR-TS bestückt war (Einspritzsystem CR1.6).

Zylinderanzahl [-]	1
Bohrung [mm]	320
Hub [mm]	440
Leistung Vollast [kW]	640
Nenndrehzahl [1/min]	720

Tabelle 1: Daten Versuchsmotor

## 1.1.1.2 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die repräsentativsten Versuchsergebnisse dargestellt. Repräsentativ sind in diesem Zusammenhang die Lastpunkte bei 100% und bei 25% Last, da diese das Spektrum des Motorbetriebs und den Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf die Verbrennung und das Emissionsverhalten gut abdecken.

### Ergebnisse bei 100% Last:

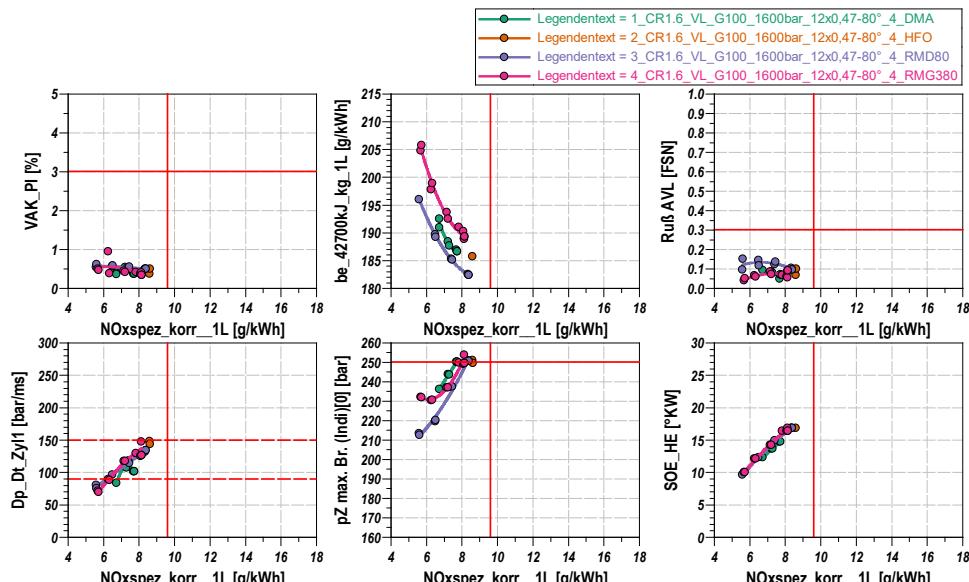


Abbildung 5: Motorergebnisse und Kraftstoffvergleich bei 100% Last

Bei 100% Last zeigen sich bezüglich vieler Motorbetriebswerte nur geringe Unterschiede zwischen den Kraftstoffen.

Die Verbrennungsstabilität (VAK\_PI) und die Druckanstiegsgradienten (Dp\_Dt) sind nahezu gleich.

Beim Ruß bzw. genauer der Filter Smoke Number (Ruß AVL) zeigen sich ebenfalls nur geringe Unterschiede. Der Kraftstoff mit dem im Vergleich hohen Paraffinanteil (RMD80) zeigt eine erhöhte Rußentstehung. Im Vergleichspunkt liegt der Wert etwa auf dem Niveau von Vergleichs-HFO ( $S<3,5\%$ ). Die Unterschiede im einzylinderspezifischen Verbrauch (be\_42700 kJ/kg) und im Zylinderspitzendruck (pZ Max. Br.) erklären sich durch die unterschiedlichen volumetrischen Heizwerte und dadurch, dass die Motorregelung entsprechend der geforderten Motorlast, die Einspritzdauer anpasst. Infolgedessen führen niedrige volumetrische Heizwerte auf Grund der längeren Brenndauer zu einem Verbrauchsanstieg und zu einem geringeren Zylinderspitzendruck.

Entscheidende Erkenntnis aus dieser Versuchsreihe ist, dass die NOx-Emissionen so gut wie nicht durch die Kraftstoffe beeinflusst werden. D.h. eine Anpassung des Einspritzbeginns (SOE\_HE) oder des Einspritzdrucks ist nicht notwendig. Daher entfällt an dieser Stelle die Betrachtung, wie eine geeignete Kompensationsregelung für die Kraftstoffe aussehen könnte, da es in diesem Fall keiner Kompensation bedarf.

