

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

"Methanolstandard" (19I20005C)

Thema

"Untersuchung der technischen Grundlagen zur Standardisierung von
Methanolkraftstoffen in Europa "

von

FEV GmbH
RWTH-Aachen

Projektleiter

Dipl.-Ing. M. Kind; C.K. Kosuru, MSc

31.12.2022

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter den Förderkennzeichen 19I20005A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



METHANOL
STANDARD

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Kurze Darstellung	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
	1.3.1 Arbeitspakete im Einzelnen:	4
	1.3.2 Abweichungen vom Plan	8
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2	Eingehende Darstellung	11
2.1	Erzielte Ergebnisse.....	11
	2.1.1 AP B – Methanol Kraftstoff für Straßentransport (T4F).....	11
	2.1.2 AP C – Methanolnutzung im Motor	18
2.2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	30
2.3	Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens.....	33
2.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	33
3	Anhang.....	34
	Literaturverzeichnis	36

Kurze Darstellung

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Förderprojekt „Methanolstandard - Untersuchung der technischen Grundlagen zur Standardisierung von Methanol-Kraftstoffen in Europa“ wurde im Rahmen der vom BMWK geförderten Fördermaßnahme Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien durchgeführt.

Ziel des Forschungsprojektes war es zu ermitteln, welche technischen Voraussetzungen geschaffen werden müssen um den Einsatz von Methanol als Kraftstoffkomponente in Europa standardisieren zu können. Regeneratives Methanol kann vergleichsweise einfach und innerhalb strenger Qualitätskriterien hergestellt werden und ermöglicht hierdurch einen wesentlichen Beitrag für eine CO₂ neutrale Mobilität. Im Fokus liegt hierbei, neben der direkten Anwendung reinen Methanols in speziell dafür ausgelegten Fahrzeugen, auf Methanol als Drop-In-Fuel (M15) zur Verringerung der CO₂-Emissionen der aktuelle Bestandsflotte.

Das Verbundprojekt Methanolstandard bestand aus neun Partnern aus Industrie und Wissenschaft. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Vertretern der, der Verfahrenstechnik, der Zulieferindustrie, des Fahrzeug- und Motorenbaus sowie der Forschung und Entwicklung spiegelte eine effiziente Sektorkopplung von flüssigen Energieträgern und Mobilität wider.

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Im Rahmen der Übereinkunft von Paris 2016 haben sich mehr als 190 Länder verpflichtet den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Die europäische Union hat in der Folge versucht die daraus resultierenden THG-Minderungsziele in bindende Gesetzgebungen umzusetzen, den Verkehrssektor betrifft zum Beispiel die Renewable Energy Directive II (Richtlinie EU/2018/2001) oder die CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen (Verordnung EU/2019/631). Durch den European Green Deal und dem daraus abgeleiteten Maßnahmenpaket „Fit for 55“ wird das Ambitionsniveau hinsichtlich der THG-Minderung weiter verschärft. Höhere Anteile regenerativer Energieträger wie zum Beispiel elektrischer Strom, fortschrittliche Biokraftstoffe und erstmals Unterquoten für strombasierte erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBO) sind angedacht.

Unter diesem Hinblick sollte im Methanolstandard Projekt die Möglichkeit einer nachhaltigen Mobilität mittels der Nutzung einfach herstellbarer flüssiger Kraftstoffkomponenten wie Methanol evaluiert werden. Die Herstellung und Nutzung strombasierter Kraftstoffe eignet sich als Instrument zur Sektorkopplung sowie als

Kurze Darstellung

Ergänzung zur direkten Stromnutzung, vor allem auch als Option in Märkten mit unzureichender Ladeinfrastruktur bzw. einem Strommix, welcher überwiegend aus fossilen Quellen stammt.

Im Jahr 2020 wurde ein Großprojekt zur Herstellung von klimaneutralem Methanol in Chile sowie der Weiterverarbeitung zu MtG-Kraftstoff angekündigt. Das Konsortium umfasst namhafte Großkonzerne wie ExxonMobil, Siemens Energy und Porsche. Schrittweise soll die jährliche Kapazität der Anlage auf über 550 Millionen Liter synthetischen Ottokraftstoff im Jahre 2026 erhöht werden. Der Baubeginn für Phase 1 ist im Herbst 2021 erfolgt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das vorliegende Forschungsprojekt beinhaltet insgesamt 5 Arbeitspakete, welche über eine angesetzte Projektlaufzeit von 24 Monaten durchgeführt werden sollten. Aufgrund verschiedener Verzögerungen bei allen Projektpartnern aufgrund der COVID-19 Pandemie und anderen äußeren Einflüssen wurde eine Laufzeitverlängerung um 5 Monate beantragt und seitens des Projektträgers genehmigt.

1.3.1 Arbeitspakete im Einzelnen:

Arbeitspaket A: Methanolproduktion und Infrastruktur (FIW)

- AP A1: CO₂ Abspaltung (FIW)
- AP A2: Methanol-Synthese (FIW)
- AP A3: Methanol Produktionsrückstände (FIW)
- AP A4: Kraftstoff Infrastruktur (FIW)
- AP A5: Methanolhandhabung (FIW)

Arbeitspaket B: Methanol Kraftstoff für Straßentransport (T4F)

- AP B1: Kraftstoffzusammensetzung, Materialverträglichkeit und Analytik (OWI, ASG, BMW)
- AP B2: Einfluss Additive (ASG, Liebherr, Ford, BMW, OWI, T4F)
- AP B3: Hardware-in-the-loop (T4F, Liebherr, Ford, BMW, ASG)
- AP B4: Analyse / Methodenentwicklung

Arbeitspaket C: Methanolnutzung im Motor

- AP C1 – Methanol-Motor PKW (RWTH)
- AP C2 – Optimierung Abgasnachbehandlung (RWTH)
- AP C3 – M15 Nutzung im Motor (BMW)
- AP C4 – M100 Prototypen-Motor (Ford, FEV)

Kurze Darstellung

Arbeitspaket D: LCA (FiW)

- AP D1: Untersuchung regenerativer Produktionspfade für Methanol (FiW)
- AP D2: LCA Untersuchung Produktionspfad (FiW)

Arbeitspaket E: Methanol Kraftstoff zur Standardisierung (T4F)

Die Umfänge der BMW AG gliederten sich in sechs Arbeitspakete, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

Arbeitspakete	Arbeitsinhalte
<p>AP B1/B3: Einlagerung von Bauteilen und Grundmaterialien</p>	<p>Im Arbeitspaket B1 wurde die Materialkompatibilität von gängigen Elastomer- und Thermoplastwerkstoffen im Tank-, Leitungs- und Dichtungssystem sowie die Bauteilkompatibilität von kraftstoffführenden Bauteilen gegenüber M15 sowie M100 untersucht.</p> <p>Hierzu wurde eine Werkstoff-/Bauteilmatrix und Anforderungen an die Testbedingungen sowie Werkstoffuntersuchungen erarbeitet. Die Werkstoffmatrix umfasste neunzehn Materialien im Bereich Elastomere (FKM, NBR, ECO, AEM, FVMQ) und Thermoplaste (PE-HD, POM-CoPo, PA12, PA610, PA6-GF30, PA6).</p> <p>Die Auslagerung fand in M100 sowie FAMB als Referenz- und gängiges Absicherungsmedium (entsprechend DIN 51604 und stellvertretend als M15) statt.</p> <p>Die Einlagerung erfolgte bei unterschiedlichen Temperaturen (60 °C Elastomere und Bauteile, 80 °C Thermoplaste) und für unterschiedliche Zeiträume (bis 9 Monate).</p> <p>Pro Bauteil/Werkstoff-Kraftstoff-Paarung wurden zwischen 2 und 10 Bauteile bzw. Probenkörper eingelagert und befundet. Die erforderlichen Werkstoffeigenschaften wurden mittels genormter Testverfahren (Shore-Härte, Zugversuch, Schlagzähigkeit) bestimmt, die Tests ausgewertet</p>

Kurze Darstellung

	<p>und mit einer Referenz ohne Kraftstoffkontakt abgeglichen.</p> <p>Die Bauteilmatrix umspannte die Tankeinbaueinheit mit der In-Tank-Pumpe, Hochdruck- und Niederdruck-Injektoren sowie die Hochdruckpumpe.</p> <p>Überdies wurden zur Untersuchung der dynamischen Belastung des gesamten kraftstoffführenden Systems (vom Tank bis zum Injektor) bei Betrieb mit M100-Kraftstoff im Hardware-in-the-Loop Prinzip (HiL) Bauteile bereitgestellt. Die Teststände bestanden aus dem kompletten Tanksystem mit Druck- und Temperaturregelung. Die Tests beinhalteten 2750 Stunden Laufzeit und periodischen Aufheizphasen.</p> <p>Die eingelagerten sowie betriebenen Bauteile wurden soweit möglich Funktionstests unterzogen sowie optische Befundungen (z.B. hinsichtlich Korrosion) durchgeführt.</p>
<p>C3.1: Motorprüfstand stationär</p>	<p>Im Arbeitspaket C3.1 wurde ein serienmäßiger Reihen-4-Zylinder-Motor von BMW am Motorprüfstand aufgebaut und in Betrieb genommen.</p> <p>Der Brennverlauf konnte durch die Indizierung der Zylinder ermittelt werden. Über Messstellen aus dem Abgastrakt wurden Rohemissionen vor dem Katalysator ermittelt.</p> <p>Die Auswirkungen des M15-Ottokraftstoffblends auf das ottomotorische Brennverfahren und Abweichungen gegenüber einem EU6 E10 und ROZ98 E0 Kraftstoffs wurden untersucht. Das Programm umfasste verschiedene Umfänge bei warmem und kaltem Motor, z.B. Untersuchungen zu Vollast und Klopfneigung, Kennfeldabrasterungen, Lastsprünge, Katalysatorheizen und Variation der internen Abgasrückführung.</p>
<p>C3.2: Fahrzeugprüfstand dynamisch</p>	<p>Für die Untersuchungen im Arbeitspaket C3.2 wurde ein Versuchsträger aus dem BMW-Fuhrpark bereitgestellt. Das Fahrzeug wurde mit Messtechnik ausgerüstet und für die Tests am Abgasrollenprüfstand vorbereitet.</p> <p>Ziel des Arbeitspakets war der Nachweis der Eignung von M15-Kraftstoff zur Nutzung in heute gängiger</p>

Kurze Darstellung

	<p>Fahrzeugtechnologie und eines verbesserten Emissions- und Umweltverhaltens.</p> <p>Hierzu wurden reglementierte und nicht-reglementierte Emissionen (gasförmig / partikulär) im Vergleich zu einem EU6 E10 Kraftstoff und ROZ98 E0 in zwei Prüfzyklen (Zyklus nach WLTP bei -7°C und Zyklus unter RDE-Randbedingungen bei 23°C) ermittelt. Überdies sollte der Einfluss auf Verbrauch und CO₂-Emissionen untersucht werden.</p>
C3.3: Hardware-in-the-Loop mit M15	<p>Zur Untersuchung der dynamischen Belastung des gesamten kraftstoffführenden Systems (vom Tank bis zum Injektor) bei Betrieb mit M15-Kraftstoff wurden Prüfstände im Hardware-in-the-Loop Prinzip (HiL) aufgebaut und mit M15-Kraftstoff betrieben. Die Teststände bestanden aus dem kompletten Tanksystem mit Druck- und Temperaturregelung. Die Tests beinhalteten 2750 Stunden Laufzeit und periodischen Aufheizphasen.</p> <p>Die eingelagerten sowie betriebenen Bauteile wurden soweit möglich Funktionstests unterzogen sowie optische Befundungen (z.B. hinsichtlich Korrosion) durchgeführt.</p>
C3.4: Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse	<p>Hier erfolgte die begleitende Dokumentation, Auswertung und Bewertung von Ergebnissen aus den anderen Arbeitspaketen. Dies umfasste auch die Validierung und Optimierung von Prüfstandtests sowie den Austausch und Diskussion der Ergebnisse mit den Konsortialpartnern.</p>

In Tabelle 1 ist der ursprüngliche Terminplan dargestellt. Ausgehend von der Verfügbarkeit des Methanols kurz nach Projektbeginn sollte anschließend mit den Arbeitspaketen B3 und C3.3 begonnen werden.

