

Fachlicher Abschlussbericht

Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energie- wandlungssysteme (tme)

des Verbundvorhabens

MethCar

Methan-Motoren für PKW

unter dem Dach des Leitprojekts



Erzeugung und Einsatz von **Methan** aus erneuerbaren **Quellen**
in mobilen und **stationären** Anwendungen

Ansprechpartner:

Dr. Marco Günther	Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energie- wandlungssysteme (tme)
+49 241 80 48080	Forckenbeckstraße 4
marco.guenther@tme.rwth-aachen.de	52074 Aachen

Förderkennzeichen: 19I18010G

Projektbeginn: 01.09.2018

Laufzeit: 36 Monate

Projektende: 31.08.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf	7
1.1.	Aufgabenstellung.....	7
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	9
1.5.	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	10
1.6.	Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste	11
1.7.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
2.	Verwendung der Zuwendung, Ergebnisse im Vergleich zu Zielen.....	12
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
2.1.1.	Untersuchung Injektorrobustheit.....	12
2.1.2.	Entschwefelungsstrategien Methanmotor.....	22
2.1.3.	Einfluss Methanzahl auf das Vollastverhalten des Motors	38
2.1.4.	Empfehlung Kraftstoffspezifikation	45
2.2.	Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	46
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	46
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	47
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	47
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	47
2.7.	Literaturverzeichnis	48

1 Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf

1.1. Aufgabenstellung

Aufgabe von „MethCar“ ist die Untersuchung der Reduzierungsmöglichkeiten individualverkehrsbedingter CO₂-Emissionen bei der Verwendung von EE*-Methan als Kraftstoff (*EE: „Erneuerbare Energie“: Methan aus erneuerbaren Quellen). Die Minimierung der CO₂-Emissionen soll durch folgende technologische Schritte erreicht werden:

- I. Bereitstellung von attraktiven, neuen Technologien zur großflächigen Nutzung von Methan als Kraftstoff, als Ersatz von Benzin- und Dieselmethan. Gegenüber Benzinbetrieb bringt allein die Verwendung von Methan als Kraftstoff (ohne weitere Optimierung für Methankraftstoff) eine Tank-to-Wheel CO₂-Reduzierung von mehr als 20 % gegenüber Benzin-, bzw. ca. 7 % gegenüber Dieselmobilität.
- II. Weitere Wirkungsgraderhöhung und damit verbundene Tank-to-Wheel CO₂-Reduzierung im höheren einstelligen Prozentbereich durch Optimierung des Motors auf reinen Methanbetrieb; zum einen durch die Ausnutzung der hohen Klopffestigkeit von Methankraftstoffen (spitzendruckfestes Triebwerk, hohes Verdichtungsverhältnis, hoher Ladedruck, hoher Downsizing-Faktor), zum anderen durch die Applikation neuer wirkungsgradsteigernder Technologien, die für Methanmotoren noch nicht serienreif sind (Methan-Direkteinspritzung, Turbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG), kombiniert mit einem vollvariablen, elektrohydraulischen Ventiltrieb auf der Einlassseite).
- III. Untersuchung der Auswirkungen der Kraftstoffzusammensetzung (H₂, Schwefel, Kompressoröl), insbesondere von EE-C-Methan* (* EE-C: „Erneuerbare Energie – Compressed“: Komprimiertes Methan aus erneuerbaren Quellen) auf den erreichbaren Wirkungsgrad und vor allem auf die Funktionalität und Dauerhaltbarkeit der neuen, effizienzsteigernden Komponenten (insbesondere Methan-Direkteinspritzsystem, Katalysator, VTG- Turbolader, Vollvariabler Ventiltrieb). Dabei sollen Erkenntnisse erworben werden, wie neue Komponenten zur maximalen Wirkungsgradsteigerung und zum robusten Erreichen der Fahrzeuglebensdauer auszulegen sind. Gleichzeitig sollen Empfehlungen zur Kraftstoffspezifikation erarbeitet werden, die das Erreichen der Lebensdauer und der Wirkungsgradziele unterstützen.
- IV. Vorbereitung CO₂-neutraler Mobilität (Well-to-Wheel-Basis) mit Methankraftstoffen durch Fokussierung auf EE-C-Methan als Kraftstoff,

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die in diesem Bericht vorgestellten Teilvorhaben wurden durch den Lehrstuhl für mobile Energiewandlungssysteme (TME, seit 1.10.2021), ehemals Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA), einem Institut an der RWTH Aachen, in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durchgeführt. TME konnte auf vorhandene Labore und Werkstatteinrichtungen zurückgreifen.

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte auf Basis des Zuwendungsbescheides durch den Projektträger TÜV Rheinland vom 28.09.2018.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Um die unter 1.1 aufgeführten Ziele zu erreichen, soll in MethCar, ein für EE-C-Methan optimiertes Basistriebwerk aufgebaut und hinsichtlich Leistungsverhalten und Wirkungsgrad untersucht werden. Anhand der Ergebnisse soll das Tank-to-Wheel-CO₂-Reduktionspotenzial von Methan, insbesondere EE-C-Methan, als PKW-Kraftstoff ermittelt werden. Ferner sollen Empfehlungen für die minimale Methanzahl und den maximalen Wasserstoffgehalt von EE-C-Methan abgeleitet werden. Weiterhin sollen aus Ergebnissen von Katalysator-Effizienztests Empfehlungen für den maximalen Schwefelgehalt in EE-C-Methan abgeleitet werden.

Zusätzlich sollen die Effekte und Wechselwirkungen des Kompressorölgehaltes in EE-C-Methan auf das Betriebs- und Verschleißverhalten von Methan-DI-Injektoren untersucht und Grenzwerte empfohlen werden.

Im Einzelnen wurden vom TME folgende spezifischen Ziele formuliert:

- Entwicklung Kompressorölmessverfahren, Beschaffung und Analyse des Kraftstoffs
- Untersuchungen Robustheit des Methan-DI-Injektors (Ölgehalt, H₂-Gehalt)
 - Durchführung von Dauerlaufversuchen zur Ermittlung des Injektorverschleißverhaltens gegebener Injektoren bei Verwendung vorgegebener Gasgemische in einem definierten Betriebspunkt
 - Ableiten von Grenzwerten für H₂ und der zu untersuchenden Spurenelemente (S, Si, Kompressoröl) für die Sicherstellung der Robustheit von Methan-DI-Injektoren im Serieneinsatz
- Einfluss des Schwefelanteils auf Abgasemissionen / Verbrauch
 - Entwicklung eines Messverfahrens für Katalysatoruntersuchungen
 - Entwicklung, Umsetzung und Bewertung von Entschwefelungsstrategien für Abgaskatalysatoren bei Methan-DI-Motoren
 - Messtechnische Erfassung

- des Einflusses der Katalysatoralterung auf Abgasemissionen und Verbrauch am Vollmotor
- des Einflusses der Katalysatoralterung auf die Katalysatoreffizienz
- der Wirksamkeit von Entschwefelungsstrategien auf Abgasemissionen und Verbrauch am Vollmotor
- der Wirksamkeit von Entschwefelungsstrategien auf die Katalysatoreffizienz
 - Bestimmung des Verbrauchs nachteils durch die entwickelten Entschwefelungsstrategien mithilfe von Motorprozesssimulation
- Einfluss der Methanzahl des Kraftstoffes auf das Vollastverhalten des Motors
 - Einfluss auf abnormale Verbrennungsphänomene
 - Einfluss auf Wirkungsgrad
- Berichterstellung
 - Dokumentation der Ergebnisse

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Heutige Erdgasmotoren basieren auf Benzinmotoren und sind nicht konsequent für die Methanverbrennung optimiert. Bereits Erdgas, mit seiner hohen Klopfestigkeit, bietet gegenüber Benzin ein erhebliches Optimierungspotenzial. Dieses kann sowohl Biomethan, als auch via Methanisierung aus elektrolytisch, mit regenerativem elektrischem Strom hergestellten Wasserstoff, erzeugtes „Power-to-Gas-Methan“ (auch E-Methan genannt) sein. Beide Methanarten weisen eine wesentlich höhere Methanzahl als Erdgas auf. Während Erdgas mit einer Mindestmethanzahl von MN 65 spezifiziert ist [5–6], ist die Methanzahl von Biomethan in der Regel im Bereich von 100. Die Methanzahl von Power-to-Gas-Methan liegt theoretisch auch bei 100 (reines Methan) und wird im Grunde nur durch den verbleibenden Restwasserstoffgehalt aus der Methanisierung abgesenkt. Dabei führt jedes Prozent Wasserstoff zu einer Absenkung der Methanzahl um eine Einheit (z. B. 2% H₂-Gehalt senken die Methanzahl auf MN 98) [1-4]. EE-C-Methan weist eine wesentlich höhere Klopfresistenz (höhere Methanzahl) auf als Erdgas, womit es Potential zur Motoroptimierung bietet. Die hohe Klopfestigkeit ermöglicht die Einstellung eines wirkungsgradsteigernden hohen Kompressionsverhältnisses bei gleichzeitig sehr hohem Aufladegrad. Beide Maßnahmen führen zu einer signifikanten Steigerung des Verbrennungsspitzen drucks. Die Spitzendruckfähigkeit heutiger Erdgasmotoren ist allerdings begrenzt, was im Vollastbetrieb eine Spätverstellung des Zündzeitpunktes erfordert, wodurch sich der Motorwirkungsgrad wiederum reduziert und gleichzeitig die Abgastemperatur erhöht wird. Die optimale Ausnutzung der hohen Klopfestigkeit von Methan erfordert eine Anhebung der Spitzendruckfähigkeit des Basistriebwerks auf etwa 180 bar [7], die idealerweise ohne Erhöhung der inneren Motorreibung erreicht wird, was eine Herausforderung für die Motorkonstruktion darstellt.

Im unteren Drehzahlbereich kann eine Gasdirektinblasung (Methan DI) die Füllung erheblich verbessern, indem das Gas nach Einlassschluss, direkt in den Brennraum eingedüst wird. Die dazu erforderlichen Injektoren befinden sich im Entwicklungsstadium und haben besondere Anforderungen an die Gasqualität, die im Einzelnen weiter erforscht werden.