## Ergebnisse bei 25% Last:

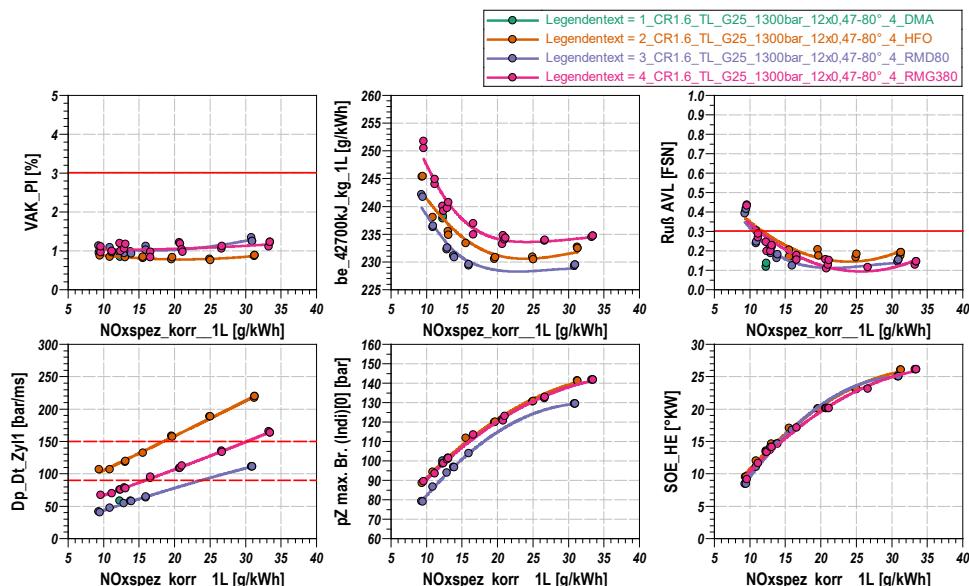


Abbildung 6: Motorergebnisse und Kraftstoffvergleich bei 25% Last

Auch bei 25% Last zeigen sich bezüglich vieler Motorbetriebswerte geringe Unterschiede zwischen den Kraftstoffen.

Maßgebliche Unterschiede bestehen bei den Druckanstiegsgradienten (Dp\_Dt), welche insbesondere bei Niedriglast eine Funktion der Cetanzahl und somit des Zündverzuges sind. Bei niedriger Cetanzahl entsteht durch den längeren Zündverzug ein höhere «premixed peak», welcher sich in einem hohen Druckanstiegsgradienten äußert, welcher sich akustisch als mehr oder weniger lautes «Nageln» äußert. Für die beiden untersuchten Kraftstoffe liegt dieser Wert zwischen dem Referenzkraftstoff DMA und HFO und sind daher als unkritisch zu betrachten.

Bezüglich Ruß (Ruß AVL) zeigen sich ebenfalls vernachlässigbare Unterschiede.

Wie beim 100%-Punkt ergeben sich wieder die gleichen Zusammenhänge bezüglich Verbrauch (be\_42700 kJ/kg\_1L) und Zylinderspitzendruck (pZ Max. Br.)

Ebenfalls wie beim 100% Punkt ist der Einfluss der untersuchten Kraftstoffe auf die NOx-Emissionen vernachlässigbar. Daher entfällt auch an dieser Stelle die Betrachtung, wie eine geeignete Kompensationsregelung für die Kraftstoffe aussehen könnte.

### Befundung der Bauteile:

Eine Befundung der Bauteile hat stattgefunden. Da sich wie oben geschildert die Betriebswerte durch die Kraftstoffe lediglich marginal geändert haben, waren diese Befundungen erwartungsgemäß unauffällig.

#### 1.1.1.3 Zusammenfassung der Untersuchungen am Motor (Diesel Marine)

Die im Projekt gewählten Kraftstoffe waren unkritisch und zeigten wenig Einfluss auf das Motor- und Emissionsverhalten. Infolgedessen war eine Ableitung einer möglichen motorregelungsseitigen Kompensationsstrategie nicht erforderlich. Die Befundung der Komponenten zeigte keine auffälligen Punkte.

#### 1.1.2 Untersuchungen Dual Fuel Marinemotor (B100 als Pilotöl)

Im maritimen Bereich sind Biokraftstoffe und insbesondere Biodiesel zur Netto-CO<sub>2</sub>-Reduktion von Bestandsfлотen ein geeigneter Kraftstoff und werden daher immer wichtiger. Vor diesem Hintergrund und vor dem Hintergrund, dass für die Untersuchungen am Dieselmotor keine geeigneten Schlechtkraftstoffe zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde wie oben erwähnt dieses zusätzliche Arbeitspaket in das Projekt integriert.

In folgendem Diagramm ist eine Siedekurve für unterschiedliche Dieselkraftstoffe dargestellt.