Kurze Darstellung

Tabelle 1: Ursprünglicher Termin- und Meilensteinplan

Chancen-/Risikobewertung Methanol	2020				2021			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
▪ Motor-/Fahrzeug- beschaffung und Aufbau								
▪ Testvalidierung				MS				
▪ Testläufe am Motor (Brennverfahren, Applikation)								
▪ Testläufe am Fahrzeug (Emissionen, Kaltstart)								
▪ Hardware-in-the-Loop (Ottokraftstofftechnologie)		MS		MS				
▪ Befundung und Bewertung								

Die Abweichungen von dieser ursprünglichen Zeitskizze werden im Folgenden näher erläutert.

1.3.2 Abweichungen vom Plan

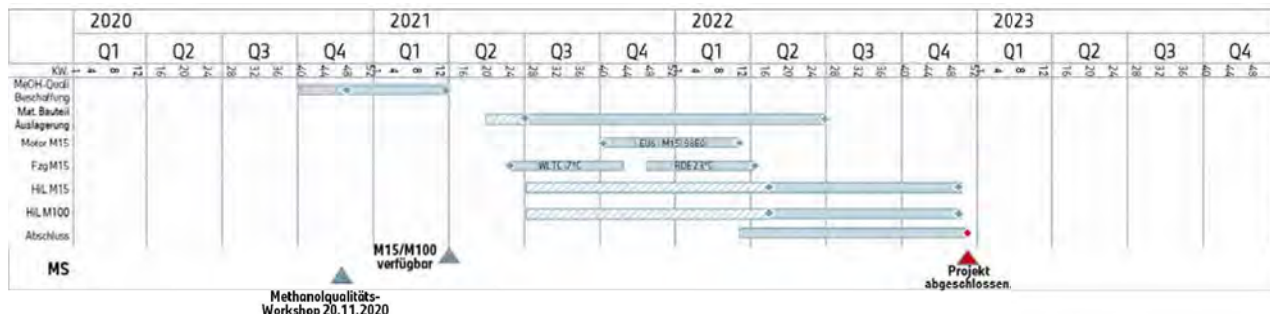
Im Projektverlauf gab es die folgenden signifikanten Änderungen im Zeitplan:

- Diskussion und Festlegung des Qualitätsstandards des zu verwendenden Methanols wurde zugunsten der einheitlichen Aussagekraft des Projekts intensiviert. Somit stand eine gemeinsame Betriebsmittelspezifikation zu Beginn 2021 zur Verfügung.
- Der Ausbruch der Corona-Pandemie Anfang 2020 führte punktuell zu Verzögerungen aufgrund der begleitenden Kapazitätseinschränkungen. Die Projektlaufzeit im gesamten Konsortium wurde deshalb kostenneutral um fünf Monate verlängert.

Der Großteil der Umfänge, v.a. in den Arbeitspaketen C3.1 und C3.2, konzentrierte sich daher auf die zweite Jahreshälfte 2021 bzw. auf 2022. Die Abweichung vom ursprünglichen Zeitplan hatte keine Auswirkungen auf die Zielerreichung. Das gesamte Arbeitspaket C3 wurde zum 31.12.2022 erfolgreich abgeschlossen.

Kurze Darstellung

Tabelle 2: Terminplan unter Berücksichtigung der oben genannten Abweichungen



Der Zwischenstand im Arbeitspaket C3 wurde in den regelmäßig durchgeführten Projekttreffen allen Projektpartnern vorgestellt und in den halbjährlichen Zwischenberichten schriftlich festgehalten.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Die aktuell gültige Kraftstoffnorm in Europa (DIN EN 228) erlaubt lediglich die Beimengung von max. 3%v/v Methanol zu Ottokraftstoff. Einige internationale Märkte fokussieren sich auf die Herstellung des Methanols aus fossilen Quellen (Kohle, Erdgas), aber ein Hauptvorteil des Methanols als Kraftstoffkomponente besteht in seiner vergleichsweise einfachen, regenerativen Herstellungsweise als eFuel (aus Kohlenstoffdioxid und regenerativem Strom) oder aber aus Biomasse bzw. Reststoffen. Die BMW AG konnte an Erfahrungen auf dem Bereich Kraftstoffqualität und Kraftstoff-Emissions-Wechselwirkungen anknüpfen und aufbauen. Dies war insbesondere bei der Diskussion der angestrebten Kraftstoffqualität des zu verwendenden M15-Kraftstoffs hilfreich. Zur besseren Evaluation der Kraftstoffqualität wurden geltende Spezifikationen für M15 Kraftstoffe anderer Länder herangezogen (z.B. chin. Norm DB13/ T 1303-2017).

In mehreren (Kern-)Märkten der BMW AG sind Ottokraftstoffqualitäten mit erhöhten Methanolanteilen verfügbar, beispielsweise in China (lokale M15, M30 und M85 Grades) und Indien bzw. wurden dort bereits Spezifikationen für Methanolblends offiziell vorgegeben. Unter Berücksichtigung der anvisierten THG-Minderungsziele und der damit verbundenen Erhöhung von regenerativen Anteilen im Kraftstoff, oft in Form von Bioethanol, könnte auch grünes Methanol eine wichtige Rolle übernehmen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des durchgeführten Vorhabens gab es in allen Teilaufgaben und Arbeitspaketen eine enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern. Insbesondere innerhalb des Arbeitspakets B2 und C3 gab es einen regelmäßigen Austausch zwischen der BMW AG, dem OWI als An-Institut der RWTH Aachen, der TEC4FUELS GmbH und dem Konsortialführer FEV

Kurze Darstellung

Europe GmbH. Hierbei wurden unter anderem Untersuchungsschwerpunkte definiert sowie Projektfortschritt und Ergebnisse diskutiert.

Die Projektarbeit wurde von den beteiligten Fachstellen der BMW AG unter Einbindung der folgenden wichtigen Entwicklungspartner (KMU) erledigt:

- ASG Analytik-Service AG: Unterstützung Analytik (AP C3.1 & C3.2)
- Freyberger engineering GmbH: generelle Unterstützung im Projektmanagement und der Koordination von BMW-Fachstellen sowie bei der Auswertung/Bewertung von Tests (AP C3)
- ISP Salzbergen GmbH & Co. KG: Durchführung Tests an Motor- und Fahrzeugprüfständen (AP C3.1 und C3.2)
- OWI gGmbH: Durchführung der Einlagerungen von Werkstoffen und Bauteilen (AP B1 & B3)
- TEC4FUELS GmbH: Aufbau und Durchführung der Hardware-in-the-Loop Tests (AP C3.3)

Sonstige Forschungsinstitute und Universitäten außerhalb des Konsortiums wurden nicht eingebunden.

Eingehende Darstellung

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 AP B – Methanol Kraftstoff für Straßentransport (T4F)

2.1.1.1 AP B1 & B3 Werkstoff- und Bauteilkompatibilität

Im Arbeitspaket B1 & B3 wurde die Materialkompatibilität von gängigen Elastomer- und Thermoplast-Werkstoffen im Tank-, Leitungs- und Dichtungssystem sowie die Bauteilkompatibilität von kraftstoffführenden Bauteilen gegenüber M100 sowie M15-Ottokraftstoffmischungen untersucht. Dies sollte der Befähigung von Werkstoffen und Bauteilen für neuartige Kraftstoffe dienen. Hierzu wurde eine Werkstoff-/Bauteilmatrix und Anforderungen an die Testbedingungen sowie Werkstoffuntersuchungen erarbeitet.

Genormte Werkstoff-Prüfkörper wurden entsprechend der VDA 266-100 in den Kraftstoffen über zwei Intervalle bei erhöhten Temperaturen eingelagert und charakteristische mechanische Eigenschaften vor und nach Einlagerung bestimmt. Als Referenz diente jeweils die Lagerung gegen Luft bei gleichen Temperaturbedingungen.

In Tabelle 3 sind die Kraftstoff-/Werkstoff-/Bauteil-Matrix sowie Einlagerungsbedingungen (Dauer, Temperaturen) für die Kompatibilitätsuntersuchungen aufgeführt.

Tabelle 3: Bedingungen für Untersuchungen zur Kraftstoffkompatibilität

Kraftstoff	Umfänge / Bedingungen
FAM B (M15)	<p style="text-align: center;">Werkstoffe</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elastomere (168h bzw. 500h / 1000h bei 60 °C) • Thermoplaste (1000h / 3000h bei 80 °C) <p style="text-align: center;">Bauteile (5M* / 9M* bei 60 °C)</p>
Methanol (M100)	

* 5M = 5 Monate, 9M = 9 Monate

Pro Werkstoff/ Bauteil-Kraftstoff-Paarung wurden je Intervall und Kraftstoff mehrere Probenkörper bzw. Bauteile eingelagert und befundet. Die erforderlichen Werkstoffeigenschaften wurden mittels genormter Testverfahren (Shore-Härte / DIN ISO 7619-1, Zugeigenschaften / DIN EN ISO 527, Schlagzähigkeit / DIN EN ISO 179) bestimmt, die Tests ausgewertet und mit Referenzmessungen ohne Kraftstoffkontakt abgeglichen.

Die Werkstoffmatrix umfasste dreizehn Materialien verschiedener Hersteller im Bereich Elastomere (FKM, NBR, ECO, FMQ) und sechs Thermoplaste (POM-CoPo, PA12, PA610, PA6-GF30, PE-HD). Nähere Informationen sind aus dem Anhang zu entnehmen.

Eingehende Darstellung

In den Abbildungen 1 bis 3 sind die prozentualen Abweichungen der Zugfestigkeit über die jeweiligen Einlagerungsintervallen gegenüber Referenzmessungen ohne Einlagerung dargestellt.

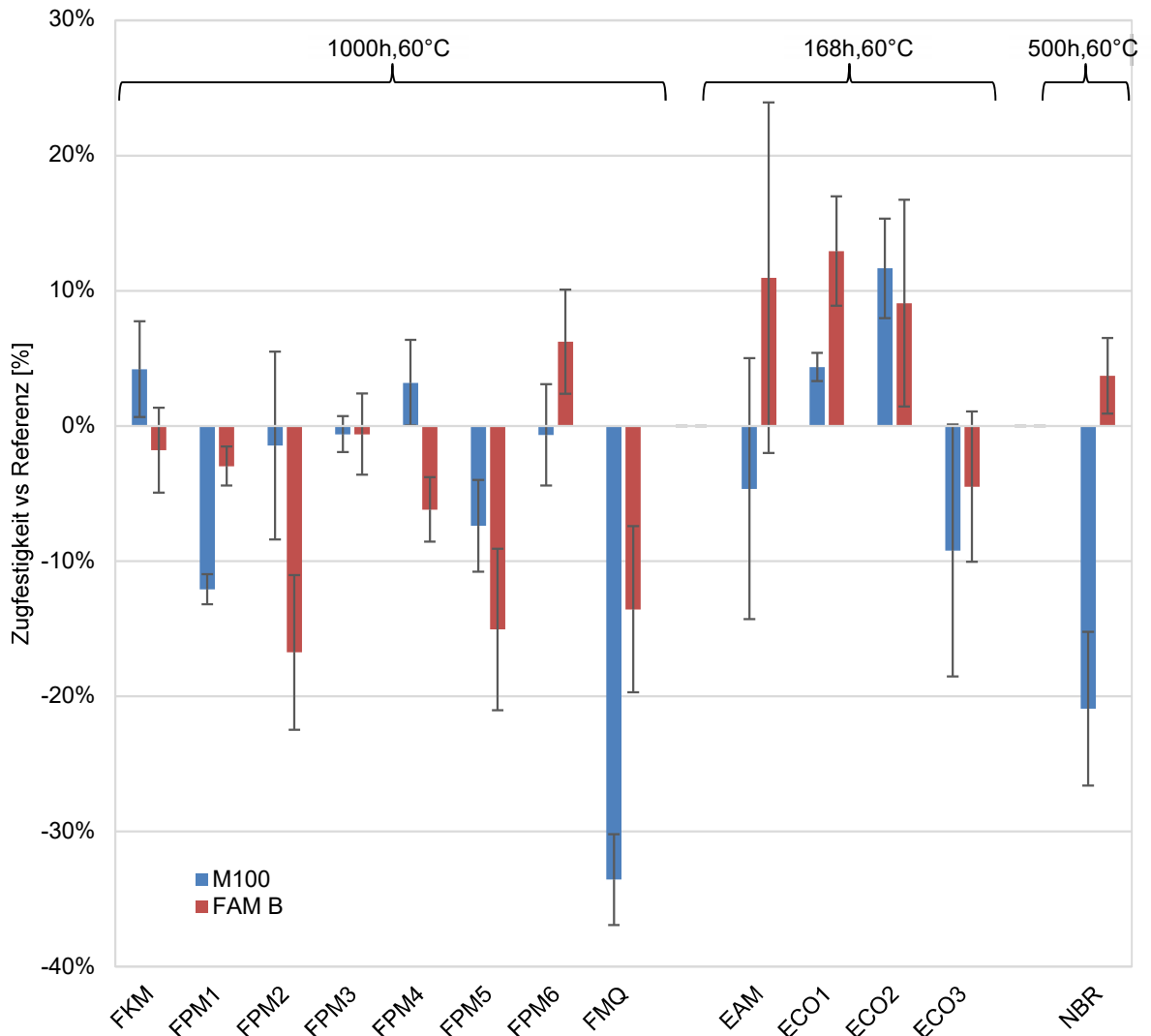


Abbildung 1: Änderung Zugfestigkeit Elastomere vs. Referenz nach bis zu 1000h (60°C)