Es ist davon auszugehen, dass EE-C-Methan - im Gegensatz zu Erdgas - keinen natürlichen Schwefel enthält, allerdings aus Sicherheitsgründen auch odoriert werden muss. Dieses wird voraussichtlich, wie bei Erdgas, durch schwefelhaltige Odoriermittel erfolgen. Schwefel lagert sich über die Laufzeit im Katalysator ab und deaktiviert (vergiftet) die aktiven Zentren, was zu einer deutlichen Reduktion der Umsatzrate führt. Bei Ansammlung kritischer Schwefelmengen auf der aktiven Katalysatoroberfläche müssen Strategien entwickelt werden, um den Schwefel auszutragen. Das Austragen des Schwefels findet üblicherweise bei sehr hohen Temperaturen statt, die auch im Teillastbetrieb dargestellt werden müssen. Je höher der Schwefelgehalt des Kraftstoffes ist, desto häufiger muss Schwefel ausgetragen werden, wobei zusätzliche Energie benötigt wird. Dadurch ergibt sich ein Kraftstoffverbrauchsnechtel. Dieser soll abhängig vom Schwefelgehalt quantifiziert werden. Unter Beaufschlagung hoher Temperaturen altern Katalysatoren zudem schneller. Aus den Ergebnissen ist eine Empfehlung für den maximalen Schwefelgehalt im EE-C-Methan abzuleiten.

Durch Kontaminierung mit Kompressoröl, welches während des Verdichtungs Vorgangs in das EE-C-Methan gelangt, kann es zu Störungen des Injektorbetriebs kommen. Zurzeit existiert kein Messverfahren, mit dem am Motorenprüfstand zuverlässig der Ölgehalt im Gas bestimmt werden kann. Dieses soll im Projekt MethCar zusammen mit dem Projektpartner OGE entwickelt werden. Die OGE wird die Messtechnik konstruieren und fertigen. Der Aufbau und die erstmalige Inbetriebnahme mit Kalibrierung und erster Verifikationen erfolgt mit der Unterstützung von OGE im Center for Mobile Propulsion (CMP) der RWTH Aachen University. Anschließend wird mit diesem neu entwickelten Messverfahren der Ölgehalt verschiedener Gase bestimmt und mit dem Verschleißverhalten von Injektoren korreliert. Die akzeptablen Grenzen für einwandfreien Motorbetrieb sind nicht bekannt und unterscheiden sich voraussichtlich je nach Gaszusammensetzung, Ölkonzentration und verwendeter Ölspezifikation. Die Effekte und Wechselwirkungen insbesondere auf das Betriebs- und Verschleißverhalten von Methan-DI-Injektoren sollen untersucht und Grenzwerte empfohlen werden.

Ein wesentlicher Unterschied von EE-C-Methan zu Erdgas besteht im maximalen H₂-Gehalt. Je nach Güte der Methanisierung kann gegebenenfalls deutlich mehr H₂ im EE-C-Methan enthalten sein. Zu hohe H₂-Konzentrationen können zu Wasserstoffversprödung und damit zum vorzeitigen Ausfall von Injektoren führen. Auch diese Effekte sollen untersucht und Grenzwerte empfohlen werden.

1.5. Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es sind von Seiten des TME keine Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens am Lehrstuhl genutzt worden.

1.6. Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste

Die verwendete Fachliteratur kann Kapitel 2.7 „Literaturverzeichnis“ entnommen werden. Besondere Informations- und Kommunikationsdienste wurden nicht in Anspruch genommen.

1.7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Rund um den Konsortialführer Ford-Werke GmbH (Ford) erforschten und entwickelten als Konsortialpartner der Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME), die Open Grid Europe GmbH (OGE), die Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG (Schaeffler), die Vitesco Technologies Group AG, ehemals CPT Group GmbH, (Vitesco) und das Engler-Bunte-Institut, Teilinstitut Verbrennungstechnik, am KIT (KIT EBI vbt) die Komponenten des EE-C-Methanmotors und den Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung eines EE-C-Methans auf den Motorbetrieb, die Abgasnachbehandlung und die Motorkomponenten.

Die verwendeten Direkteinspritzventile für den gasförmigen Kraftstoff wurden von der Firma BorgWarner Inc., ehemals Delphi Technologies, in Unterbeauftragung von Ford bereitgestellt. Im Rahmen der Robustheitsuntersuchungen der Injektoren gegenüber der Kraftstoffzusammensetzung erfolgte hier ein intensiver Austausch.

Im Rahmen der Prüfstanduntersuchungen zur Injektorrobustheit, der Desulfatisierung und dem Methanzahleinfluss am TME erfolgte ein wöchentlicher Austausch zum Fortschritt der Untersuchungen mit dem Projektpartner Ford, um die Ergebnisse zu diskutieren und das weitere Vorgehen abzustimmen.

Im Rahmen der Einbindung der Gasmischstrecke in den Motorprüfstand am TME und den Untersuchungen zur Injektorrobustheit erfolgte ein intensiver Austausch mit dem Projektpartner OGE. Dabei wurden an der Gasmischstrecke mithilfe eines Gasfilters Ölgehaltsmessungen und mit einer Gaskartusche Proben zur Analyse der Gaszusammensetzung entnommen. Diese wurden zum Projektpartner OGE gesandt und dort analysiert. Die Ergebnisse wurden an das TME zurück gespiegelt, um einen Abgleich von Soll- und Istwert der Kraftstoffzusammensetzung zu realisieren. In gemeinsamen Regeltreffen wurden auch hier die Ergebnisse und das weitere Vorgehen abgestimmt. Als Motorlieferant war auch der Projektpartner Ford in diesen Terminen mitvertreten.

2. Verwendung der Zuwendung, Ergebnisse im Vergleich zu Zielen

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1. Untersuchung Injektorrobustheit

In den vom TME zu bearbeitenden Arbeitspaketen sollen mithilfe von Dauerlaufversuchen das Verschleißverhalten von Gas-DI-Injektoren beurteilt werden. Im Hinblick auf das Ziel, Erdgas sukzessive durch CO₂-neutrales EE-C-Methan zu ersetzen und Wasserstoff dem EE-C-Methan beizumengen, sowie dem voraussichtlich weiteren Vorkommen kritischer Spurenelemente (S, Siloxan, Kompressoröl) sind Grenzwerte für die einzelnen Stoffanteile erforderlich, um die Haltbarkeit kraftstoffführender Komponenten sicherzustellen. In Arbeitspaket 2.3 (Untersuchungen Robustheit Injektor (Ölgehalt, H₂-Gehalt)) soll mithilfe von Dauerläufen mit verschiedenen Kraftstoffzusammensetzungen eine Datenbasis bereitgestellt werden, um die Abhängigkeit der Injektorrobustheit von den einzelnen Stoffen darzustellen. Nach der Analyse der verwendeten Injektoren, werden Verschleißspuren bewertet und Grenzwerte definiert, die zur Sicherstellung der Dauerhaltbarkeit von Methan-DI-Injektoren bei Verwendung unterschiedlicher Gasqualitäten dienen sollen.

Um den Verschleiß der Injektoren im laufenden Motorbetrieb zu bewerten, wurde die Einspritzdauer der Injektoren überwacht und ein Verschleißkriterium festgelegt. Dieses wurde definiert zu einer 3 % Steigerung der Einspritzdauer im Vergleich zum Beginn des Dauerlaufes über einen Zeitraum von 30 Minuten ohne Änderung im Kraftstoffmassenstrom. Die Überwachung des Verschleißkriteriums erfolgte im Motorbetrieb über ein Kennfeld, in dem die Einspritzdauer über dem Kraftstoffmassenstrom aufgetragen ist. In einem stationären Betriebspunkt ist eine steigende Einspritzdauer bei gleichbleibenden Kraftstoffmassenstrom ein Indikator für Injektorverschleiß. Die Messwerte für Einspritzdauer und Kraftstoffmassenstrom werden alle 30 Minuten mit den im Kennfeld hinterlegten Werten verglichen. Sollte eine Abweichung von mehr als 3 % vorliegen wird ein Zähler auf 1 gesetzt. Sollten die Messwerte bei der erneuten Prüfung nach 30 Minuten wieder um größer 3 % außerhalb des Kennfeldes liegen und der Zähler auf 1 stehen, wird der Motor automatisiert heruntergefahren.

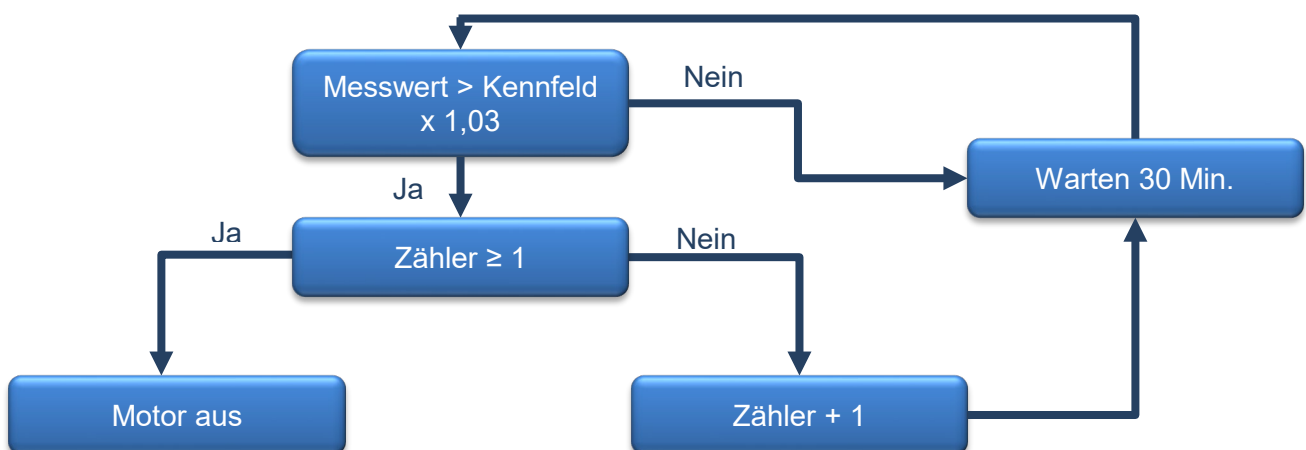


Abbildung 1 Ablaufplan zur Überprüfung des Abbruchkriteriums

Die Einstellung der Kraftstoffzusammensetzung erfolgt über eine Gasmischstrecke, die vom Projektpartner OGE zur Verfügung gestellt wurde, Abbildung 2. Diese wurde am Motorprüfstand in Betrieb genommen und auf den Einsatz am Prüfstand optimiert.