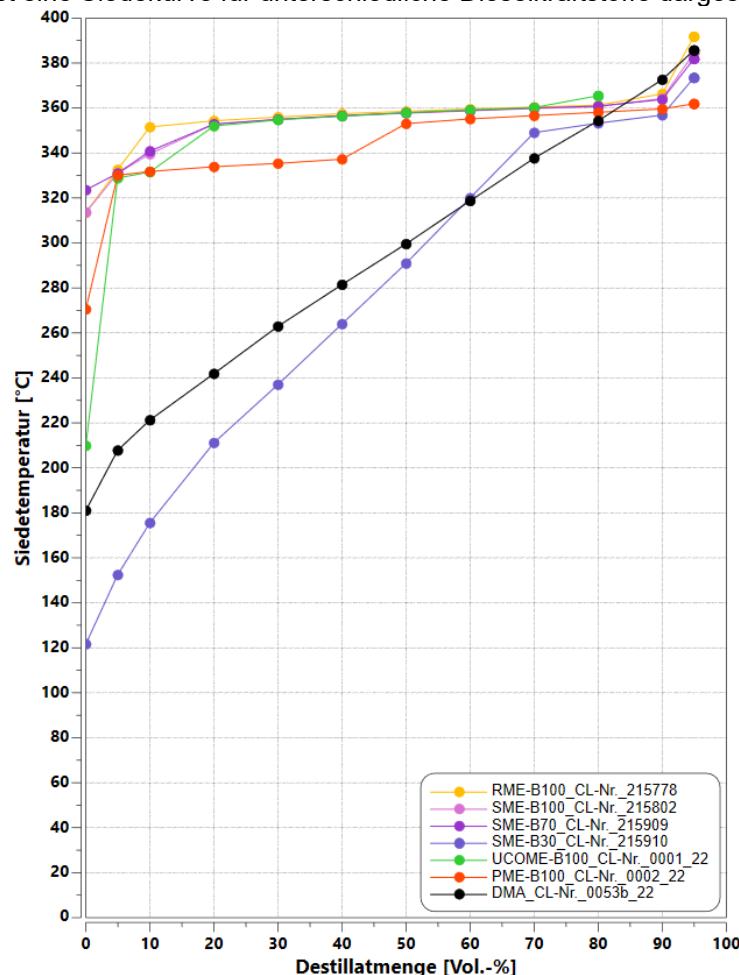


Abbildung 7: Siedeverlaufskurve unterschiedliche Dieselkraftstoffe mit und ohne Bioanteil

Drei Biokraftstoffe in Reinform sind im Diagramm dargestellt. RME (Rapsmethylester), SME (Sojamethylester) und PME (Palmölmethylester). Zum Vergleich ist die Kurve für DMA dargestellt. Darüber hinaus wurde SME mit DMA in den volumetrischen Mischungsverhältnissen 70:30 und 30:70 gemischt und die hier dargestellte Siedekurve ermittelt.

Wie man dem Diagramm unschwer entnehmen kann, weisen alle Biokraftstoffe in Reinform eine nahezu waagrechte Siedekurve auf. D.h. die Verdampfung der Bestandteile beginnt erst ab einer bestimmten Temperatur. Im Bereich

dieser Temperatur kann dann auch die vollständige Verdampfung erfolgen. DMA hingegen weiß durch die vielen unterschiedlichen Bestandteile eine Siedekurve auf, bei der der Siedeanteil sehr stark von der Temperatur abhängt.

Bei Dual Fuel Motoren wird eine kleine Pilotmenge in den Brennraum eingebracht, welche in der Regel nicht direkt zündet, sondern so in den Brennraum eingebracht wird, dass sich diese teilweise mit der Ladung vermischt, mit der Folge einer teilhomogenen Dieselentflammung. Es liegt daher nahe, dass das Verdampfungsverhalten des Pilotkraftstoffes einen Einfluss auf die Verbrennung und Emissionsverhalten eines DF-Motors im Gasbetrieb haben könnte. Die Untersuchung dieses Zusammenhangs stellt im Prinzip die Hauptmotivation für die im Folgenden geschilderten Untersuchungen dar.

#### 1.1.2.1 Versuchsablauf und Versuchsträger

Auf Basis der Werte der Kraftstoffanalysen aus dem Labor wurden zwei Kraftstoffe (RME und PME) für den Versuch ausgewählt.

Im ersten Schritt wurde mit repräsentativem DMA eine Basismessung in Form eines Lastschnitts durchgeführt.

Mit den beiden o.g. Kraftstoffen wurden folgende Untersuchungsreihen durchgeführt und mit der Basismessung verglichen:

- Gleiche Einstellparameter wie mit den Basiskraftstoffen
- Untersuchung unterschiedlicher Adoptionsansätze mit dem Ziel „gleiche NOx“ wie mit den Basiskraftstoffen

Ziel der ersten Untersuchungsreihe war es, den Einfluss des Kraftstoffs ohne Anpassung der Parametereinstellung, also bei gleichen Randbedingungen im Vergleich zu den Basiskraftstoffen zu detektieren.

Ziel der zweiten Versuchsreihe war es, eine geeignete Regelstrategie abzuleiten, bzw. aktuell eingesetzte Regelstrategien zu testen, die es ermöglichen die Kraftstoffeigenschaften und deren Einfluss auf die Verbrennung und die Emissionsentstehung zu kompensieren.