Innerhalb der Elastomer-Werkstoffe kommt es durch die Kraftstoffexposition zu einer Quellung der Probenkörper und weitestgehend zu einer Abnahme der Zugfestigkeit. Jedoch wird die als kritisch definierte Grenze von 50 Prozent der Zugfestigkeit nach 1000h unter erhöhter Temperatur mit keiner Werkstoff-Kraftstoff-Paarung unterschritten. Jedoch sollte bei der Verwendung von FMQ berücksichtigt werden, dass die Zugfestigkeit bereits nach 1000h um über 30% abnahm. Über die typische Gesamtlaufdauer eines Fahrzeugs von 5000h könnte es hierbei zur Unterschreitung der kritischen Grenze kommen. Der Werkstoff NBR sowie die meisten EAM und ECO-Probenkörper zeigen bei Exposition mit M15- (FAM B) aber auch M100-

Eingehende Darstellung

Kraftstoffen eine Zunahme der Shore-Härte, was auf eine Versprödung des Werkstoffs hinweist. Diesem Verhalten müsste gegebenenfalls Rechnung getragen werden bei der Werkstoffauswahl. Anwendungen mit solchen Kraftstoffen könnten trotzdem mit geringfügiger Kraftstoffexposition (z.B. als Tankdeckeldichtung) möglich sein.

Die Thermoplast-Werkstoffe wiesen ebenso eine Abnahme der Zugfestigkeit auf. Diese lag teilweise (PA12) außerhalb der als kritisch definierten Grenze von 50 Prozent der Zugfestigkeit nach bereits 3000h unter erhöhter Temperatur für das Absicherungsmedium FAM B. Innerhalb der genormten Messmethode für die Zugfestigkeit konnten keine Werte für die Materialien PA6 und PA610 ermittelt werden.

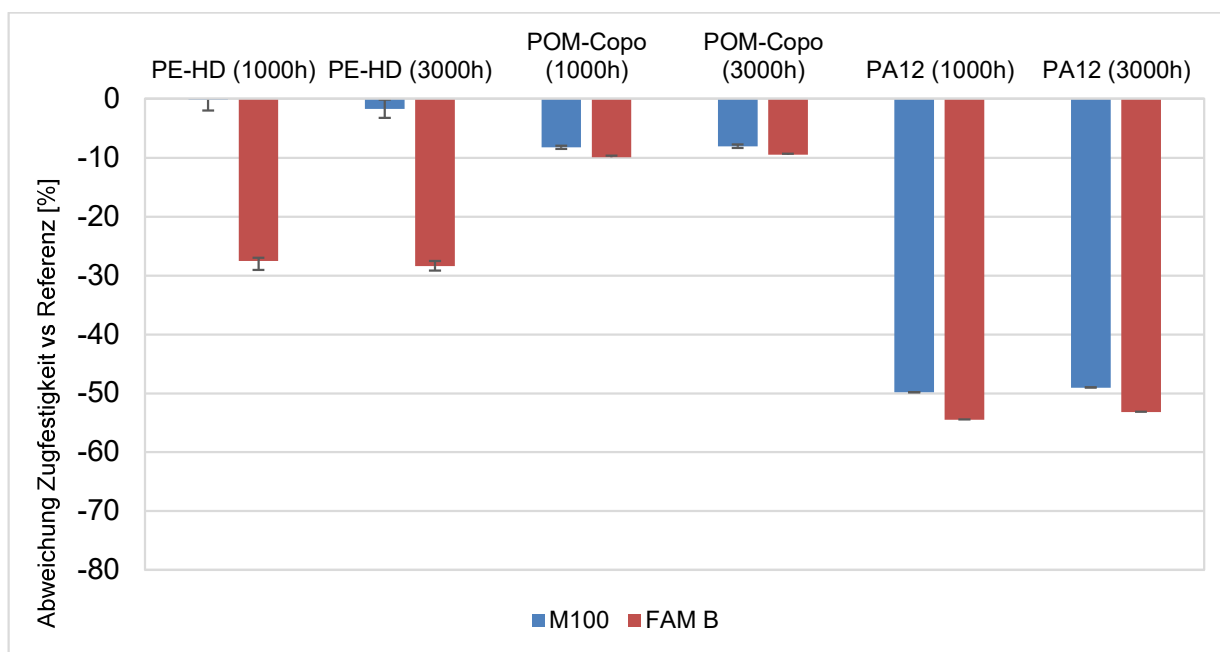


Abbildung 2: Änderung Zugfestigkeit Thermoplaste vs. Referenz nach 7 Tagen und 5 Monaten (80°C)

Bei den meisten Werkstoffen war die Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach 1000 Std. abgeschlossen, eine signifikante Veränderung zwischen 1000 und 3000 Std. Einlagerung konnte zumeist nicht festgestellt werden. Bei der Bestimmung der Schlagzähigkeit (dynamische Beanspruchung) wurden keine kritischen Werkstoff-Kraftstoff-Paarungen festgestellt. Es zeigte sich kein spezieller Einfluss des reinen Methanols auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe nach der Exposition bei erhöhten Temperaturen.

Im Rahmen der Materialuntersuchungen wurden Auslagerungen von Probenkörpern verschiedenster metallischer Werkstoffe (Aluminium, Guss, Kupfer und Stahl) für 29 Wochen in M15 durchgeführt. Die Proben wurden hierbei partiell im Medium und in Luft gelagert. Bis auf optische Veränderungen (z.B. bei Kupfer in M15) konnten keine negativen Beeinflussungen durch den M15-Kraftstoff festgestellt werden.

Kraftstoffführende Bauteile wurden entsprechend der Anwendung mit Kraftstoff (M100) exponiert. Eine Auslagerung dieser Bauteile in M15 fand bereits in der Vergangenheit intern statt. Zum Beispiel wurden Hochdruckpumpe und Injektoren mit Kraftstoff befüllt und anschließend luftdicht verschlossen. Tankeinbaueinheiten wurden in verschließbaren

Eingehende Darstellung

Edelstahlbehältern bis zum Flansch in Kraftstoff versenkt. Die Einlagerung erfolgte bei 60 °C im Wärmeschrank. In Abbildung 3 sind Bauteile vor der Einlagerung dargestellt.

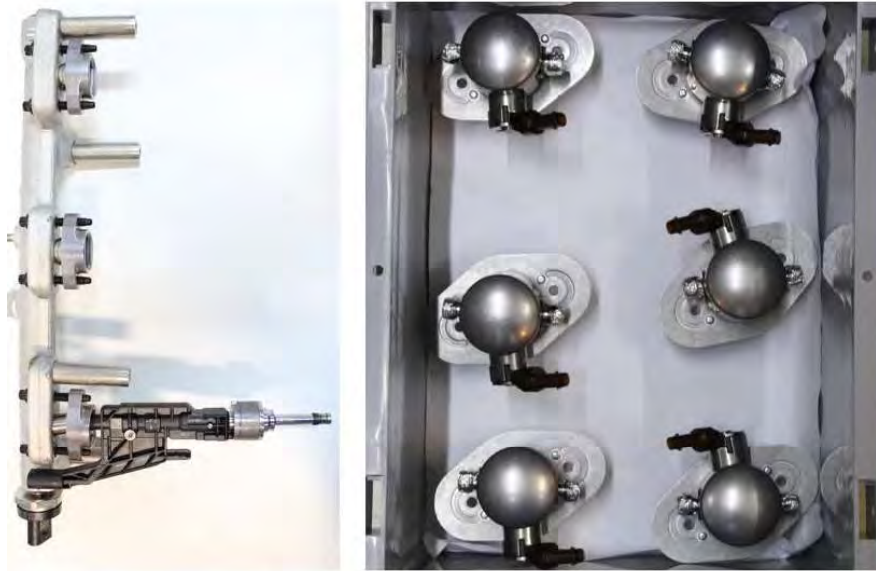


Abbildung 3: Hochdruckrail- und Injektor (links), Hochdruckpumpen (rechts) vor Einlagerung

Die eingelagerten sowie betriebenen Bauteile wurden soweit möglich Funktionstests unterzogen sowie optische Befundungen (z.B. hinsichtlich Korrosion) durchgeführt. Die Bauteilmatrix umfasste die Hochdruckpumpe (siehe Hochdruck- und Niederdruck-Injektoren sowie die Tankeinbaueinheit mit der In-Tank-Pumpe).

Die geprüften Bauteile zeigten keine Auffälligkeiten hinsichtlich Funktionalität und Ablagerungen bzw. Korrosion.

Eingehende Darstellung

**HDP
20581-9M**

- ❶ No color change
- ❷ No deposit formation

Abbildung 4: Befundung Hochdruckpumpe nach 9 Monaten Einlagerung mit M100

Hochdruck (HD)-Injektoren wurden mit Kraftstoff befüllt und über zwei Intervalle (5 Monate, 9 Monate) bei 60 °C mit M100 eingelagert. Anschließend wurden die Injektoren optisch befundet (siehe Abbildung 5). Alle Bauteile lagen innerhalb der vorgeschriebenen Toleranzen. Ein Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung konnte nicht beobachtet werden.

Eingehende Darstellung

HD-Injektor
18687-9M

Abbildung 5: Befundung der Hochdruckinjektoren nach 9M Einlagerung in M100

Tankeinbaueinheiten mit In-Tank-Pumpe wurden in verschließbaren Edelstahlbehältern bei 60 °C in Testkraftstoff M100 versenkt eingelagert. Die Einheiten wurden nach der Auslagerung optisch befundet (siehe Abbildung 6) und Fördermengen sowie elektrische Leistungskennlinien vermessen. Hierbei waren alle geprüften Einheiten voll funktionsfähig. Lediglich eine leichte Erhöhung der Fördermenge nach 9 Monaten war erkennbar, welche sich aber im Betrieb nicht negativ auswirkte (siehe Abbildung 7).

Eingehende Darstellung

TEE 3544-STANDARD-9M



Abbildung 6: Optische Befundung vor und nach 9 monatiger Auslagerung in M100

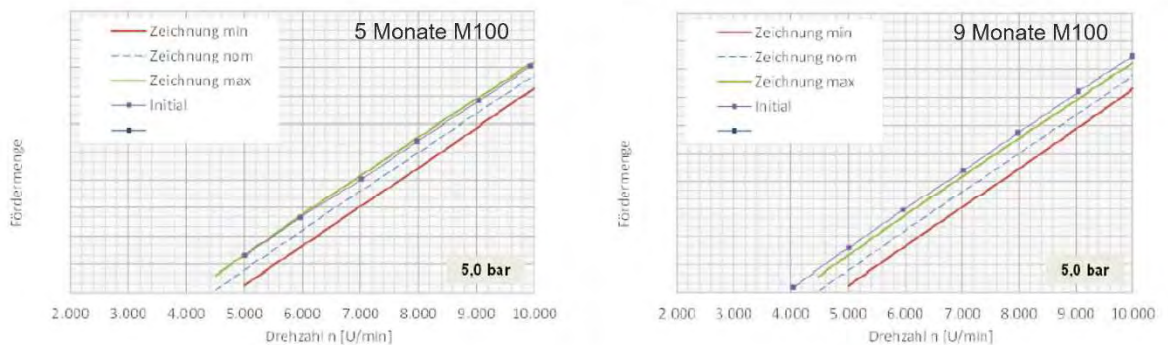


Abbildung 7: Kennlinienvermessung In-Tank-Pumpe vor und nach 5 und 9 Monaten Einlagerung

Überdies wurden zur Untersuchung der dynamischen Belastung von Tankeinbaueinheiten (inklusive In-Tank-Pumpe) Prüfstände im Hardware-in-the-Loop Prinzip (HiL) von TEC4FUELS aufgebaut und betrieben.