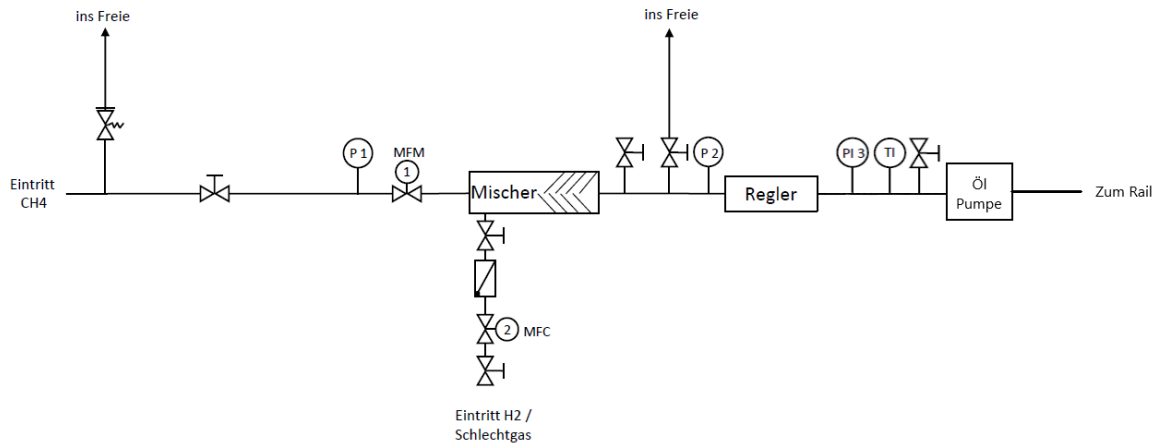


Abbildung 2 Schaltplan Gasmischstrecke

Als Modellkraftstoff dient Methan mit einer Reinheit von

$$\varphi_{CH_4, \text{Kraftstoff}} = 99 \text{ mol} - \%$$

Zu diesem können über einen Nebenstrom an der Gasmischtafel anteilig Wasserstoff oder Schlechtgase (mit Siloxan oder Schwefel versetztes Methan) zu dosiert werden. Hierbei dient eine Massendurchflussmessung des Methanmassenstroms als Führungsgröße und ein Massenstromregler im Nebenstrom regelt in Abhängigkeit der Führungsgröße den notwendigen Nebenstrom ein. Dadurch kann unabhängig vom Betriebspunkt eine konstante Kraftstoffzusammensetzung gewährleistet werden.

Weiterhin kann über die Gasmischstrecke ein definierter Ölmassenstrom in den Kraftstoffmassenstrom eingebracht werden. Dies wird durch eine HPL-Pumpe (High Pressure Liquid Pumpe) von Eldex Laboratories Inc. realisiert, die das Öl aus einem Öltank fördert. Das Öl wird bei dieser Methode direkt in den Kraftstoffmassenstrom dosiert. Die HPL-Pumpe fördert einen einstellbaren Ölvolumenstrom und wurde über eine serielle Schnittstelle angesteuert. Dadurch konnte die Ölmenge in Abhängigkeit des Kraftstoffmassenstromes über das Prüfstandsautomatisierungssystem eingestellt und ein konstanter Ölgehalt des Kraftstoffes in jedem Betriebspunkt sichergestellt werden. Um zu gewährleisten, dass das einzige im Kraftstoff befindliche Öl, jenes ist, welches über die HPL-Pumpe zu dosiert wurde, wurde der Kraftstoff vor Eintritt in die Gasmischstrecke über einen Aktivkohlefilter und einen Staubfilter gereinigt. Dadurch wird das möglicherweise im Kraftstoff befindliche Öl herausgefiltert.

Die Erkenntnisse aus dem Versuchsaufbau haben gezeigt, dass die Wegstrecke, die das Öl zum Injektor zurücklegen muss und die Abweichungen von der idealen Rohrgeometrie, sowie Querschnittsänderungen, auf ein Minimum reduziert werden müssen, um einen Transport des Öls zu den Injektoren sicherzustellen. Die Dosierstelle des Öls wurde deshalb so weit, wie es der Motoraufbau zulässt, vor der Kraftstoffverteilerleiste (genannt: Kraftstoffrail) des Motors positioniert.

Um eine direkte Aussage am Prüfstand über die Menge des dosierten Öls und damit eine Aussage über die eingestellte Ölbeladung treffen zu können, wurde der Öltank der HPL-Pumpe vor und nach einem Messintervall von 8 Stunden mit einer Waage gewogen, die eine Auflösung von

$$\text{Auflösung Waage} = 10 \text{ mg}$$

aufweist. Die Massendifferenz entspricht der dosierten Ölmenge über die HPL-Pumpe innerhalb des 8 Stunden Intervalls. Die gemessene Massendifferenz wird mit der, aus dem Kraftstoffmassenstrom und der Soll-Ölbeladung berechneten, theoretischen Ölmasse verglichen. Dadurch wurde ein Soll-Ist-Abgleich am Prüfstand durchgeführt.

Untersuchungen bezüglich der Genauigkeit der Öldosierung mit der HPL-Pumpe im Prüfstandbetrieb haben ergeben, dass die optimierte Öldosierung mithilfe einer Hochdruck-Flüssigkeitspumpe (HPL-Pumpe) im Motorbetrieb eine hinreichende Genauigkeit bezüglich Soll- und Istwert unabhängig von der eingestellten Ölmenge zeigte. Der Istwert wurde über eine gravimetrische Rückmessung des Ölverlustes aus dem Öltank gemessen.

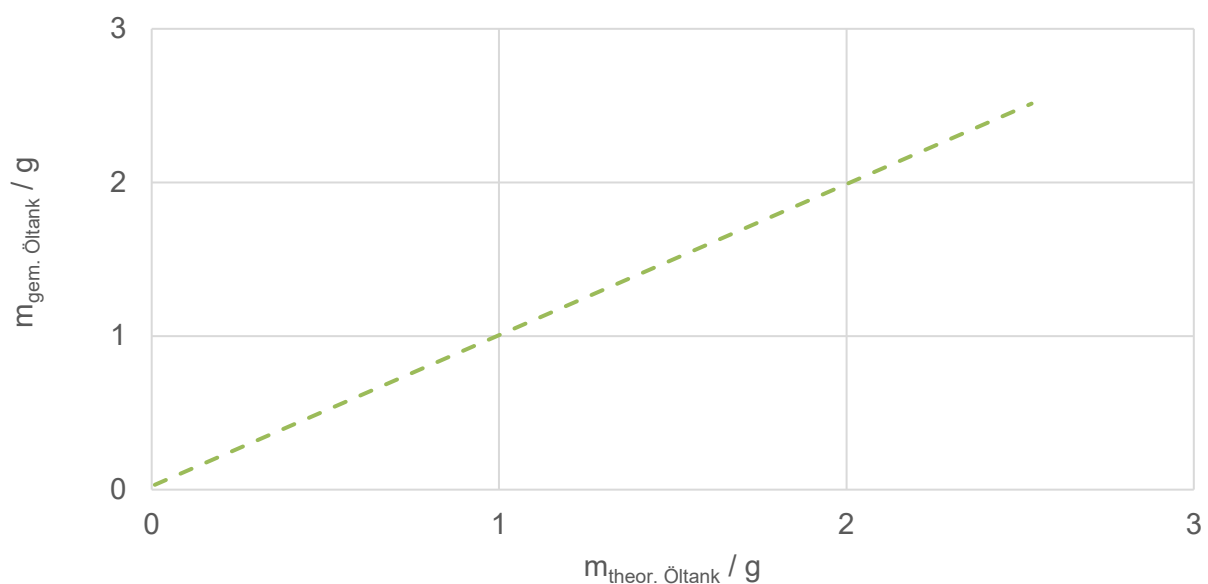


Abbildung 3 Korrelation von Soll- und Istwert HPL-Pumpe

Soll- und Istwert korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von

$$R_{Pumpe}^2 = 0,945$$

im Motorbetrieb unter Berücksichtigung aller Messreihen der Verschleißuntersuchungen, Abbildung 3. Die Zeitdifferenz zwischen Start der Dosierung und Einstellung der Ziel-Ölbeladung am Injektor ist durch den Effekt der Wandbenetzung und Abscherung des Öls von der Rohrwand durch den Gasmassestrom bedingt. Wenn sich ein Gleichgewicht zwischen Wandauftrag und Abscherung in der gesamten Strecke zwischen Dosierstelle und Injektor einstellt, liegt die Ziel-Ölbeladung am Injektor vor. Um diesen Zeitpunkt zu ermitteln wurde das Rohrstück zwischen Dosierstelle und Injektor jeweils in einem Zeitintervall von

$$t_{grav} = 10 \text{ min}$$

, auf der zuvor erwähnten Waage, gewogen. Dazu wurde der stationäre Motorbetriebspunkt der Verschleißuntersuchungen bei konstanter Ölbeladung des Kraftstoffes von

$$x_{\text{öl,grav.}} = 25 \frac{mg_{\text{öl}}}{kg_{\text{Kraftstoff}}}$$

eingestellt. Der Zeitpunkt an dem zwischen zwei Messungen auf der Waage keine Differenz mehr feststellbar war beziehungsweise die Schwankungen im Bereich der Messungenauigkeiten lagen, befindet sich beim gewählten Betriebspunkt bei

$$\Delta t_{\text{öl am Injektor}} = 70 \text{ min}$$

, Abbildung 4.