In folgender Übersicht sind die Laborwerte der untersuchten Kraftstoffe tabellarisch dargestellt:

Analysis	Unit	Procedure	DMA	RME-B100	PME-B100
Analysis no. (CL no.)			223749	223881	223880
Sampling point			engine-in	tank	tank
Appearance			yellow	brown	yellow
Density @15°C	kg/m³	EN ISO 12185	836	882	875
Viscosity @40°C	mm²/s	DIN EN 16896	3,8	4,5	4,5
Net calorific value (Hu)	J/g	DIN 51900	43018	37472	37290
ECN <sup>(1)</sup>		IP541	60,3	63,3 <sup>(2)</sup>	74,9 <sup>(3)</sup>
Iodine value	g I₂/100g	EN 14111		111	55
Biofuel content	% (m/m)	factory standard	< 0,5	98,3	>99
CFPP <sup>(4)</sup>	°C	EN 116		-14	+11
Water content	% (m/m)	DIN 51777	< 0,02	0,04	0,04
CHNS Analysis		ASTM D5291			
Carbon	% (m/m)		85,7	76,8	75,9
Hydrogen	% (m/m)		13,9	12,2	12,5
Nitrogen	% (m/m)		< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfur	% (m/m)		< 0,05	< 0,05	< 0,05
Oxygen (calculated)	% (m/m)		11	11,6	

(1) Estimated Cetane Number

(2) Reported values of the cetane number for RME: 44 – 65 [1]

(3) Reported values of the cetane number for PME: 58 – 70 [1]

(4) Cold Filter Plugging Point: Temperature at which fuel will plug a fuel filter

Abbildung 8: untersuchte Kraftstoffe und deren Eigenschaften

Die Werte, welche erfahrungsgemäß auf die Verbrennung und die Emissionsentstehung einen signifikanten Einfluss haben, sind in der Tabelle rot umrandet.

Als Versuchsträger wurde ein MAN-Einzylinder eingesetzt, der mit Serienbauteilen des MAN 35/44DF bestückt war.

Zylinderanzahl [-]	1
Bohrung [mm]	350
Hub [mm]	440
Leistung Vollast [kW]	530
Nenndrehzahl [1/min]	750

Tabelle 2: Daten Versuchsmotor

### Lastschnitt ohne Kompensation:

In folgender Auswertung sind die Motorergebnisse im Lastschnitt ohne Kompensation dargestellt.