Die Teststände bestanden aus dem kompletten Tanksystem mit Druck- und Temperaturregelung und wurden mit typischem Druck- und Drehzahlprofil betrieben. Die Tests beinhalteten 2.750 Stunden Laufzeit mit M15-Kraftstoff bei einer Temperatur von 60 °C. Der Kraftstoff wurde alle 250 Stunden ausgetauscht. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt seitens des Konsortialpartners Tec4Fuels.

Eingehende Darstellung

2.1.2 AP C – Methanolnutzung im Motor

2.1.2.1 AP C3 – M15 Nutzung im Motor (BMW)

2.1.2.1.1 AP C3.1 Motorprüfstand

Ziel des Arbeitspakets C3.1 war die Untersuchung des Einflusses von M15-Kraftstoff auf den ottomotorischen Betrieb mit heutiger Motorentechnologie. Zudem sollte das Potential von höheren Methanolanteilen im Kraftstoff (oberhalb der aktuell in der EN228 erlaubten Menge von max. 3%v/v) ausgelotet werden. Hierfür wurden neben dem M15-Blend zwei Referenzkraftstoffe (EU6 [95E10] sowie ein Super Plus [98E0]) zum Vergleich herangezogen.

Tabelle 4 zeigt die wichtigsten chemisch-physikalischen Kraftstoffcharakteristiken.

Tabelle 4: Analysedaten der verwendeten Kraftstoffe in AP C3

Parameter	M15	EU6 E10	SuperPlus 98E0
Oktanzahl			
ROZ [-]	97,8	96,5	98,8
MOZ [-]	87,8	85,3	85,6
Chemisch-physikalische Eigenschaften			
Dichte bei 15°C [kg/m ³]	771,9	750,7	745,3
Heizwert [MJ/kg]	39,76	42,04	42,74
Dampfdruck DVPE [kPa]	59,6	56,4	54,2
Oxidationsstabilität [min]	>480	>480	>480
Siedebeginn [°C]	42,5	37,8	34,7
E70 [%V/V]	46,1	41,4	26,8
E150 [%V/V]	79,8	87,7	90,6
Siedeende [°C]	190,7	192,0	183,7
Zusammensetzung			
Schwefel [mg/kg]	7,7	5,0	6,8
Olefine [%V/V]	6,1	7,3	6,5
Aromaten [%V/V]	36,2	30,8	31,4
C9+ [%V/V]	19,1	10,3	9,4
Benzol [V%V]	0,3	0,8	0,7
Sauerstoffgehalt [%m/m]	8,5	3,5	2,2
EN 228 konform	Nein	ja	ja

Eingehende Darstellung

Das Programm am Motorprüfstand umfasste verschiedene Umfänge bei warmem und kaltem Motor, z.B. Untersuchungen zu Volllast und Klopfneigung, Kennfeldabrasterungen, dynamische Lastwechsel, Untersuchungen zum Katalysatorheizen und Variation der internen Abgasrückführung.

Hierzu wurde ein BMW 4-Zylinder-Serienmotor am Motorprüfstand aufgebaut, mit Steuer- und Messtechnik ausgerüstet und in Betrieb genommen. Für die Untersuchungen wurden je nach Programmpunkt einzelne Steuergrößen variiert, die restlichen relevanten Parameter ergaben sich aus dem Datenstand des Steuergeräts. Durch Zylinderdruckindizierung konnte der Brennverlauf ermittelt werden und über Messstellen im Abgastrakt wurden die Emissionskomponenten unverbrannte Kohlenwasserstoffe (total hydrocarbons, THC), Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Partikelanzahl (PN) aus dem Rohabgas vor dem Katalysator gemessen. Hierzu wurden eine MEXA-7100 DEGR (gasförmige) und eine MEXA-SPCS2100 (partikulär) verwendet. Die Kühlmitteltemperatur des Motors wurde durch einen externen Wärmetauscher konditioniert, um vergleichbare Rahmenbedingungen innerhalb der Untersuchungen zu gewährleisten.

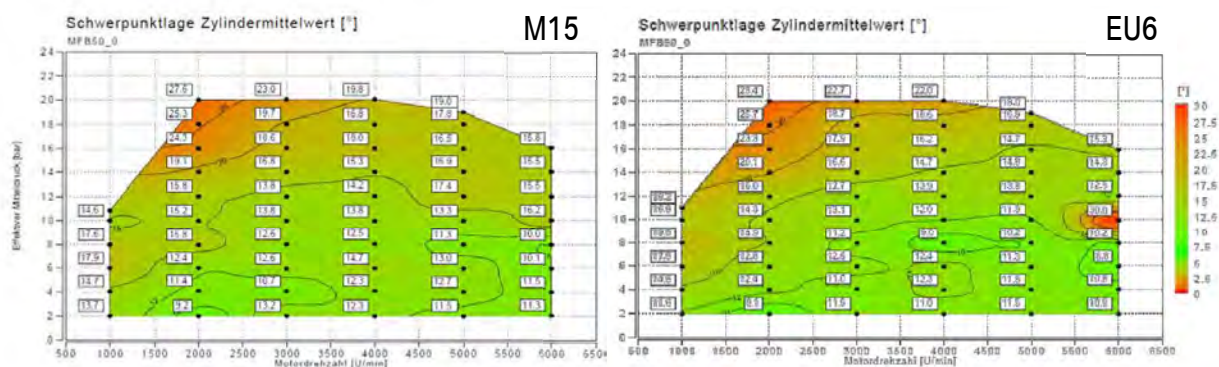


Abbildung 8: Vergleich der Kennfelder (warm) zwischen M15 und EU6-Referenzkraftstoff.

In Abbildung 8 ist der Kennfeldvergleich zwischen M15 und EU6 E10 bei warmem Motor (Kühlwassertemperatur = 90 °C) hinsichtlich Schwerpunktlage dargestellt.

Über das gesamte Motorkennfeld gibt es nur marginale Abweichungen in der ottomotorischen Verbrennung zwischen M15-Kraftstoff, EU6 und SuperPlus. Trotz Unterschieden in der Klopfneigung (M15 / ROZ 101,0; EU6 / ROZ 96,5 und SuperPlus / ROZ 98,8) ergaben sich nahezu identische Schwerpunktlagen während der Verbrennung. Auch auf die Laufruhe und gemessenen Rohemissionen konnte im Vergleich kein signifikanter Einfluss von M15 im Rahmen der Standardapplikation festgestellt werden (siehe Abbildung 16-Abbildung 9).

Eingehende Darstellung

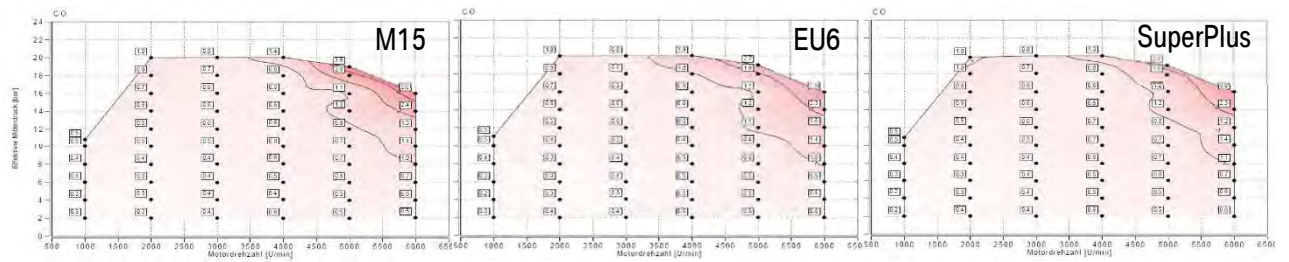


Abbildung 9: CO-Konzentration über das Kennfeld im Vergleich der Kraftstoffe.

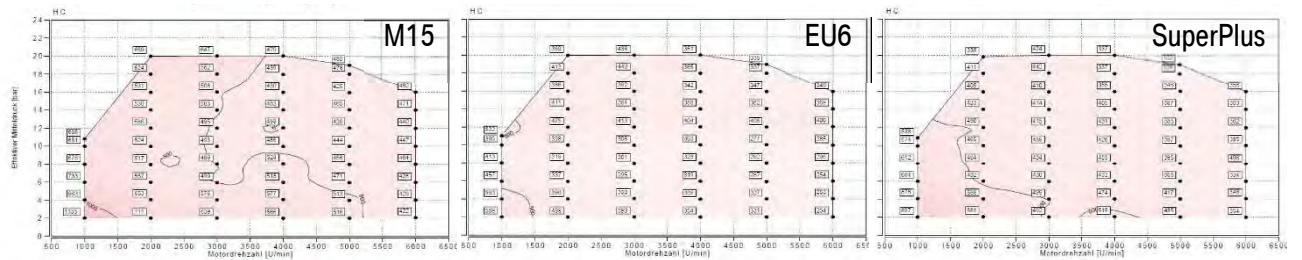


Abbildung 10: HC-Konzentration über das Kennfeld im Vergleich der Kraftstoffe

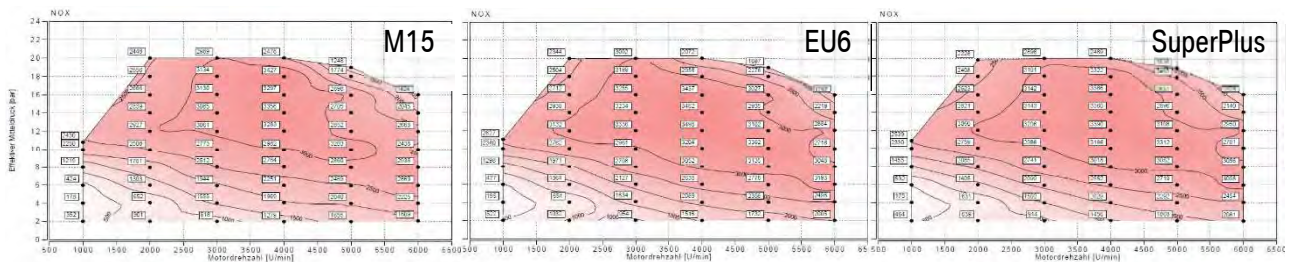


Abbildung 11: NOx-Rohemissionen über das Kennfeld im Vergleich der Kraftstoffe

Bei Verwendung des M15 Kraftstoffs gab es trotz höherer Oktanzahl keine Vorteile bezüglich Anfettungsbedarf im Nennleistungsbereich.

Bei der Kennfeldabrasterung bei kaltem Motor (Kühlmitteltemperatur = 30 °C) waren die Unterschiede im Kraftstoff tendenziell stärker ausgeprägt.

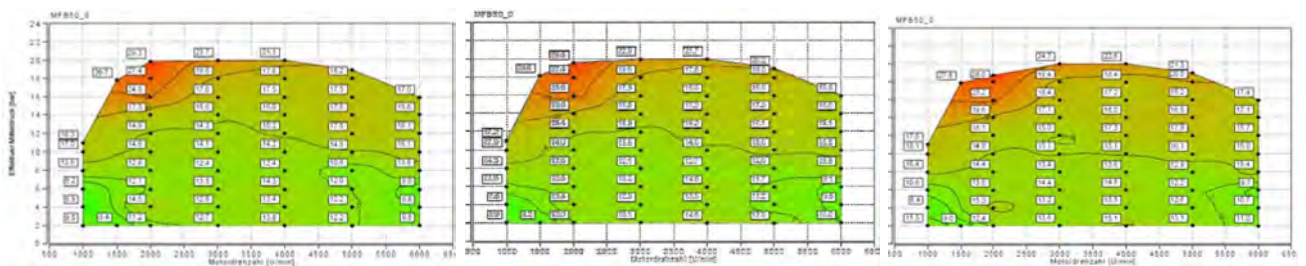


Abbildung 12: Schwerpunktlage über das Kaltkenfeld

Eingehende Darstellung

Bei Anfertigungsbedarf und PN-Emissionen lag der M15-Kraftstoff vor allem in Bereichen hoher Last auf höherem Niveau (siehe Abbildung 19: Anfertigungsbedarf über das Kaltkennfeld).