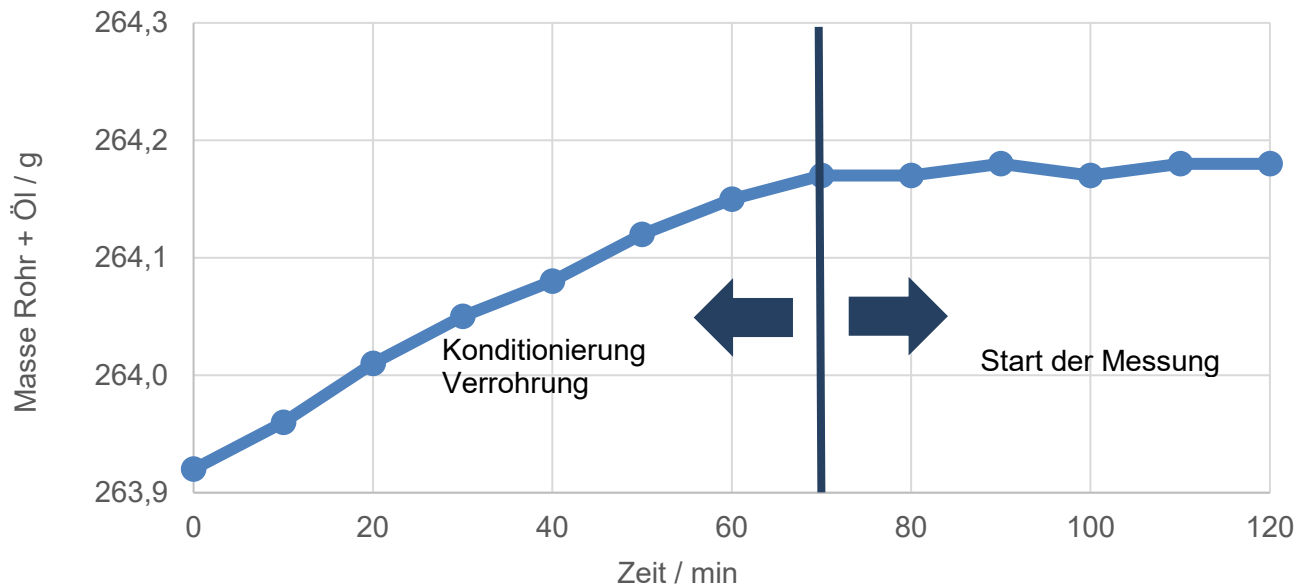


Abbildung 4 Öl-Wandauftrag Kraftstoffverrohrung während Motorbetrieb

Dementsprechend wurde vor jeder Verschleißuntersuchung mit einer unterschiedlichen Ölbeladung die Verrohrung mit Cyclohexan gereinigt, sodass keine Ölrückstände mehr vorhanden sind und anschließend der Motor mit der definierten Ölbeladung für

$$t_{\text{Kondi}} = 2 \text{ Stunden}$$

konditioniert. Dies sollte sicherstellen, dass zu Beginn des Verschleißtests die eingestellte Ölbeladung am Injektor vorliegt. Ferner sollte eine Methode zur Rückmessung des Ölgehaltes im Kraftstoff am Prüfstand etabliert werden. Dazu wurde ein Messfilter, Abbildung 5, verwendet, in dem das Öl im Gas aufgefangen wurde.



Abbildung 5 Messfilter zur Ölrückmessung

Der Messfilter wurde zwischen der Dosierstelle der HPL-Pumpe und dem Kraftstoffrail des Motors verbaut, Abbildung 6, und für eine Stunde mit dem Kraftstoff und der eingestellten Ölbeladung durchströmt, anschließend demontiert, verschlossen und beim Projektpartner OGE mittels Gaschromatographie analysiert, um die gefangene Ölmasse zu bestimmen. Die Ergebnisse der Analyse wurden an das TME zurück gespiegelt, um eine Aussage über das tatsächlich im Gas befindliche Öl zu erlangen. Weitere

Details zur Analyse der Filtermessung mittels Gaschromatographie können Sie dem Abschlussbericht des Projektpartners OGE entnehmen.

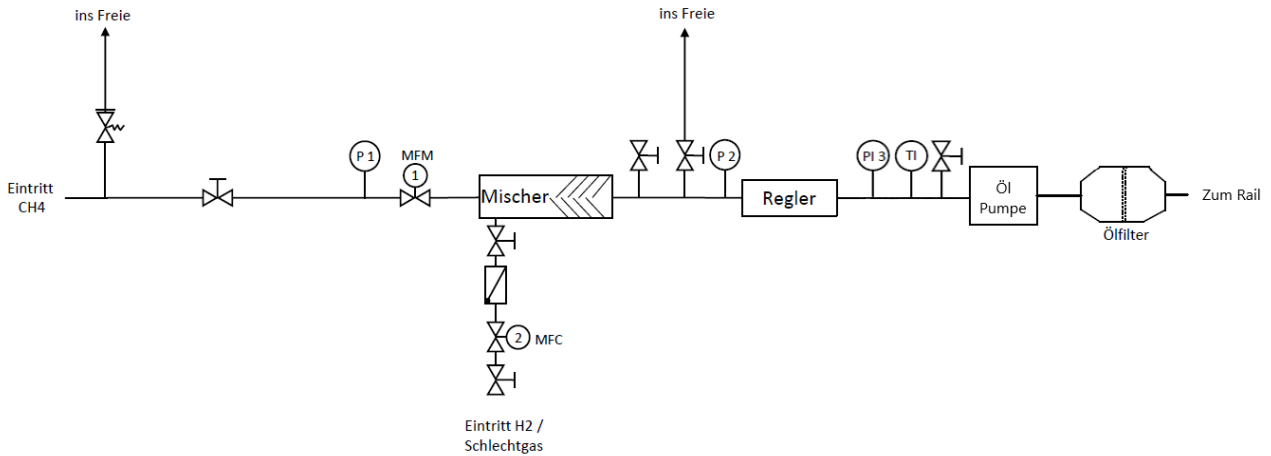


Abbildung 6 Schaltplan umgebaute Gasmischstrecke mit Ölrückmessung

Die Rückmessung des Ölgehaltes über den Ölfilteraufbau zeigt keine hinreichende Korrelation auf, da das Bestimmtheitsmaß mit

$$R_{GC}^2 \text{ zu grav. Rückmessung} = 0,503$$

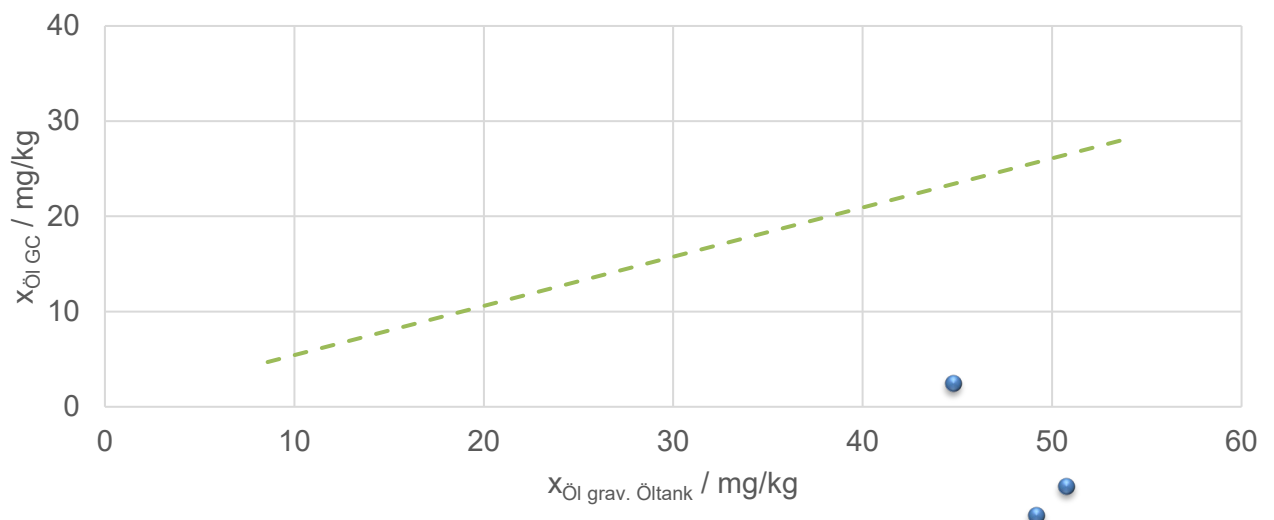


Abbildung 7 Korrelation GC-Rückmessung zu gravimetrischer Rückmessung Öltank

Dies zeigt, dass die Messung eines Realgases, von dem der Ölgehalt nicht bekannt ist, mit dem Ölfilteraufbau und der gaschromatographischen Auswertung im Motorbetrieb nicht reproduzierbar möglich

ist. Das bedeutet, dass ein Messverfahren für den Kompressorölgehalt eines Gases am Motor nicht mit ausreichender Korrelation dargestellt werden konnte.

Die Verschleißuntersuchungen wurden bei einer Motordrehzahl von

$$n = 4000 \text{ 1/min}$$

und einem effektiven Mitteldruck von

$$p_{me} = 5.4 \text{ bar}$$

durchgeführt. Der Injektor führt in diesem Betriebspunkt 2 Einspritzungen pro Motorzyklus durch, um die Belastung in der Testlaufzeit zu verdoppeln. Dies führt bei einer Testlaufzeit von 100 Stunden zu

$$Z_{\text{Arbeitsspiele Injektor}} = 12.000.000$$

Arbeitsspielen des Injektors. Um den Verschleiß des Injektors weiter zu erhöhen, wurde der Kraftstoffdruck auf

$$p_{\text{Kraftstoff}} = 6 \text{ bar}$$

gesetzt. Der geringe Kraftstoffdruck führt beim Schließen des Injektors dazu, dass die Injektornadel schneller in den Sitz zurückfährt, was zu einem erhöhten Verschleiß führt. Dies ist nicht vergleichbar mit dem realen Motorbetrieb, erlaubt allerdings eine Robustheitsuntersuchung im Motorprüfstand mit akzeptabler Laufzeit. Die gewählte Laufzeit von 100 Stunden ist nicht ausreichend, um die Dauerhaltbarkeit für Serienkomponenten vollständig abzusichern, ermöglicht jedoch eine Trendaussage über den Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf den Verschleiß. Nach Abschluss der Dauerlaufversuche wurden die Injektoren zu BorgWarner für eine detaillierte Verschleißanalyse gesandt, welche weitere Schlüsse hinsichtlich der Robustheit der Injektoren zulässt.