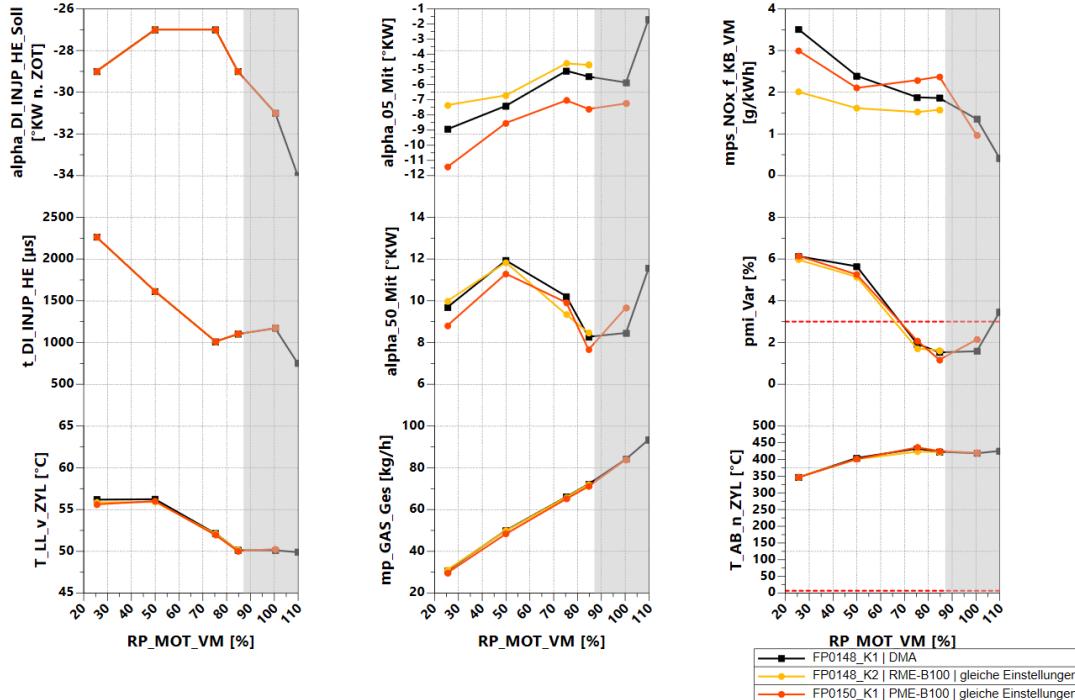


Abbildung 9: Lastschnitt ohne Kompensation

Die Motoreinstellparameter von oben nach unten (Einspritzbeginn Pilotinjektor, Einspritzdauer Pilotinjektor, Ladelufttemperatur) lassen sich in den Diagrammen links ablesen und sind in Abhängigkeit von der Last konstant (keine Kompensation). In den mittleren Diagrammen dargestellt sind die Energiumsatzpunkte, 5%-Umsatz und 50%-Umsatz, sowie darunter dargestellt die verbrauchte Erdgasmenge. Man kann einen deutlichen Einfluss der Kraftstoffe insbesondere auf den frühen Umsatzpunkt von 5% sehen. Hier findet eine Überlagerung von zwei Effekten statt: Auf Grund der geringeren volumetrischen Heizwerte bei gleichen Einstellparametern wird bei den Biokraftstoffen weniger Dieselenergiemenge in den Brennraum eingebracht. Dadurch verschieben sich in der Regel die Umsatzpunkte erfahrungsgemäß nach spät. Dieser Effekt überlagert sich mit dem Cetanzahleffekt. Eine hohe Cetanzahl führt zu einem früheren Verbrennungsbeginn durch geringeren Zündverzug und somit in der Regel zu einem früheren Umsatzpunkt. Diese Überlagerung hat bei PME zur Folge, dass die hohe Cetanzahl den Effekt des geringeren volumetrischen Heizwerts überkompensiert. Infolgedessen liegt der 5%-Umsatzpunkt im Vergleich zu DMA früher.

Bezüglich der NOx-Emissionen (mps\_NOx\_f\_KB\_VM) ergibt sich ein weitgehend unkritisches Bild. Die NOx-Emissionen sind in vielen Punkten auf Grund der geringeren eingebrachten Dieselenergie geringer. Ursächlich hierfür ist, dass die Dieselverbrennung und somit die eingebrachte Dieselmenge überproportional beim

Magerbrennverfahren zu den Stickoxidemissionen beiträgt. Durch die früheren Umsatzpunkte mit PME ergeben sich mit PME einzelne Lastpunkte, die im Vergleich zum Referenzkraftstoff bez. NOx-Emissionen etwas höher liegen.

Verbrennungsstabilität (pmi\_Var) und Abgastemperatur ( $T_{AB\_n\_Zyl}$ ) sind auf vergleichbarem Niveau.

### Lastschnitt mit Kompensation:

Wie in den Untersuchungen ohne Kompensation ersichtlich wurde, besteht bei einzelnen Lastpunkten mit PME die Gefahr, dass sich die NOx-Emissionen zur Vergleichsbasis (DMA als Pilot) in einzelnen Punkten erhöhen. Daher wurden unterschiedliche Kompensationsstrategien untersucht, die im Folgenden dargestellt sind.