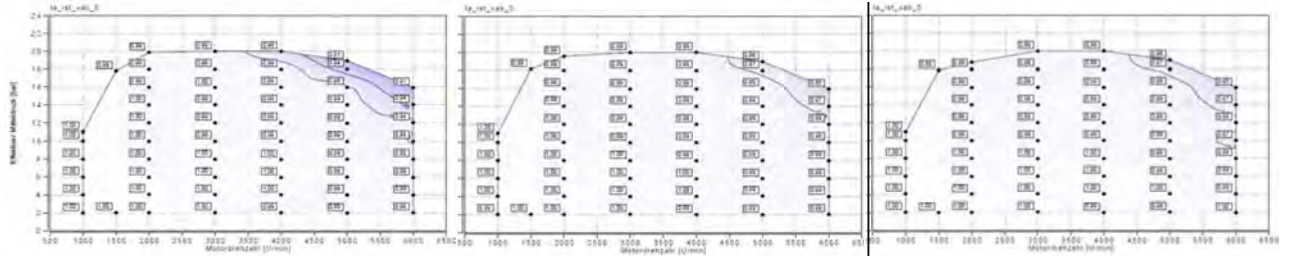


Abbildung 13: Anfertigungsbedarf über das Kaltkennfeld



Abbildung 14: PN-Emissionen über das Kaltkennfeld

Die Laufruhe war hiervon nicht betroffen. Bezüglich Rohemissionen zeigt sich bei CO und THC eine ähnliche aber nur schwächer ausgeprägte Tendenz zu höheren Lasten und Drehzahlen hin (siehe Abbildung 15-16).

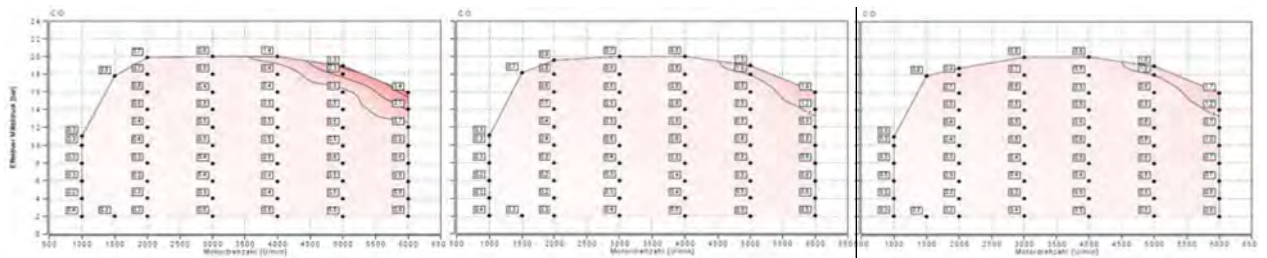


Abbildung 15: CO-Emissionen im Kaltkennfeld

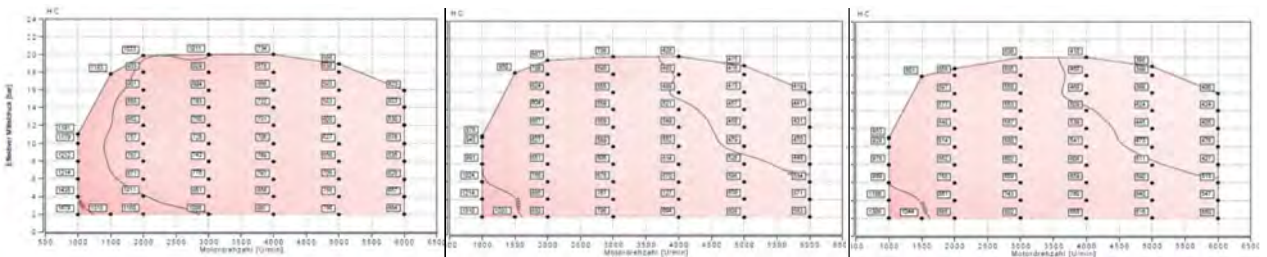


Abbildung 16: HC-Emissionen im Kennfeld

Für NOx ergeben sich wiederum etwas niedrigere Werte in den angesprochenen Bereichen des Kaltkennfeldes (siehe Abbildung 17).

Eingehende Darstellung

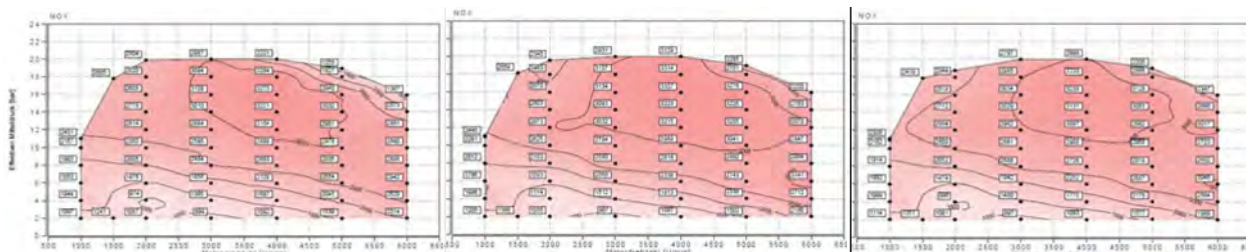


Abbildung 17: NOx-Emissionen

In Abbildung 18 sind Ergebnisse der Vollastuntersuchungen dargestellt. EU6 und SuperPlus zeigen hier nahezu identisch im motorischen Verhalten. Im Vergleich zwischen M15 und EU6-Kraftstoff wurden Vorteile des M15 hinsichtlich Schwerpunktlage im Low-End-Torque Bereich festgestellt. Der zuvor bereits festgestellte Anfettungsbedarf bei hohen Drehzahlen und Lasten konnte hier bestätigt werden. Die maximale Leistung und Drehmoment konnten unabhängig des verwendeten Kraftstoffs erbracht werden.

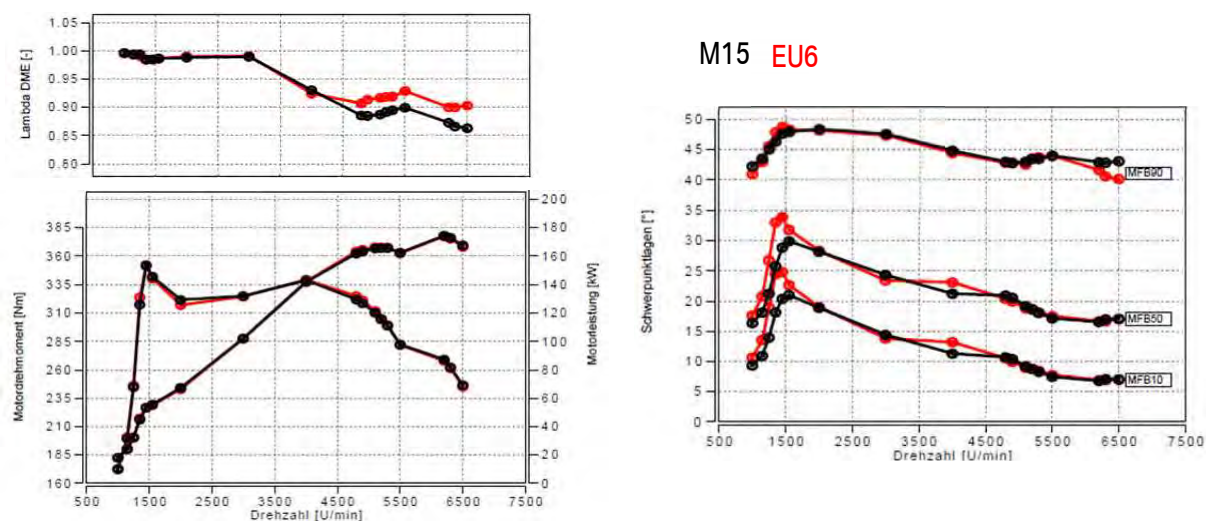


Abbildung 18: Vollastuntersuchungen im Vergleich M15 (schwarz) und EU6 (rot)

In einem Katalysatorheizpunkt (1200 1/min und 2 bar Mitteldruck) wurde in mehreren Durchgängen sowohl der Zündwinkel als auch die eingespritzte Kraftstoffmenge in erster und zweiter Einspritzung variiert. Alle Kraftstoffe zeigten eine ähnliche Reaktion auf die Variation der beiden Parameter. Insbesondere hinsichtlich Laufruhe und Rohemissionen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen M15, EU6 und SuperPlus Kraftstoff beobachtet werden.

Untersuchungen zur Sensitivität der Kraftstoffmischungen auf interne Abgasrückführung wurden durch Variation Öffnungszeiten des Auslassventils und gleichzeitiger Variation des Einspritzzeitpunktes (SOI1) durchgeführt. Im gewählten Betriebspunkt (1500 1/min, 2 bar

Eingehende Darstellung

Mitteldruck, 30 °C Kühlmitteltemperatur) lag sowohl die motorische als auch die emissionsseitige Reaktion auf die unterschiedlichen Restgasgehalte während des Ladungswechsels auf ähnlichem Niveau. Signifikante Unterschiede zwischen dem M15, EU6 und SuperPlus-Kraftstoff wurden nicht festgestellt.

Grundsätzlich wäre der M15 im Rahmen heutiger Motorapplikation ohne nennenswerte Einschränkungen in Bestandsfahrzeugen verwendbar.

2.1.2.1.2 AP C3.2 Fahrzeugprüfstand

Der Fokus im Arbeitspaket C3.2 lag auf dem Nachweis der Eignung von M15-Kraftstoff im Fahrzeugbetrieb unter definierten und einheitlichen Prüfbedingungen.

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde ein für den europäischen Markt gängiges Fahrzeug mit Serienausstattung aus dem Fuhrpark der BMW Group bereitgestellt. Dieses wurde für Untersuchungen sowohl von Referenzkraftstoffen innerhalb der Kraftstoffnorm ISO DIN EN 228 (Sauerstoffgehalt äquivalent zu 10 %V/V Ethanol) sowie mit dem M15-Kraftstoff verwendet. Der bereits beschriebene EU6 und SuperPlus Kraftstoff diente als Referenz für Emissionen und Verbrauch in beiden Fahrzeugen.

In Tabelle 5 sind die technischen Daten des Fahrzeugs aufgeführt.

Tabelle 5: Technische Daten des Fahrzeugs für Prüfstandsuntersuchungen

	Ottofahrzeug
Untersuchte Kraftstoffe	EU6-Referenzkraftstoff, SuperPlus (ROZ98E0) und M15-Kraftstoff
Modell	Mini John Cooper
Zylinder	4
Hubraum	1998 cm ³
Nennleistung	170 kW
Leergewicht	1625 kg
Einspritzung	Direkteinspritzung
Aufladung	Turbolader
Zündung	Fremdzündung
Abgasnorm	EU 6d
Abgasnachbehandlung	TWC / OPF



Eingehende Darstellung

Das Fahrzeug wurde zunächst hinsichtlich der Einsatzfähigkeit auf dem Abgasrollenprüfstand überprüft. Zur Entnahme von Rohabgas wurden vor dem Drei-Wege-Katalysator (TWC) und Ottopartikel (OPF) Entnahmestellen gesetzt. Zudem konnten über Messstellen vor, in und nach dem Drei-Wege-Katalysator die entsprechenden Temperaturen während des Fahrzeugbetriebs gemessen werden.

Die Messung von Rohemissionen („Engine out“) diente der Bewertung der Kraftstoffe ohne einen gegebenenfalls vorhandenen Einfluss der Abgasnachbehandlung. Auf diesem Wege wurden sowohl gasförmige (THC, CH₄, CO, NO_x) als auch partikuläre Emissionen (PN ≥ 23 nm) bestimmt

Zudem erfolgte die Messung von Tailpipe-Emissionen. Bisher unreglementierte gasförmige Emissionen wie Formaldehyd, Ammoniak (NH₃) und Distickstoffmonoxid (N₂O) wurden mittels FTIR aus dem unverdünnten Abgas bestimmt. Im verdünnten Abgas (Controlled Volume Sampling / CVS) wurden die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (THC), Methan (CH₄), Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) sowie Kohlenstoffdioxid (CO₂) sowohl mit einer Auflösung von 1 Hz als auch phasenweise (Beutelmessung) bestimmt. Eine Korrektur hinsichtlich des abweichenden Wassergehalts im Abgas wurde anhand der tatsächlichen Kraftstoffzusammensetzung (C/H/O-Anteile) durchgeführt.

Der volumetrische Kraftstoffverbrauch wurde über eine externe Messeinrichtung (AVL PLU-tron) bestimmt.

Die Durchführung der Tests erfolgte auf einem für Typprüfungen zugelassenen Rollenprüfstand (AIP GmbH & Co. KG, Allrad-Rollenprüfstand, max. 215 kW, max. 250 km/h) mit Konditionierung der Umgebungsbedingungen auf 23 ± 1 °C und 50 ± 5 % relative Luftfeuchtigkeit. In Abbildung 19 ist der Fahrzeugprüfstand sowie ein schematischer Aufbau der Abgasmesstechnik dargestellt.