Mit dem reinen Modellkraftstoff Methan zeigen die Injektoren eine unzureichende Lebensdauer im Verschleißtest, da das Laufzeitziel von 100 Stunden nicht erreicht werden konnte, Abbildung 8. Der Vergleich mit einem marktüblichen CNG – Kraftstoff mit folgender Zusammensetzung

$$\psi_{\text{CNG, CH}_4} = 0,9303$$

$$\psi_{\text{CNG, C}_2\text{H}_6} = 0,0622$$

$$\psi_{\text{CNG, C}_3\text{H}_8} = 0,0033$$

$$\psi_{\text{CNG, C}_4\text{H}_{10}} = 0,0013$$

$$\psi_{\text{CNG, C}_5^+} = 0,0029$$

zeigt sich eine um 50 % höhere Lebensdauer der Injektoren, die aber ebenfalls noch unzureichend ist, Abbildung 8. Diese erhöhte Lebensdauer wird durch die langkettigen Kohlenwasserstoffe im CNG-Kraftstoff bewirkt, weil diese eine bessere Schmierwirkung des Gases im Injektor im Vergleich zum Modellkraftstoff bewirken. Das bedeutet, dass eine Applikation einer Injektorschmierung, durch eine Öldosierung im jetzigen Entwicklungsstand, unerlässlich ist, um vorzeitigen Injektorverschleiß zu verhindern. Die Ergebnisse der Injektorverschleißtests mit unterschiedlichen Ölgehalten des Modellkraftstoffes Methan haben gezeigt, dass eine Ölbelastung von

$$x_{\text{Öl,grav.,ausreichend}} = 18,6 \frac{\text{mgÖl}}{\text{m}^3 \text{Methan}}$$

nötig ist, um eine ausreichende Laufzeit im Verschleißtest von 100 Stunden zu erreichen, Abbildung 8. Geringere Ölbelastungen bis zu

$$x_{\text{Öl,grav.,unzureichend}} \leq 15 \frac{\text{mgÖl}}{\text{m}^3 \text{Methan}}$$

führen zum Erreichen des Verschleißkriteriums vor Erreichen des Laufzeitziels von 100 Stunden. Die Injektoren, die mit Kraftstoff mit dem ausreichenden Ölgehalt betrieben wurden, zeigen nach Analyse des Projektpartners BorgWarner keine Auffälligkeiten hinsichtlich Verschleiß. Daher wird ein Grenzwert für den Ölgehalt des Kraftstoffes von

$$\phi_{\text{Öl, Grenzwert}} \leq 18,6 \frac{\text{mgÖl}}{\text{m}^3 \text{Kraftstoff}}$$

empfohlen. Ziel für eine Serienanwendung muss jedoch ein robuster ölfreier Betrieb des Injektors sein. Dies bietet eine Grundlage für nachfolgende Forschungsprojekte.

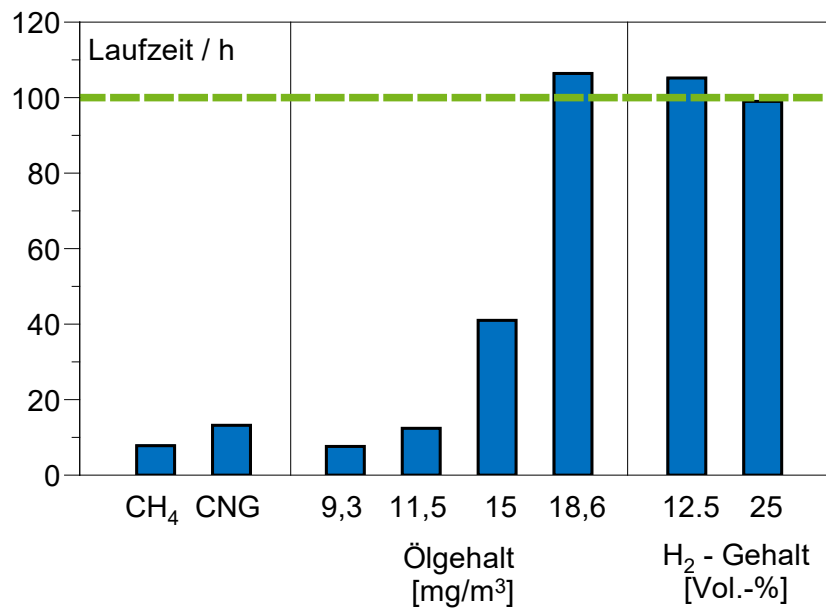


Abbildung 8 Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf den Injektorverschleiß (n = 4000 1/min, p_{me} = 5.4 bar, Doppelspritzung)

Die Laufzeit der Injektoren bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums ist bei gleicher dosierter Ölmenge bei einer Änderung der Kraftstoffzusammensetzung ab einem H₂-Stoffmengenanteil

$$\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = \frac{n_{\text{H}_2}}{n_{\text{H}_2} + n_{\text{CH}_4}} = 0,25$$

geringer. Das bedeutet, dass erst bei einer Steigerung des Wasserstoffvolumenanteils auf einen Anteil größer Faktor 10 im Vergleich zum aktuell erlaubten Wasserstoffvolumenanteil laut Gasnorm ($\psi_{\text{H}_2, \text{Norm}} = 2 \text{ Vol. - \%}$) eine Änderung der Haltbarkeit feststellbar ist. Der Laufzeitunterschied von

$$\Delta t_{\text{Laufzeitziel-Abbruch}} = - 1,03 \text{ Stunden} \hat{=} - 1,03 \%$$

ist nicht signifikant, sodass bei einem einzelnen Testlauf als Stichversuch keine Aussage über den Einfluss des Wasserstoffanteils zulässig wäre, Abbildung 8. Fertigungsbedingte Schwankungen der Bauteilqualität (Fertigungstoleranzen) können ebenfalls zu einem vorzeitigen Verschleiß des Injektors führen. Bei geringeren Wasserstoffvolumenanteilen von

$$\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = \frac{n_{\text{H}_2}}{n_{\text{H}_2} + n_{\text{CH}_4}} = 0,125$$

ist kein Einfluss auf den Injektorverschleiß feststellbar. Alles in allem kann daher aus den Untersuchungen zur H₂-Zumischung kein negativer Einfluss des H₂-Stoffmengenanteils bis $\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = 0,25 \%$ nachgewiesen werden. Ein Einfluss des Siloxangehalts des Kraftstoffes von

$$\xi_{\text{Siloxan}} = 4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

zeigte ebenfalls keinen negativen Effekt auf die Haltbarkeit der Injektoren, da die schädliche Sandbildung erst während der Verbrennung stattfindet. Eine Befundung des Motors nach Ausbau aus dem Prüfstand hat jedoch gezeigt, dass sich auf den Kolbenoberflächen weiß-graue Ablagerungen bilden, Abbildung 9. Dies ist bedingt durch die Sandbildung während der Verbrennung.



Abbildung 9 Kolbenkrone mit partiell weiß-grauen Ablagerungen

Dieselben Ablagerungen zeigen sich im Auslasskanal der Zylinder, Abbildung 10.



Abbildung 10 weiß-graue Ablagerungen in den Auslasskanälen

Da die schädliche Sandbildung durch die Verbrennung von Siloxan erst im Brennraum stattfindet, bedingt ein erhöhter Siloxangehalt keine verringerte Lebensdauer der Injektoren. Eine Schädigung des Motors ist aber definitiv möglich, weshalb ein Grenzwert von

$$\phi_{\text{Siloxan, Grenzwert}} = 0 \text{ Vol. -\%}$$

empfohlen wird. Weitere Informationen zu den Verschleißbildern der Injektoren in Abhängigkeit der Kraftstoffzusammensetzung können dem Abschlussbericht des Projektpartners Ford entnommen werden.

Zusammenfassend wurden, entsprechend der Zielsetzung, die Dauerlaufversuche durchgeführt und es konnten die angestrebten Grenzwerte für Öl im Kraftstoff und Siloxan definiert werden. Bezüglich einer Beimischung von Wasserstoff wurde bei den einstellbaren Volumenanteilen kein signifikant nachteiliger Einfluss auf den Bauteilverschleiß der Injektoren festgestellt. Ein Messverfahren zur Rückmessung des Ölgehaltes konnte nicht mit ausreichender Korrelation dargestellt werden.

2.1.2. Entschwefelungsstrategien Methanmotor

Der zweite angestrebte Fortschritt ist die Entwicklung, Umsetzung und Bewertung von Entschwefelungsstrategien für Abgaskatalysatoren und die simulationsbasierte Bestimmung des Kraftstoffmeherverbrauchs durch die Katalysatorregenerationsmaßnahmen. Die simulationsbasierte Bestimmung des Kraftstoffmeherverbrauchs wurde beim Projektpartner Ford durchgeführt.

Die hohe Stabilität des Methanmoleküls in Kombination mit der Möglichkeit wirkungsgradoptimierte Verbrennungsschwerpunkte zu wählen, stellt die Abgasnachbehandlung vor besondere Herausforderungen. Aufgrund der frühen Schwerpunktlage sinkt die Abgasenthalpie und es stehen nur geringe Temperaturen für die Regeneration des Katalysators zur Verfügung. Die mögliche Schwefelbeladung des Kraftstoffes (fossile Quellen, Odorierung) führt zu einer Vergiftung und somit einer Abnahme der Effizienz des Abgaskatalysators.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2.5 sind Strategien entwickelt worden, die trotz der geringen Abgas Temperaturen beim Erdgasbetrieb eine Regeneration des Katalysators ermöglichen. Final steht eine breite Datenbasis für verschiedene Regenerationsstrategien zur Verfügung und die aussichtsreichsten Strategien sind hervorgehoben. Weiterhin wird ein Grenzwert für den zulässigen Schwefelgehalt in EE-C-Methan vorgeschlagen.

Zur Ermittlung des Katalysatorwirkungsgrades bezüglich der Umsetzung von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Stickoxiden werden die Emissionen jeweils vor und nach Katalysator gemessen. Die Messung der Stickoxide wird mit einem Chemilumineszenzdetektor (CLD), Kohlenmonoxid mit einem nicht-dispersiven Infrarotspektrometer (NDIR) und Kohlenwasserstoffe mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) durchgeführt. Die Messung der Spezies vor und nach Katalysator erlaubt die Berechnung des Katalysatorwirkungsgrad bezüglich jeder gemessenen Spezies

$$\eta_{i,\text{Katalysator}} = \frac{\psi_{i,\text{vor Katalysator}} - \psi_{i,\text{nach Katalysator}}}{\psi_{i,\text{vor Katalysator}}}$$

mit ψ_i = Stoffmengenanteil Spezies i im Abgas

im eingestellten Betriebspunkt. Ziel im Motorbetrieb ist es einen Katalysatorwirkungsgrad jeder Spezies von

$$\eta_{i,\text{Katalysator}} > 95 \%$$

zu erzielen. Durch den Eintrag von Schwefel in den Katalysator werden die aktiven Zentren des Katalysators von Schwefelverbindungen, besetzt, die während der Verbrennung entstehen. Daraus resultiert ein geringerer Katalysatorwirkungsgrad bezüglich der unterschiedlichen Abgasspezies. Um im gesamten Motorbetrieb ausreichend hohe Katalysatorwirkungsgrade aller Spezies und damit niedrige Abgasemissionen zu gewährleisten, muss unterhalb eines bestimmten Katalysatorwirkungsgrades einer einzelnen Spezies der Katalysator regeneriert werden. Dieser Grenzwert wurde im Projekt zu

$$\eta_{i,\text{Katalysator,Limit}} < 90 \%$$

gesetzt. Zur Entwicklung von Desulfatisierungsstrategien wurden 4 Betriebspunkte aus dem Kennfeld des EE-C-Methanmotors ausgewählt, Tabelle 1.