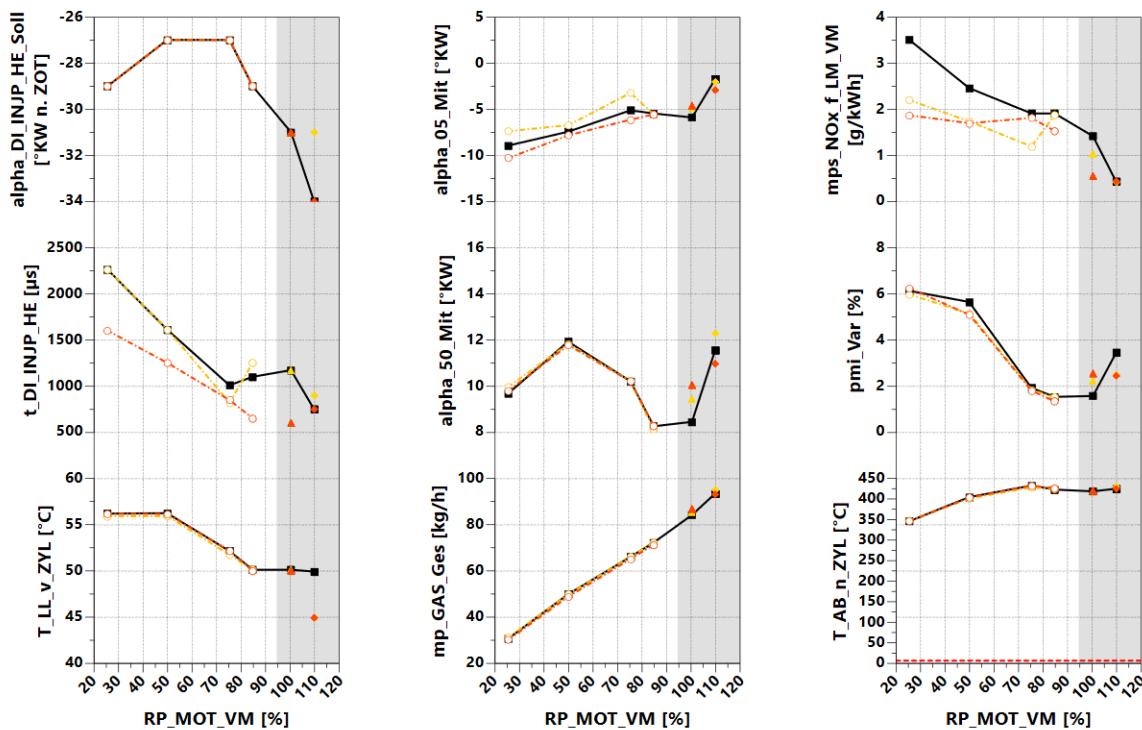


Abbildung 10: Lastschnitt mit Kompensation

Die Untersuchungen zeigen, dass durch eine Einstellung des 50%-Umsatzpunktes ( $\alpha_{50\_Mit}$ ) auf die Werte der Vergleichsbasis mit DMA, die NOx-Emissionen sicher unter denen dieses Vergleichsfall gehalten werden können. Erreicht wird dies durch eine Anpassung der Einspritzdauer, respektive der Piloteinspritzmenge. Diese Kompensationsstrategie wurde in den letzten Jahren bei MAN entwickelt und findet ihren Einzug in die neuesten Produkte und ist somit im höchsten Maße geeignet, die Effekte, welche durch die Eigenschaften von Biodieselkraftstoffen auf die Verbrennung bestehen, zu kompensieren.

### Auffälligkeiten bei hoher Last:

Von Gasmotoren bzw. Ottomotoren ist bekannt, dass bei kritischen Bedingungen im Brennraum, insbesondere bezüglich Druck und Temperatur es zu anomalen Verbrennungen kommen kann. Diese lassen sich wie folgt gliedern:

1. Vorentflammung vor Zündung
2. Überlagerte zusätzliche Entflammung während der Verbrennung

In beiden Fällen gibt es im Brennraum eine zusätzliche Zündquelle, z.B. heißes Bauteil, heißer Partikel, Öltröpfchen oder Radikale im Brennraum. Radikalquellen können ihren Ursprung in verdampftem Schmieröl bzw. Kraftstoff oder Restgas aus der vorangegangen Verbrennung haben. Die Effekte, die nach außen hin sichtbar sind, können von leicht erhöhtem Zünddruck bis hin zur Zerstörung des Brennraums durch zu hohen Druck durch sehr fruhe

Vorentflammung reichen. Kritische Fälle sind in jeden Fall zu vermeiden. Dies wird dadurch erreicht, dass kritische Bedingungen im Brennraum vermieden werden. Beispielsweise kann dies dadurch erfolgen, Kolbenringpakete so abzustimmen, dass diese möglichst wenig Öleintrag in den Brennraum zulassen.

Während der Untersuchungen traten Anomalien auf, welche beim Vergleichsfall mit DMA nicht auftraten. Die Anomalien sind in folgender Darstellung illustriert.