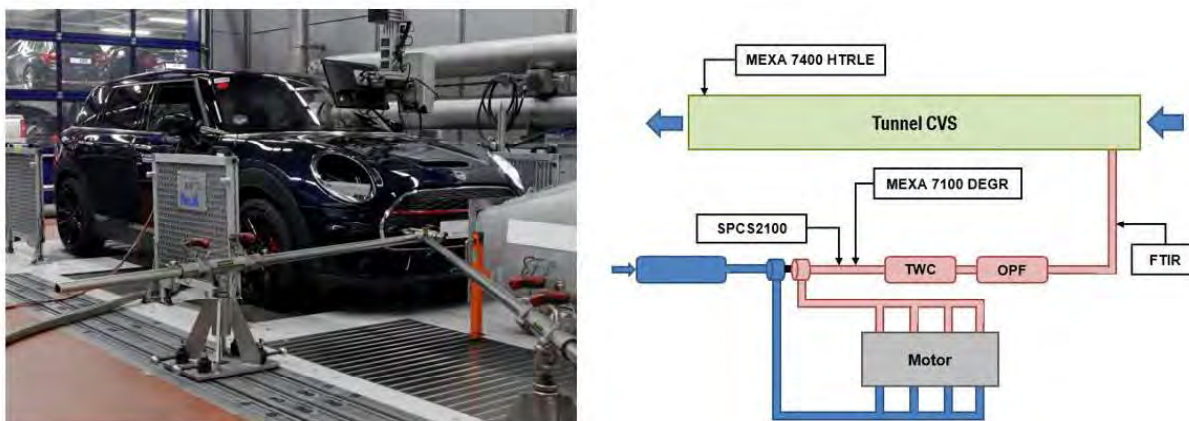


Abbildung 19: Fahrzeugprüfstand und schematischer Aufbau der Abgasmesstechnik

Bei jedem Kraftstoffwechsel wurde der Tank vollständig entleert, alle Kraftstoffleitungen mit dem neuen Kraftstoff gespült und das Fahrzeug auf den neuen Kraftstoff adaptiert. Zwischen den Tests erfolgte eine Konditionierung der Fahrzeuge auf die Start- bzw. Umgebungstemperatur von 23 °C. Darüber hinaus wurden auch Tests in der Kältekammer bei -7°C durchgeführt, um

Eingehende Darstellung

einen möglichen Einfluss von M15-Kraftstoff auf das Emissionsverhalten bei niedrigen Umgebungstemperaturen zu evaluieren. Hierzu wurde das Fahrzeug auf einem temperierbaren Rollenprüfstand mit einem mobilen Abgasmesssystem / PEMS (AVL M.O.V.E Gas + PN PEMS inkl. exhaust gas flow meter) betrieben und die Komponenten CO, CO₂, NO_x, und PN bestimmt. Als Bewertungsgrundlage diente der WLTC in mindestens Dreifachbestimmung.

Zur Verbesserung der Wiederholbarkeit der Untersuchungen wurden alle Testfahrten von dem gleichen Fahrer durchgeführt. Zur Bewertung der Verbrauchs- und Emissionseigenschaften dienten zwei Fahrzyklen und Testbedingungen. Einerseits der aktuelle Normzyklus in der Typprüfung („WLTC“) für die Tests bei -7°C und andererseits ein Zyklus, welcher die RDE-Randbedingungen („RDE-Zyklus“) bei 23°C erfüllt. Dieser beinhaltet im Wesentlichen eine deutlich längere Fahrtdauer und ein etwas dynamischeres Profil. Für eine statistische Signifikanz wurden pro Kraftstoff beide Zyklen jeweils mindestens dreimal wiederholt. In Abbildung 20 ist der Geschwindigkeitsverlauf beider Fahrzyklen dargestellt.

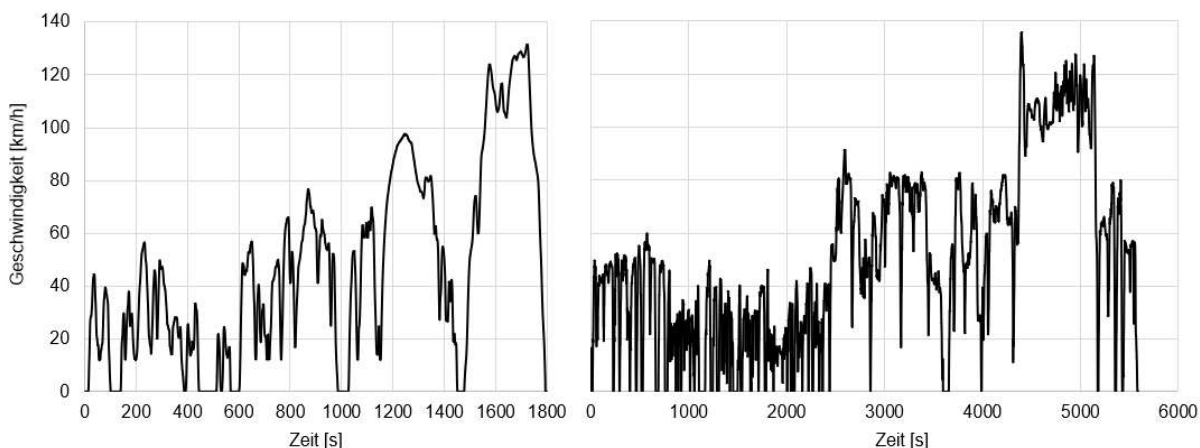


Abbildung 20: Verwendete Fahrzyklen - WLTC (links) und Zyklus nach RDE-Bestimmungen (rechts)

Die Umfänge der Untersuchungen waren auf den Referenzkraftstoff (EU6 E10), SuperPlus (ROZ98 E0) und den M15-Kraftstoff beschränkt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse am Fahrzeugrollenprüfstand vorgestellt und bei den unterschiedlichen Prüfbedingungen gegenübergestellt.

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der gasförmigen Tailpipe-Emissionen THC, CO und NO_x für EU6, SuperPlus und M15-Kraftstoff relativ zu den Absolutwerten des EU6-Kraftstoffs aufgetragen. Im direkten Kraftstoffvergleich ergaben sich nach Katalysator keine signifikanten Unterschiede. Im Kalten (WLTC, -7°C) wurden leicht niedrigere NO_x Emissionen bei Verwendung des M15-Kraftstoffs festgestellt.

Eingehende Darstellung

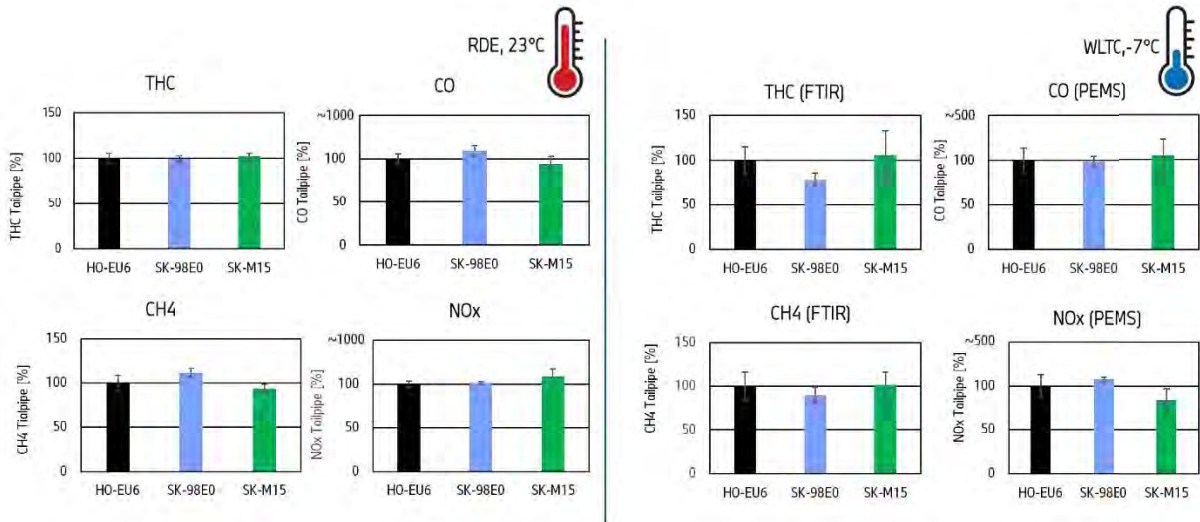


Abbildung 21: Relative Emissionsergebnisse (Tailpipe) Fahrzeugrolle für EU6, SuperPlus und M15 im RDE-Zyklus bei 23°C (links) und im WLTC bei -7°C (rechts)

Die PN-Emissionen ≥ 23 nm wurden nur im Rohabgas vor dem Ottopartikelfilter bestimmt (siehe Abbildung 22). Über den Fahrzyklus bei 23 °C Umgebungstemperatur wurde jeweils nur eine geringfügige Abweichung des M15-Kraftstoffs im Vergleich zum SuperPlus (98E0) in den Tailpipe-Emissionen beobachtet. Der EU6-Kraftstoff hingegen wies im Mittel ein niedrigeres PN-Niveau als die beiden zuvor genannten Kraftstoffe auf. Für den Zyklus bei -7°C ergaben sich innerhalb der Fehlergrenzen keine Unterschiede hinsichtlich PN-Rohemissionen innerhalb der Kraftstoffe.

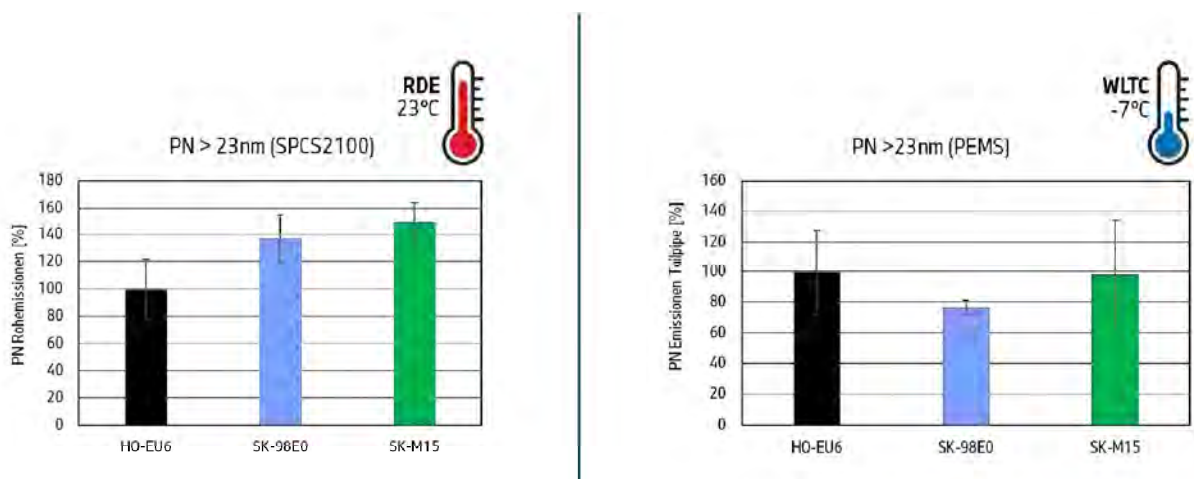


Abbildung 22: Partikelemissionen (Anzahl) in beiden Testzyklen und -bedingungen

Der Einsatz von M15 brachte keine signifikanten Vor- oder Nachteile in den gasförmigen Tailpipe- und partikulären Rohemissionen, weder in den unterschiedlichen Zyklen noch Umgebungstemperaturen.

Eingehende Darstellung

Die gemessenen volumetrischen Kraftstoffverbräuche innerhalb der Testläufe eines Kraftstoffs wiesen im WLTC jeweils eine Streuung von kleiner einem Prozent auf. Die Kraftstoffverbräuche von M15 lagen trotz des ca. 8% niedrigeren Heizwerts (Übersicht Heizwerte in Tabelle 6) im RDE bei 23°C nur ca. fünf Prozent höher im Vergleich zu EU6 (siehe Abbildung 23).

Die Grenzwerte der jeweils geltenden Abgasnormen wurden eingehalten bzw. lagen größtenteils weit darunter.