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4
n [1/min]	1200	1500	2000	2500
p _{me} [bar]	1	2,62	9	14

Tabelle 1 Betriebspunkte für Entwicklung Desulfatisierungsstrategie

Diese Betriebspunkte wurden beim Projektpartner Ford hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches optimiert. In den Betriebspunkten liegen, aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Last und Drehzahl, unterschiedliche Abgastemperaturen und damit unterschiedliche Katalysatortemperaturen vor. Dies führt zu unterschiedlichen Katalysatorwirkungsgraden der Abgasspezies in den unterschiedlichen Betriebspunkten, Abbildung 11.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

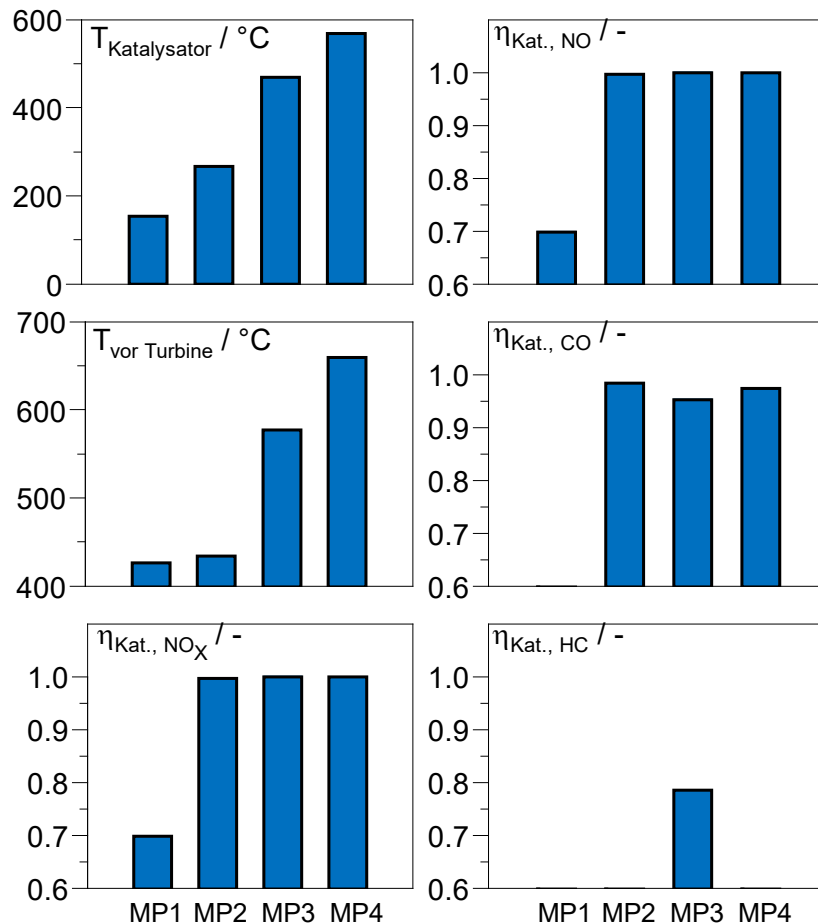
 $\lambda_{\text{mean}} = 1.0$, $T_{\text{Kühlmittel}} = 90 \text{ °C}$ 

Abbildung 11 Temperaturen und Konvertierung in Standardbetriebspunkten

Bezüglich der Stickoxide und Kohlenstoffmonoxid sind die Katalysatorwirkungsgrade in MP 2 bis MP 4 ausreichend. Die Katalysatorwirkungsgrade der Kohlenwasserstoffe sind in allen Betriebspunkten unzureichend. Die Kohlenwasserstoffe im Abgas eines EE-C-Methanmotors bestehen zum Hauptteil aus unverbranntem Methan. Methan ist ein sehr unreaktiver Kraftstoff, was zum einen eine hohe Klopfestigkeit bedingt andererseits auch hohe Katalysatortemperaturen für die Katalyse unabdingbar macht. Für ausreichend hohe Katalysatorwirkungsgrade der Kohlenwasserstoffe, ist eine Katalysatortemperatur von

$$T_{\text{Katalysator, Konvertierung}} > 500 \text{ °C}$$

notwendig. Der Vergleich der Betriebspunkte in Abbildung 11 zeigt, dass für einen ausreichenden Katalysatorwirkungsgrad in MP 1 und MP 2 die Katalysatortemperatur deutlich angehoben werden muss. Das mittlere Lambda ist ebenfalls eine Optimierungsgröße und muss in einem engen Bereich eingeregelt werden, um hohe Katalysatorwirkungsgrade aller Spezies im Motorbetrieb zu realisieren. Ein zu hohes mittleres Lambda bedingt eine Steigerung der Stickoxidemissionen aus der Verbrennung, die im

Katalysator nicht mehr reduziert werden können. Bei einem zu geringen Lambda steigen die Kohlenstoffmonoxidemissionen aus dem Verbrennungsprozess erheblich an. Diese können dann aufgrund nicht ausreichendem Sauerstoff am Katalysator nicht mehr vollständig umgesetzt werden. Abbildung 12 zeigt, dass das mittlere Lambda bis kurz vor dem Durchbruch der Stickstoffdioxid und –monoxidemissionen gesteigert werden muss, um ausreichend hohe Katalysatorwirkungsgrade von Kohlenstoffmonoxid zu erzielen. Erst kurz vor dem Durchbruch der Stickoxidemissionen und damit dem Abfall des Katalysatorwirkungsgrades ist ausreichend Sauerstoff im Abgas vorhanden, um die Kohlenstoffmonoxidemissionen mit ausreichend hohem Katalysatorwirkungsgrad zu oxidieren. Dies begrenzt den optimalen Betriebsbereich für hohe Katalysatorwirkungsgrade aller Abgasspezies auf einen Bereich des mittleren Lambdas um

$$\lambda_{opt.} = 1.004 - 1.009$$

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

$p_{me} = 14 \text{ bar}$, $T_{Kühlmittel} = 90 \text{ °C}$, $n = 2500 \text{ 1/min}$

IVO = 360 °KW nZOT, IVC = 590 °KW nZOT

$T_{nLLK} = 40 \text{ °C}$, $p_{Kraftstoff} = 16 \text{ bar}$, $\alpha_{50} = 8 \text{ °KW nZOT}$

$\lambda_{wob,Peak} = 1.05$, $\lambda_{Spindt} = 1.0$, $\Delta t_{wob,lean} = 1 \text{ s}$, $\Delta t_{wob,rich} = 15 \text{ s}$

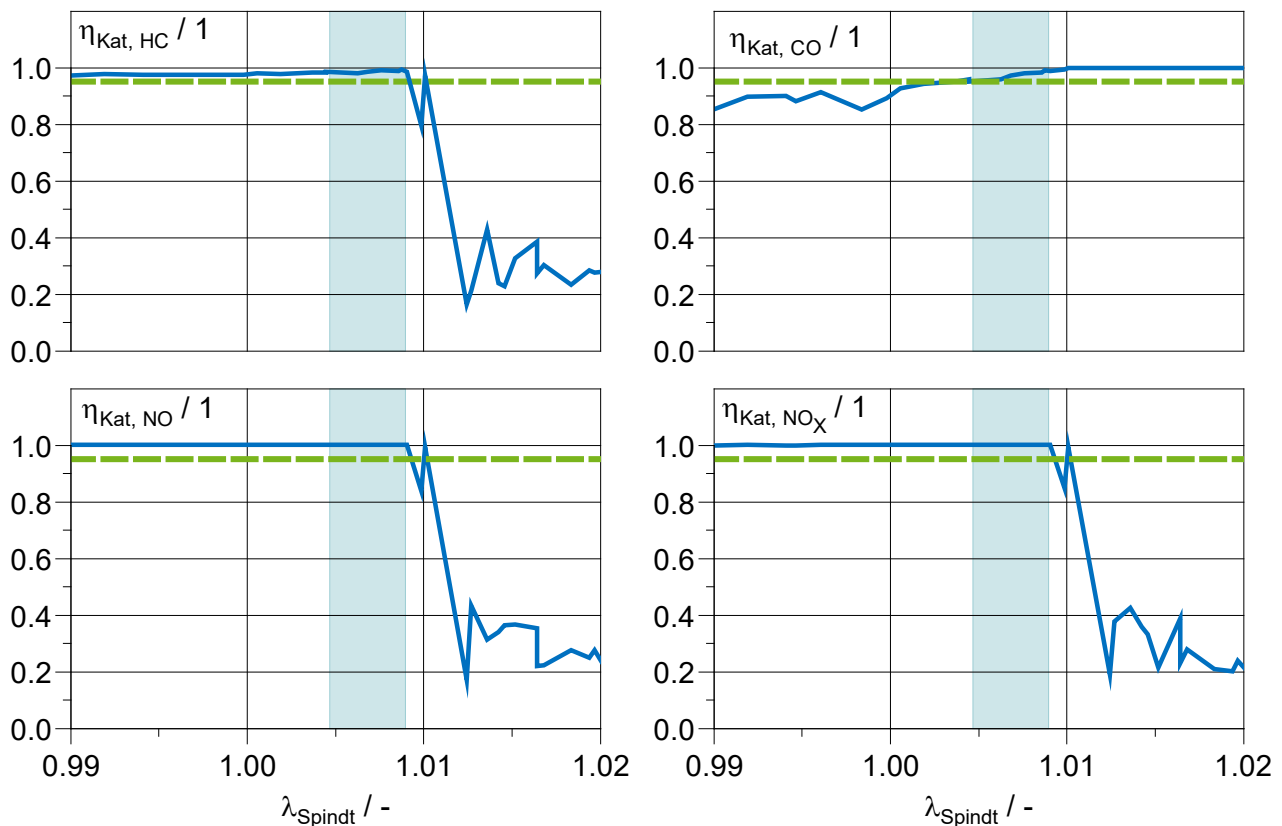


Abbildung 12 Einfluss mittleres Lambda auf Katalysatorwirkungsgrad

Mithilfe von motorischen Maßnahmen kann die Katalysatortemperatur in den Betriebspunkten MP 1 und MP 2 erheblich angehoben werden. Dies kann durch auf maximale Abgastemperatur abgestimmte

Ventilsteuerzeiten, Zündwinkelspätverstellung zur Erhöhung der Abgastemperatur oder einen Lambdasplit zwischen den Zylindern realisiert werden. Mithilfe des Lambdasplits wird auf den unterschiedlichen Zylindern ein unterschiedliches Verbrennungsluftverhältnis (Lambda) eingestellt, was durch eine unterschiedliche Dosierung des Kraftstoffes auf die einzelnen Zylinder realisiert wird. Die fetten und mageren Abgasströme führen in der Abgasanlage zu einer exothermen Reaktion im Katalysator, wodurch dessen Temperatur gesteigert werden kann. Im Gegensatz zur Spätverstellung der Zündung ist der Lambdasplit vorzuziehen, da hier der Nachteil im effektiven Wirkungsgrad des Motors zur Erzielung der notwendigen Katalysatortemperatur geringer ist. Exemplarisch zeigt Abbildung 13 das Potenzial des Lambdasplits zur Steigerung der Katalysatortemperatur. Dadurch kann das Verbrennungsluftverhältnis von Zylinder 2 auf bis zu 1.6 angehoben werden. Der Lambdawert auf den anderen beiden Zylindern ergibt sich in Abhängigkeit des Lambdawertes auf dem mageren Zylinder 2. Zylinder 1 und 3 gleichen durch ein kraftstoffreicheres Gemisch das magere Verbrennungsluftverhältnis auf Zylinder 2 aus, sodass sich der mittlere eingestellte Lambdawert ergibt.