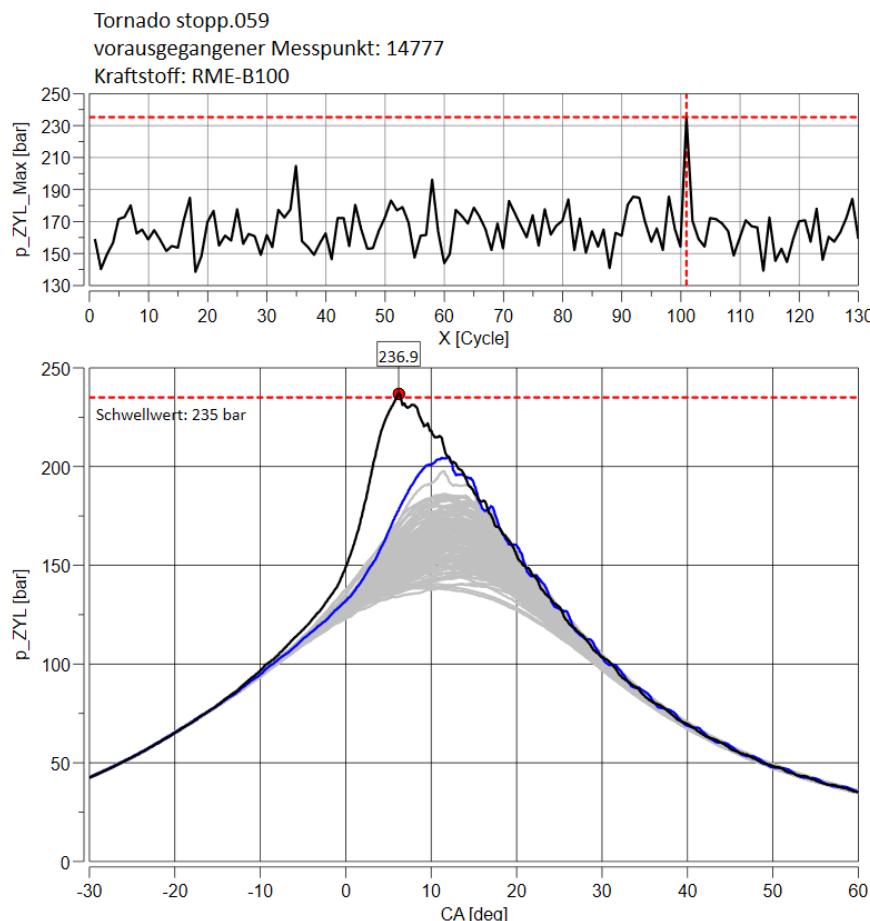


Abbildung 11: Verbrennungsanomalien bei Hochlast mit 100% RME

Zu sehen sind in der Abbildung im obigen Diagramm die für jeden Arbeitszyklus fortlaufenden max. Drücke im Brennraum. Zyklische Schwankungen sind bei einem Ottomotor normal. Nimmt man den rot markierten Zyklus heraus, könnte man von einem normalen Verhalten sprechen. Der rot markierte Zyklus ist anormal und überschreitet darüber hinaus das zulässige Limit bezüglich mechanischem Spitzendrucklimit. Im Diagramm darunter sind die Zyklen überlagert dargestellt. Hier kann man am besten erkennen, dass dieser Zyklus und ggfs. die zwei mit dem nächsthöheren Zylinderdruck nicht in eine klassische Normalverteilung passen, wie sie bei ottomotorischer Verbrennung üblich ist. Dieses Verhalten trat in gleicher Weise beim Kraftstoff PME auf. Wie bereits erwähnt nicht jedoch mit DMA.

Da die Cetanzahl zwischen RME und DMA auf ähnlichem Niveau liegt, ist eine naheliegende Hypothese, dass die Siedekurve (s. Abbildung 7: Siedeverlaufskurve unterschiedliche Dieselkraftstoffe mit und ohne Bioanteil) für dieses Verhalten verantwortlich ist. Dadurch dass die Biokraftstoffe (RME, PME) erst bei höherer Temperaturen verdampfen, ergibt sich eine geänderte Gemischbildung und durch die in Summe spätere Verdampfung möglicherweise eine geänderte Interaktion mit dem Öl im wandnahen Bereich. Dies könnte zu dem beschriebenen sporadischen Phänomen führen. Gegebenenfalls spielt in diesem Zusammenhang auch der höhere Sauerstoffanteil in den Biokraftstoffen eine zusätzliche Rolle.

### 1.1.2.2 Zusammenfassung der Untersuchungen am Motor (DF)

Die im Projekt gewählten Kraftstoffe zeigten einen Einfluss auf das Motor- und Emissionsverhalten im DF-Gasbetrieb. Bezuglich Verbrennung und Emissionen ist der Einfluss nahezu unkritisch. In aller Regel sinken die NOx-Emissionen. Es war lediglich in einzelnen Punkten eine NOx-Erhöhung um maximal 20% zu detektieren, die jedoch mit Hilfe der ermittelten Kompensationsstrategie kompensiert werden konnten. Mit Hilfe der beschriebenen Kompensationsstrategie ist somit dieses Verhalten als gänzlich unkritisch zu bewerten.

Kritischer hingegen sind die sporadischen Verbrennungsanomalien, die vermutlich auf die Siedekurve der Biodieselkraftstoffe zurückzuführen sind.

### 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Fördermittel wurden im Rahmen des Projektes gemäß der Planung verwendet und Abweichungen rechtzeitig und transparent kommuniziert. In der folgenden Übersicht werden die wichtigsten und zahlenmäßig umfangreichsten Positionen des Zahlnachweises näher dargestellt:

Position	Beschreibung	Kosten
1	Motorversuche am WTZ in Roßlau	EUR 156.739,66
2	1L Prüfstandversuche in Augsburg	EUR 89.700,00
3	Personalkosten MAN ES	EUR 144.173,80

Tabelle 3: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des zum Projektstart anstehenden Global Sulfur Caps für Marine Kraftstoffe und der sich andeutenden Lage bzgl. Schlechtkraftstoffen, bzw. Kraftstoffinkompatibilitäten war es zum damaligen Zeitpunkt zwingend erforderlich, dieses Themengebiet näher zu beleuchten, um Grundsteine dafür zu legen, den maritimen Markt vor umfassenden Ausfällen und massiven Problemen für Betreiber, aber auch die Umwelt zu bewahren.

Die sich tatsächlich darstellende Lage hat sich glücklicherweise als deutlich besser erwiesen als ursprünglich angenommen. So kam es aus verschiedenen Gründen nicht zu flächendeckenden Ausfällen, da keine "Schlechtkraftstoffe" in den Markt gelangten.

Diese Geschehnisse haben es ermöglicht, das Projekt um das Thema Drop-In Fuels sowie Biokraftstoffe zu erweitern, mit dem Ziel die Dekarbonisierung des maritimen Sektors voranzutreiben. Die Grundproblematik, nämlich zu erwartende Kraftstoffinkompatibilitäten beim Mischen von unterschiedlichen Kraftstoffen, ist die Gleiche geblieben. In diesem Zusammenhang sind Versuchsreihen durchgeführt worden mit verschiedenen Bio-Kraftstoffen als Piloteinspritzung für Dual-Fuel Motoren und es konnten somit grundlegende Erkenntnisse für potentielle Motorbetriebsoptimierungen in Zusammenhang mit diesen Kraftstoffen gewonnen werden.

Des Weiteren konnten wichtige erste Erkenntnisse für Methanol-Diesel Mischungen am FCA (Fuel Combustion Analyzer) ermittelt werden, was für weiterführende Untersuchungen als Basis dient.