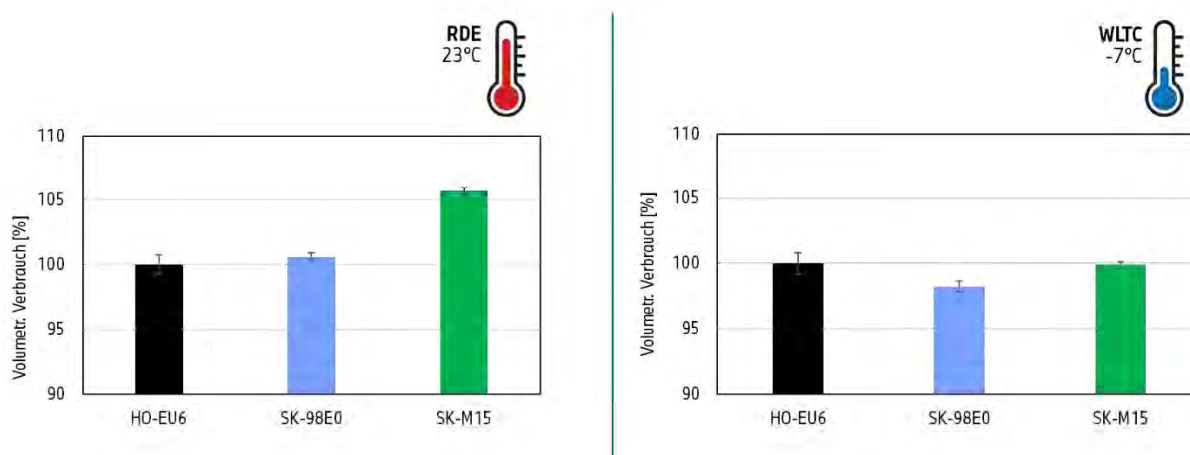


Abbildung 23: Volumetrische Verbräuche im Vergleich

Im WLTC bei 7°C konnte dieser Mehrverbrauch bei M15 jedoch nicht festgestellt werden. Im RDE kamen hier der Anfettungsbedarf bei hohen Lasten (analog Kennfeld Warm aus Kapitel 2.1.2.1.1) stärker zum Tragen.

Tabelle 6: Heizwerte der verwendeten Kraftstoffe

Kraftstoff	Heizwert [MJ/kg]	Heizwert [MJ/L]
EU6	42.0	31.6
M15	38.7	29.8
SuperPlus	42.7	31.9

Die gemessenen CO₂-Tailpipe-Emissionen bestätigten dies (siehe Abbildung 24). Hier wäre voraussichtlich eine Anpassung der Applikation zur Nutzung des CO₂-Reduktionspotentials des Methanolblends notwendig.

Eingehende Darstellung

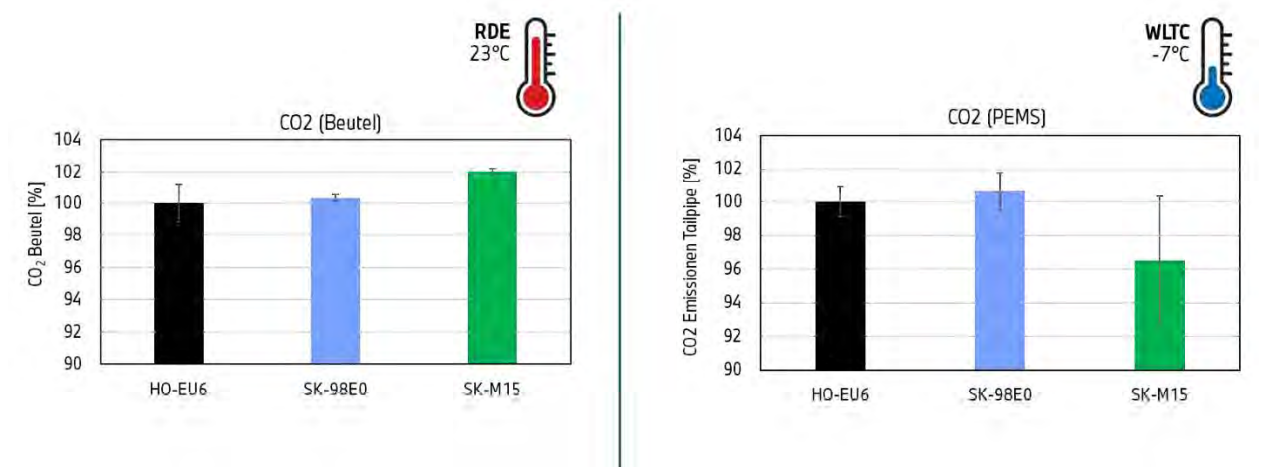


Abbildung 24: Relative CO₂-Emissionen (bezogen auf Ergebnisse mit EU6-Kraftstoff)

Zusätzlich wurden auch aktuell noch unreglementierte gasförmige Emissionen (Formaldehyd, N₂O, NH₃ und Methanol) gemessen (siehe Abbildung 25).

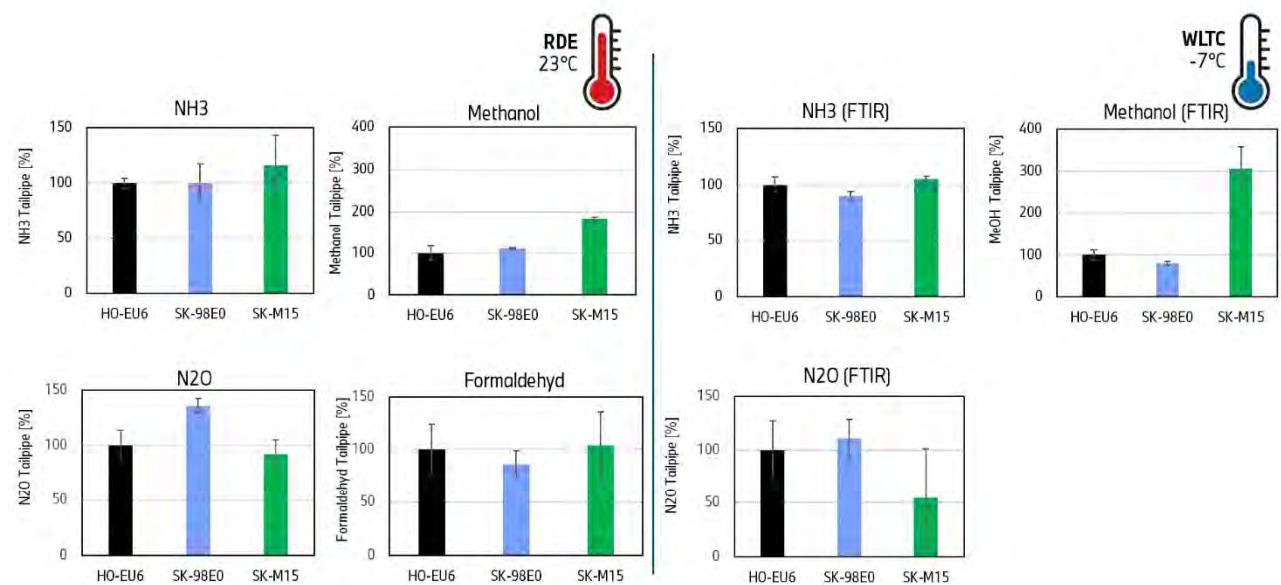


Abbildung 25: Nicht-reglementierte Emissionen (Tailpipe) bei 23°C im RDE (links) und -7°C im WLTC (rechts)

Innerhalb der Fehlergrenzen ist ein erhöhtes Niveau an Methanolemissionen, vor allem bei kalten Rahmenbedingungen mit M15-Kraftstoff festzustellen, welches aber dem bekannten Phänomen des Methanolschlupfs am Katalysator bei Verwendung eines methanolhaltigen Kraftstoffes gleichkommt.

Eingehende Darstellung

Fazit

Untersuchungen von methanohaltigem Kraftstoff (M15) im Vergleich zu Referenzkraftstoffen wurden am Emissionsrollenprüfstand durchgeführt. Hierbei konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

- Der Blend aus 15% Methanol in Ottokraftstoff zeigt keine signifikanten Auswirkungen auf das Emissionsverhalten bei heutiger Fahrzeugtechnik. Durch Verbesserungen der Kraftstoffqualität, auch im Hinblick auf das oktanzahlsteigernde Potential von Methanol, sind jedoch noch Potentiale hinsichtlich der Tank-to-Wheel Emissionen vorhanden.
- Methanol könnte das Blendingrepertoire diversifizieren, jedoch unter der Voraussetzung, dass die geltenden Kraftstoffqualitätsstandards eingehalten werden.
- Die 15-prozentige Beimischung von Methanol zeigte im Vergleich zu EU6 E10 / SuperPlus-Marktware zum Teil erhöhte PN-Emissionen, unterschritt jedoch die geltenden Abgasgrenzwerte. Weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich einer dedizierter Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung ist gegeben.
- Bei der Bestimmung der unreglementierten gasförmigen Emissionen (Formaldehyd, Acetaldehyd, N₂O, NH₃, Methanol) wurden lediglich bei den Methanolemissionen signifikante Unterschiede zum Referenzkraftstoff EU6 E10 und SuperPlus festgestellt. Bei einer dedizierten Auslegung müsste hierauf geachtet werden.

Die Grenzwerte der aktuell gültigen europäischen Abgasnorm (EURO6d) wurden eingehalten bzw. lagen Großteils weit darunter.

Eingehende Darstellung

2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Seitens der BMW AG sind keine Schutzrechtsanmeldungen erfolgt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Im Projektverlauf konnte aufgezeigt werden, dass der Einsatz von M15 in der BMW-Bestandsflotte möglich ist und in der im Projekt genutzten Qualität kein signifikant erhöhtes Emissionsrisiko darstellt. Auch der Einsatz von reinem Methanol (M100) konnte in bestehender Flex Fuel Technologie dargestellt und eine generelle technische Kompatibilität demonstriert werden. Ein dedizierter Einsatz für europäische Randbedingungen wurde nicht untersucht.

Eine unmittelbare wirtschaftliche Nutzung der Projektergebnisse durch BMW hängt maßgeblich von den politischen Rahmenbedingungen, vom Markt bzw. den Kraftstoffproduzenten ab, da erst dann eine Auslegung auf die entsprechende Kraftstoffqualität umgesetzt werden kann. Weitere Einsatzmöglichkeiten, u.a. im Rennsport, werden derzeit geprüft. Die erhaltenen Ergebnisse der Material- und Bauteiltests in Kooperation mit TEC4FUELS werden insbesondere bei Diskussionen mit aktuellen und zukünftigen Lieferanten von kraftstoffführenden Komponenten genutzt, um die Fahrzeuge der BMW AG im diversifizierenden Kraftstoffmarkt beständig zu machen.

Die enge Zusammenarbeit mit weiteren OEMs sowie Bauteilherstellern (Ford, Liebherr, etc.) konnte die breite Einsatzfähigkeit der Methanolbeimischung für Kraftstoffe in der bestehenden und mittelfristigen Fahrzeugflotte aufzeigen.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Für den Einsatz von Methanol als Ottokraftstoffsubstitut, zum Beispiel in der Verwendung als M15, muss weitere Forschungsarbeit erfolgen. Zukünftige Vorgaben für Marktkraftstoffe sind noch nicht im Detail abzusehen, aber höhere Anforderungen an im Rahmen einer Standardisierung im Vergleich zur EN228 sind zu erwarten (Wassergehalt, Beiblendung von Ethern). Die Untersuchungen der BMW AG im Rahmen von Methanol Standard weisen darauf hin, dass der M15 sich applikationsneutral verhält und kein signifikant erhöhtes Emissionsrisiko gegen aktuell EN228-konforme E10 und E0-Kraftstoffe darstellt. Eine deutliche Emissionsreduktion in der TtW-Betrachtung konnte jedoch nicht beobachtet werden. Das Verfahren hat aber das Potential dies zukünftig leisten zu können.

Dem prinzipiellen Einsatz von Methanol als Blendingkomponente im geringen Prozentsatzbereich oder einer Zuführung in den Raffineriestream zur Verringerung der

Eingehende Darstellung

CO₂-Intensität des Marktkraftstoffs steht aus Sicht der BMW AG, und damit der Verwendung in Fahrzeugen der BMW AG, kein technisches Hindernis im Weg. Gewisse Einschränkungen bestehen hinsichtlich der Verwendung von M15 in der Serien-HDP, welche nach mehreren hundert Stunden Laufzeit Undichtigkeiten aufwies. Hier müssten weitere Untersuchungen und Anpassungen getätigt werden.