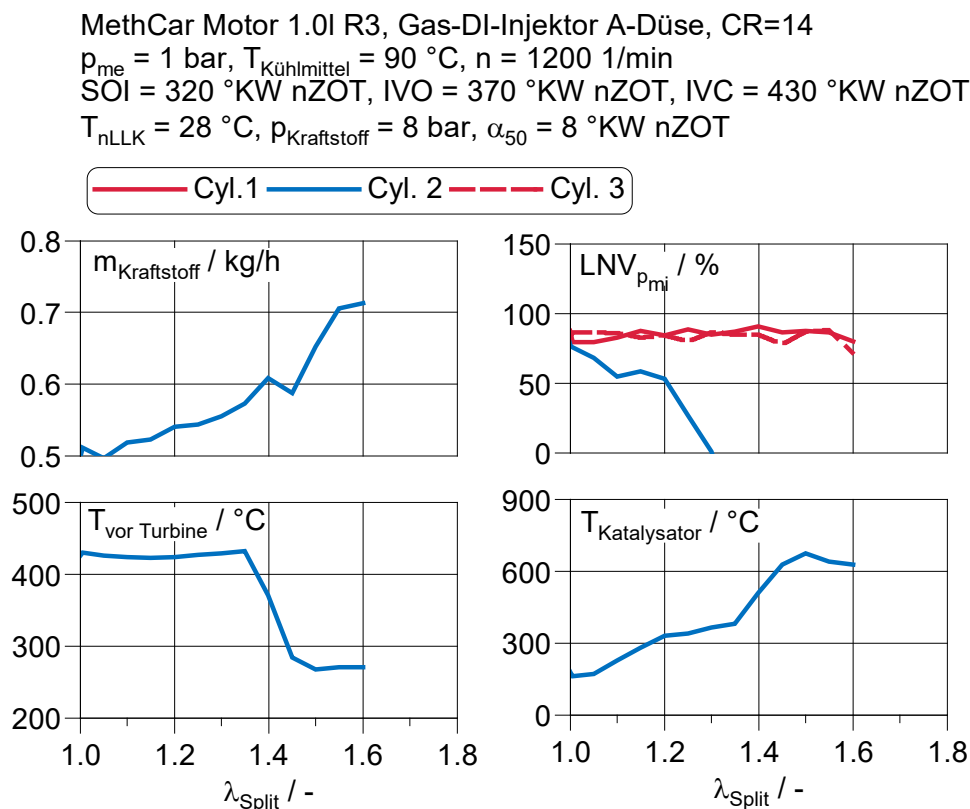


Abbildung 13 Einfluss Lambdasplit auf Katalysatortemperatur

Dadurch sind Steigerungen der Katalysatortemperatur bei stabilem Motorbetrieb um bis zu 330 °C möglich, die mit einem Kraftstoffmeherverbrauch von 23 % einhergehen. Ein höherer Lambdasplit führt zu Zündaussetzern auf dem mager verstimten Zylinder 2, da die Zündgrenzen von Methan erreicht werden. Da die Stabilität des Betriebspunktes ebenfalls in die Entwicklung der Desulfatisierungsstrategie miteinbezogen wurde, ist der maximal mögliche Lambdasplit begrenzt. Die Stabilität des Motorbetriebs wird mit den Größen

$$LNV_{p_{mi}} = \frac{\text{kleinster indizierter Mitteldruck eines Zyklus innerhalb einer Messung}}{\text{Mittelwert des indizierten Mitteldrucks aller Zyklen innerhalb einer Messung}} > 70 \%$$

und

$$\sigma_{p_{mi}} = \text{Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks in einer Messung} < p_{mi} * 0,05$$

bestimmt. Diese begrenzen folglich auch die maximal erreichbare Erhöhung der Katalysatortemperatur durch einen Lambdasplit. Eine weitere Steigerung der Katalysatortemperatur ist über eine zusätzliche Spätverstellung der Zündung auf den Zylindern erreichbar.

Weiterhin muss für die Konvertierung der Kohlenwasserstoffe Sauerstoff im Katalysator eingelagert sein, um diese oxidieren zu können. Ist kein Sauerstoff mehr im Katalysator vorhanden, sinkt der Katalysatorwirkungsgrad der Kohlenwasserstoffe beträchtlich ab, unabhängig von der Katalysatortemperatur. Um Sauerstoff in einem stationären Betriebspunkt in den Katalysator einzulagern, kann man den mittleren Lambdawert modulieren, sodass dieser zwischen fettem und magerem Lambda schwankt, Abbildung 14. Dazu wird auf das Lambdasignal eine Schwingung gelegt, deren Periodendauern für die kraftstoffreiche Periode t_{fett} und die magere Periode t_{mager} , sowie die maximale Amplitude im mageren $\lambda_{\text{max.,mager}}$ optimiert werden müssen, um hohe Katalysatorwirkungsgrade sicherzustellen.

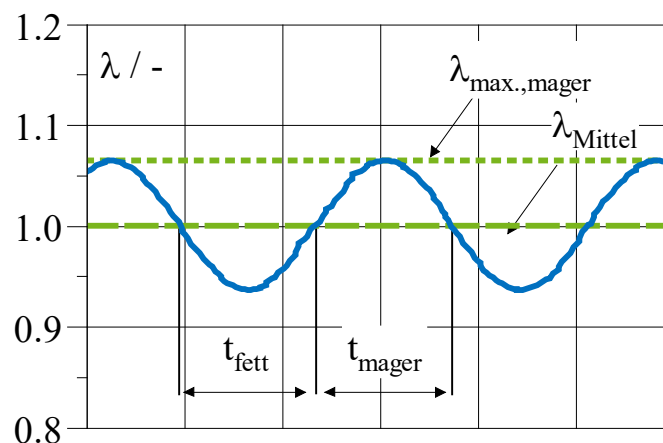


Abbildung 14 Optimierungsgrößen Lambdawobble

Es kann unterschieden werden zwischen einer Modellierung der Schwingung mit gleicher Periodendauer für die magere und fette Phase (das symmetrische Wobbling) und unterschiedlichen Periodenlängen (das asymmetrische Wobbling), Abbildung 15.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

$\lambda_{\text{Spindt}} = 1.0$, $p_{\text{me}} = 2.6$ bar, $T_{\text{Kühlmittel}} = 90$ °C, $n = 1500$ 1/min, $T_{\text{nLLK}} = 28$ °C,
 $\text{SOI} = 310$ °KW vZOT, IVO = 310 °KW nZOT, IVC = 460 °KW nZOT

$p_{\text{Kraftstoff}} = 12$ bar, $\alpha_{50} = 8$ °KW nZOT, $\lambda_{\text{wob,Peak}} = 1.047$, $\lambda_{\text{Split}} = 1.3$

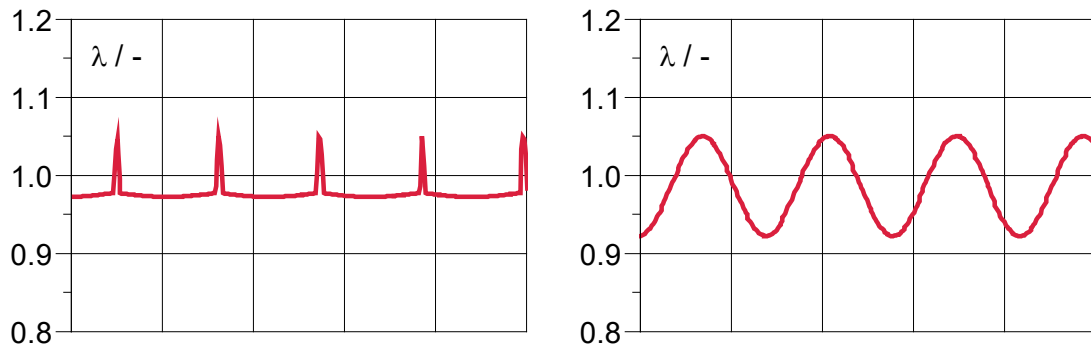


Abbildung 15 Lambdaverlauf für unterschiedliche Wobble-Periodendauern

Weiterhin, bewirken unterschiedliche Periodendauern des Lambdawobbels unterschiedliche Abgastemperaturen. Da die Abgastemperatur ungefähr bei

$$\lambda_{\text{max.Abgastemperatur}} = 1$$

maximal ist bedingt eine Entfernung vom stöchiometrischen Lambdawert eine Verringerung der Abgastemperatur. Eine längere magere Periode bedingt ein fetteres Lambda bei gleichbleibender fetter Periodenlänge, um den mittleren Lambdawert einzustellen. Abbildung 15 zeigt, dass bei einem symmetrischen Lambdawobbel demzufolge ein fetterer Lambdawert in der fetten Periode eingestellt werden muss, als für den asymmetrischen Wobble. Daraus ergibt sich eine geringere Abgastemperatur beziehungsweise Katalysatortemperatur.