### 4. Nutzen und Verwertbarkeit

Die Versuche, welche zu Beginn des Vorhabens am Marine Dieselmotor mit zwei vermeintlichen Schlechtkraftstoffen durchgeführt wurden, brachten aus den oben beschriebenen Gründen keinen unmittelbaren Nutzen. Hier wurde nachgewiesen, dass die zur Verfügung gestellten Probekraftstoffe ein regelkonformes Brennverhalten aufweisen und ohne Probleme im Motor verbrannt werden können.

Ein anderes Bild zeigen die Motoruntersuchungen am Marine DF-Motor. Diese habe mehrere unmittelbare Nutzen aufgezeigt, welche schon jetzt und auch in Zukunft weiter verwertet werden.

Im Einzelnen sind dies:

- MAN ES hat mittlerweile auf Basis dieser Ergebnisse DMA-FAME Mischungen als Zündöl für ausgewählte Baureihen freigegeben (max. B40). Dies ermöglicht Kunden schon jetzt mit Hilfe dieser Treibstoffmischung ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren und einen Beitrag zur Schonung der Umwelt zu leisten.

- Kompensationsstrategie findet Anwendung in der neuesten Motorregelung. Funktionalität konnte durch dieses Projekt auch für B100 Pilotölkraftstoffe bestätigt werden.  
Es hat sich gezeigt, dass die neueste Motorregelung in der Lage ist, Biodieselzumischungen bis zu einem Anteil von 100% zu steuern. Dies bietet die Chance, in weiteren Entwicklungen ein Zündöl bestehend auf 100% Biodiesel für DF-Motoren freizugeben.
- Verbrennungsanomalien als Risiko für Anwendung mit B100 ist detektiert und muss zukünftig baureihenspezifisch gesondert bewertet werden.  
Die Thematik der Verbrennungsanomalien bei DF-Motoren und Biodiesel-Pilotöl wurde hier erstmal beobachtet und es müssen für alle Baureihen Lösungen gefunden werden, dass diese nicht zu einer Schädigung des Motors führen.

## 5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Die Ergebnisse aus den ersten beiden Motorversuchen haben gezeigt, dass die Befürchtung, mit der Einführung schwefelarmen Kraftstoffes würde es zu Chargen von schlechter Qualität auf dem Weltmarkt kommen, sich nicht bewahrheitet haben. Dies ist als ein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens zu bewerten.

Die stetig steigende Bedeutung von Methanol als zukünftigen Schiffskraftstoff ist insofern als Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens anzusehen, als dass durch die Zumischung von Methanol zu klassischem Dieselkraftstoff die CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessert werden kann. Im Gegensatz zu einem reinen Methanol-Motor könnte Methanol rein technisch bis zu einem bestimmten Prozentsatz zugemischt werden, ohne die Motorkonfiguration in ihrer Hardware ändern zu müssen. Dazu sind lediglich Parameter der Steuerung anzupassen und Regelungsstrategien zu implementieren. Zusätzlich wären sicherheitsrelevante Betrachtungen erforderlich, um einen sicheren Betrieb mit dem Kraftstoff Methanol sicherzustellen. Diese Methanolbeimischungen bieten die Chance als Brückentechnologie den Übergang zu einem langfristigen Betrieb mit CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen (im Gesamtzyklus eines Kraftstoffes gesehen).

## 6. Veröffentlichungen

### 6.1. Erfolgte Veröffentlichungen

Die Arbeitspakete der MAN Energy Solutions beinhalten Motorversuche mit verschiedenen Kraftstoffen, die sowohl im Hause MAN ES als auch bei der WTZ GmbH durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Versuche sind ohne die Ergebnisse der anderen Arbeitspakete nicht veröffentlicht wurdig. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen von Veröffentlichungen den anderen Projektpartnern zugearbeitet.

### 6.2. Geplante Veröffentlichungen

Es sind keine Veröffentlichungen geplant.

**III Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Planung zu Vorhabensbeginn .....	4
Abbildung 2: Planung zur Vorhabensverlängerung .....	5
Abbildung 3: Laborergebnis RMD80 .....	9
Abbildung 4: Laborergebnis RMG 380 .....	10
Abbildung 5: Motorergebnisse und Kraftstoffvergleich bei 100% Last.....	11
Abbildung 6: Motorergebnisse und Kraftstoffvergleich bei 25% Last.....	12
Abbildung 7: Siedeverlaufskurve unterschiedliche Dieselkraftstoffe mit und ohne Bioanteil .....	13
Abbildung 8: untersuchte Kraftstoffe und deren Eigenschaften .....	14
Abbildung 9: Lastschnitt ohne Kompensation .....	15
Abbildung 10: Lastschnitt mit Kompensation.....	16
Abbildung 11: Verbrennungsanomalien bei Hochlast mit 100% RME .....	17

**IV Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Daten Versuchsmotor .....	11
Tabelle 2: Daten Versuchsmotor .....	15
Tabelle 3: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	18