Bei der Verwendung von Elastomeren und Thermoplasten in Auslagerungsversuchen musste aufgrund des finanziellen Rahmens im Vorfeld der Untersuchungen eine Auswahl an Materialien und Kraftstoffmischungen getroffen werden. Keine Material-Kraftstoff-Paarung führte zu einem kritischen Ausfall im Rahmen der Untersuchungen. Für eine finale Einschätzung, ob M15 im Rahmen einer Lifetime-Anwendung in Serientechnologie eingesetzt werden kann, bedarf es weiterer, intensiver Untersuchungen. Die Ergebnisse des Projektes Methanolstandard legen hierfür die Basis innerhalb der AG wie auch mit aktuellen und zukünftigen Lieferanten von Materialien und Bauteilen. Darüber hinaus wurde auch die technische Grundlage für ein Vorantreiben einer Standardisierung von methanolhaltigen Kraftstoffen in Europa gelegt.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Um die angestrebten Treibhausgasreduzierungsziele der Europäischen Union („Fit for 55“) und die globalen Klimaziele (Glasgow COP26) erreichen zu können, ist es dringend erforderlich intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (F&E) in der Herstellung von alternativen Kraftstoffen mit hohem CO₂-Einsparungspotential zu leisten (Perner & Steinfort, 2019). Nur durch F&E und zielgerichteter Standardisierung kann der Standort Deutschland die Wettbewerbsfähigkeit hinsichtlich seiner Kernkompetenzen in den Bereichen Forschung, Ingenieurwesen und Anlagenbau langfristig sicherstellen.

Methanol spielt hierbei einen chemisch einfach herstellbaren Kernbaustein dar und kann damit direkt als einer der ersten Schritte auf biologischem (Advanced Biofuels) sowie nicht-biologischem Wege (RFNBO) gewonnen werden (IRENA AND METHANOL INSTITUTE, 2021). Es bildet dabei auch gleichzeitig den Ausgangsstoff für MtG, ebenfalls ein RFNBO (Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH, 2022). Letztere müssen laut dem aktuell diskutierten Entwurf der Renewable Energy Directive II vom Juli 2021, eine energetische Mindestquote von 2,6% im Transportsektor erfüllen müssen. Bei Betrachtung der zukünftigen Herausforderungen der individuellen Mobilität, vor allem der Defossilierung der weltweiten Bestandsflotte, wird sehr schnell deutlich, dass die weitere Verbesserung und Industrialisierung der nachhaltigen methanolbasierten Kraftstoffe eines der Schlüsselemente darstellen wird.

Neben der Weiterentwicklung der genutzten Katalysatoren im MtG-Verfahren muss auch ein möglicher direkter Einsatz von Methanol im Fokus von anschließenden F&E

Eingehende Darstellung

Projekten und Standardisierung stehen. Gerade im Hinblick auf die Produktqualität der reinen MtG und EtG-Prozesse stellt reines, erneuerbar hergestelltes Methanol eine exzellente Ergänzung z.B. zur Oktanzahlerhöhung dar. Durch die Produktion eines nachhaltigen, das heißt in der Well-to-Wheel-Betrachtung CO₂-neutralen, Kraftstoff mit Premiumeigenschaften hinsichtlich seiner Verbrennungseigenschaften kann auch ein zusätzlicher Vorteil in der Tank-to-Wheel-Betrachtung zur direkten, lokalen Luftverbesserung im urbanen Umfeld erzielt werden.

Die im Projekt durchgeführten Tests an Elastomeren, Thermoplasten und Bauteilen im simulierten Betrieb mit Methanolkraftstoffmischungen (M15 bzw. M100) bilden eine solide Basis für weitere Forschungsarbeiten, die zu einer zukünftigen Freigabe und Verwendung in Flottenfahrzeugen führen können.

Das im Gesamtvorhaben geschaffene Forschungs- und Entwicklungsnetzwerk, mit Vertretern der Produktion (z.B. Methanol Institute), akademischen Forschung (z.B. Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen), kommerziellen Dienstleistern (z.B. TEC4FUELS, ASG Analytik-Service, FEV, Freyberger engineering) und Endnutzern (z.B. Ford, BMW, Liebherr, etc.), bildet die ideale Grundlage für eine erfolgreiche Bearbeitung zukünftiger F&E Projekte im Anwendungsbereich alternativer, flüssiger Kraftstoffe.

Aktuell sieht die europäische Kraftstoffnorm lediglich eine Beimengung von max. 3%v/v vor (DIN EN228, 2017). Die vorliegende Arbeit legt nahe, dass die technische Grundlage für eine Erweiterung hin zu höheren Methanolbeimengungen bereits gegeben, bzw. mit weiterem Forschungsaufwand durchaus ausgeweitet werden kann. Somit wäre eine Hebung des Gesamtpotentials von Methanol als Kraftstoffkomponente in größerem Umfang möglich.

Eingehende Darstellung

2.3 Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Durchführung des Projekts wurden keine für den spezifischen Forschungsgegenstand relevanten Ergebnisse bekannt. Fortschritte, die das Vorhaben obsolet machen oder beeinträchtigen könnten, sind nicht bekannt geworden.

2.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Seitens BMW ist die Veröffentlichung des Berichts vom Gesamtvorhaben in der TIB geplant.

Eingehende Darstellung

3 Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Änderung Zugfestigkeit Elastomere vs. Referenz nach bis zu 1000h (60°C)	12
Abbildung 2: Änderung Zugfestigkeit Thermoplaste vs. Referenz nach 7 Tagen und 5 Monaten (80°C).....	13
Abbildung 3: Hochdruckrail- und Injektor (links), Hochdruckpumpen (rechts) vor Einlagerung	14
Abbildung 4: Befundung Hochdruckpumpe nach 9 Monaten Einlagerung mit M100..	15
Abbildung 5: Befundung der Hochdruckinjektoren nach 9M Einlagerung in M100	16
Abbildung 6: Optische Befundung vor und nach 9 monatiger Auslagerung in M100..	17
Abbildung 7: Kennlinienvermessung In-Tank-Pumpe vor und nach 5 und 9 Monaten Einlagerung	17
Abbildung 8: Vergleich der Kennfelder (warm) zwischen M15 und EU6- Referenzkraftstoff.	
Abbildung 9: CO-Konzentration über das Kennfeld im Vergleich der Kraftstoffe.....	
Abbildung 18: Vollastuntersuchungen im Vergleich M15 (schwarz) und EU6 (rot)....	22
Abbildung 19: Fahrzeugprüfstand und schematischer Aufbau der Abgasmesstechnik	24
Abbildung 20: Verwendete Fahrtzyklen - WLTC (links) und Zyklus nach RDE- Bestimmungen (rechts)	25
Abbildung 21: Relative Emissionsergebnisse (Tailpipe) Fahrzeugrolle für EU6, SuperPlus und M15 im RDE-Zyklus bei 23°C (links) und im WLTC bei -7°C (rechts)	26
Abbildung 22: Partikelemissionen (Anzahl) in beiden Testzyklen und -bedingungen.	26
Abbildung 23: Volumetrische Verbräuche im Vergleich.....	27
Abbildung 24: Relative CO ₂ -Emissionen (bezogen auf Ergebnisse mit EU6-Kraftstoff)	28

Eingehende Darstellung

Abbildung 25: Nicht-reglementierte Emissionen (Tailpipe) bei 23°C im RDE (links) und -7°C im WLTC (rechts) 28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ursprünglicher Termin- und Meilensteinplan	8
Tabelle 2: Terminplan unter Berücksichtigung der oben genannten Abweichungen	9
Tabelle 3: Bedingungen für Untersuchungen zur Kraftstoffkompatibilität	11
Tabelle 4: Analysedaten der verwendeten Kraftstoffe in AP C3	18
Tabelle 5: Technische Daten des Fahrzeugs für Prüfstandsuntersuchungen	23
Tabelle 6: Heizwerte der verwendeten Kraftstoffe	27

Eingehende Darstellung

Literaturverzeichnis

Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH. (2. Februar 2022). *Synthetischer Kraftstoff aus Strom, Wasser und CO2*. Von www.cac-synfuel.com abgerufen

IRENA AND METHANOL INSTITUTE. (2021). *Innovation Outlook : Renewable Methanol*.

Perner, J., & Steinfort, T. (März 2019). *The Overall CO2 Impact for Drive Technologies In Individual Transport Today And In The Future*. frontier economics.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Nicht geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Methanolstandard - Methanol Standardisierung in Europa Untersuchungen zur Findung einer technischen Basis als Ausgangspunkt für eine Standardisierung eines Methanol-Kraftstoffes in Europa	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Lars Menger Dr. Jan-Hubert Wittmann	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2022
	6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2023
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft 80788 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19I20005C
	11. Seitenzahl 36
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 10115 Berlin	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 25
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH, Am Grauen Stein, 51105 Köln	
18. Kurzfassung <ol style="list-style-type: none"> 1. Erneuerbar hergestelltes Methanol stellt bereits jetzt einen wichtigen Zwischenschritt für die meisten alternativen Ottokraftstoffe dar. Eine direkte Anwendung als Kraftstoffkomponente ist bisher auf ein max. von 3% v/v begrenzt. 2. Die technische Eignung von Methanol als Kraftstoffkomponente mit 15% (M15) und 100%-Anteil (M100) sollte nachgewiesen werden. 3. Das Arbeitspaket umfasste einen ganzheitlichen Ansatz zur Bewertung der Kraftstoffqualität, Untersuchungen zur Material- und Bauteilkompatibilität, Brennverfahrensbewertung am Vollmotor sowie Tests zum Emissions-, Verbrauchs- und Fahrverhalten am Fahrzeug. 4. Bei Verwendung in heutiger Motor- bzw. Fahrzeugtechnologie zeigte sich der methanolhaltiger Kraftstoff hinsichtlich Emissionen oder Fahrverhalten als gleichwertig zu aktuellen Referenzkraftstoffen. Es zeigten sich nur an der HDP Auffälligkeiten hinsichtlich Dichtigkeit beim Einsatz mit M15, welche für einen Dauerbetrieb in der Serientechnologie noch genauer beleuchtet werden müssten. 5. Die Untersuchungen zeigten, dass der nachhaltige M15 prinzipiell möglich, aber jedoch mit Anpassungen an (zumindest) der HDP verbunden wäre. Als Drop-In ist er damit nur mit gewissem Aufwand, welcher in dieser Arbeit identifiziert wurde, sofort einsetzbar. Für den Einsatz als Reinkraftstoff und zur Verbesserung der lokalen Luftqualität gegenüber dem Einsatz heutiger Premiumkraftstoffe müssten weitere Tests in Flex-Fuel-Technologie erfolgen. 	
19. Schlagwörter Methanol, kurzketttige Alkohole, Drop-In-Kraftstoff, Materialkompatibilität, Brennverfahren, Emissionen, CO ₂	
20. Verlag Nicht geplant	21. Preis Nicht geplant

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Not planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Methanolstandard - Methanol Standardisierung in Europa Untersuchungen zur Findung einer technischen Basis als Ausgangspunkt für eine Standardisierung eines Methanol-Kraftstoffes in Europa	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Lars Menger Dr. Jan-Hubert Wittmann	5. end of project 31.12.2022 6. publication date 31.03.2023 7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft 80788 München	9. originator's report no. 10. reference no. 19I20005C 11. no. of pages 36
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 10115 Berlin	13. no. of references 3 14. no. of tables 6 15. no. of figures 25
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH, Am Grauen Stein, 51105 Köln	
18. abstract <ol style="list-style-type: none"> 1. Renewable Methanol already represents the cornerstone of many alternative gasoline blends (e.g. via the MtG process). Direct blending of Methanol is still limited to a maximum of 3%v/v in Europe (DIN EN 228, 2017). 2. The goal was to define the technical advantages and challenges of Methanol blends with 15% (M15) or 100% (M100) to prepare for a standardization process. 3. Working packages contained the holistic approach of the fuel quality, investigations on material- and engine component compatibility, combustion characteristics on the engine test bed and emissions, consumption and drivability on the vehicle dyno. 4. Application in series engine and vehicle technology with methanol blends proved to be equal to current reference fuels in terms of emission and drivability. Additionally, material compatibility was mostly acceptable for the current fleet technology aside from occurrences of permeability with the high pressure pump, which would need further investigation. 5. As per this technical evaluation, M15 is -in principle- applicable in current fleet vehicles considering emissions and drivability. Nonetheless, it could only be generally approved as a drop-in solution with considerable changes, which were identified in this study. As a pure substance gasoline (M100), further investigations towards a Flex-Fuel application would be necessary. 	
19. keywords methanol, short chain alcohols, drop-in fuel, material compatibility, combustion process, emissions, CO2	
20. publisher Not planned	21. price Not planned