Durch eine Variation der Periodendauern in einem weiten Bereich können für die Konvertierung optimale Periodendauern identifiziert werden, Abbildung 16. Es ist ersichtlich, dass für die Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffmonoxid jeweils Katalysatorwirkungsgrade von über 90 % erreicht werden können durch eine geeignete Wahl der Periodendauern. Durch eine feine Abstimmung des mittleren Lambdawertes, war eine weitere Steigerung der Katalysatorwirkungsgrade möglich. Es ist zudem ersichtlich, dass die Wahl der Periodendauern keinen Einfluss auf die Verbrennungsstabilität hat.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

$\lambda_{\text{Spindt}} = 0.995$, $p_{\text{me}} = 14 \text{ bar}$, $T_{\text{Kühlmittel}} = 90 \text{ °C}$, $n = 2500 \text{ 1/min}$

SOI = 250 °KW vZOT, IVO = 360 °KW nZOT, IVC = 590 °KW nZOT,

$T_{\text{nLLK}} = 40 \text{ °C}$, $p_{\text{Kraftstoff}} = 16 \text{ bar}$, $\alpha_{50} = 8 \text{ °KW nZOT}$, $\lambda_{\text{wob,Peak}} = 1.047$

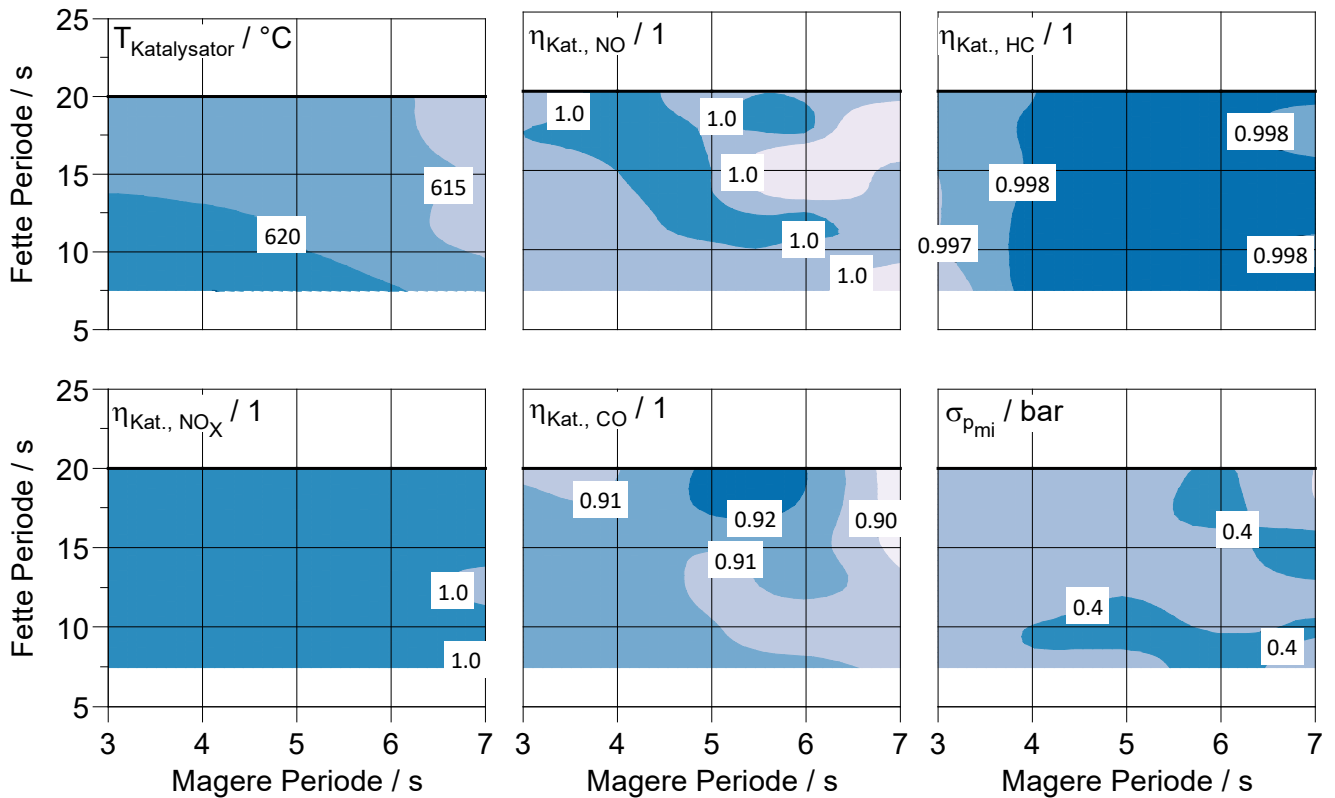


Abbildung 16 Einfluss Periodendauern Lambdawobble auf Katalysatorwirkungsgrad

Für die Betriebspunkte MP 3 und MP 4 ist lediglich eine Optimierung der Wobbling-Parameter, sowie des mittleren Lambdawertes vonnöten, um Katalysatorwirkungsgrade aller Spezies über 95 % zu erzielen. Die erforderliche Katalysatortemperatur ist dort ohne Applizierung eines Lambdasplits oder einer Spätverstellung der Zündung vorhanden, Abbildung 11.

Für die Betriebspunkte MP 1 und MP 2 ist aufgrund der geringen spezifischen Lasten und Drehzahlen eine Optimierung der Katalysatortemperatur über Lambdasplit und Spätverstellung der Zündung geboten, da der maximale Lambdasplit durch die Verbrennungsstabilität begrenzt ist, Abbildung 13. Dazu ist eine Optimierung des Lambdasplits in Abhängigkeit der Schwerpunkt-lage der Verbrennung erforderlich, um hohe Katalysatorwirkungsgrade bei stabilem Motorbetrieb darzustellen.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

$p_{me} = 2.6 \text{ bar}$, $T_{Kühlmittel} = 90 \text{ °C}$, $n = 1500 \text{ 1/min}$

SOI = 320 °KW nZOT, IVO = 360 °KW nZOT, IVC = 540 °KW nZOT

$T_{nLLK} = 28 \text{ °C}$, $p_{Kraftstoff} = 8 \text{ bar}$, $\alpha_{50} = 8 \text{ °KW nZOT}$

$\lambda_{wob,Peak} = 1.05$, $\lambda_{Spindt} = 1.01$, $t_{wob,lean} = 1 \text{ s}$, $t_{wob,rich} = 15 \text{ s}$

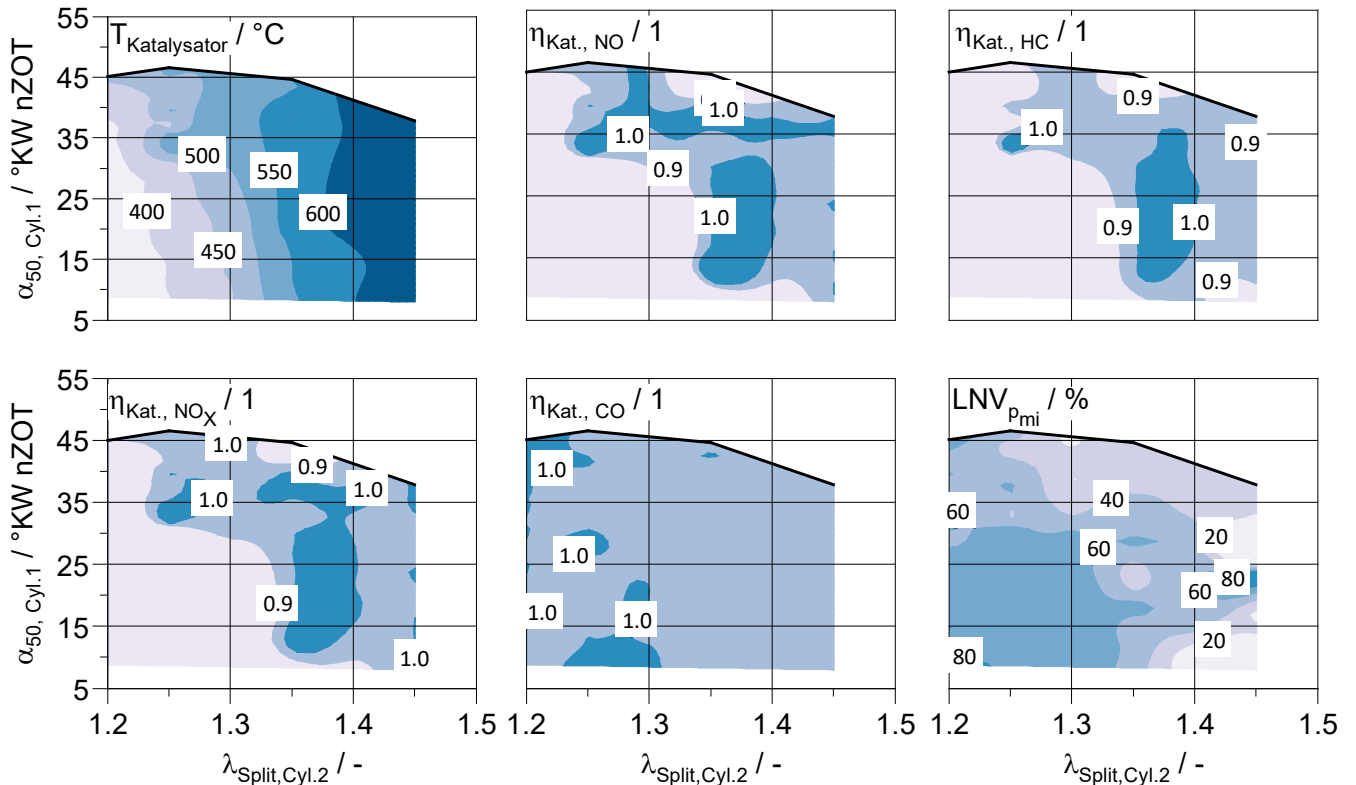


Abbildung 17 Einfluss Schwerpunktlage und Lambdasplit auf Verbrennungsstabilität und Katalysator- und LNV-Parameter

Exemplarisch zeigt Abbildung 17, dass für MP 2 eine Kombination aus einem Lambdasplit von

$$\lambda_{Split, Zyl.2, MP 2} = 1.4$$

und einer Schwerpunktlage von

$$\alpha_{50, MP 2} = 20 \text{ °KW nZOT}$$

erforderlich ist, um eine ausreichend hohe Katalysatorwirkungsgrade zu erzielen. Für die Regeneration beziehungsweise Desulfatisierung des Katalysators müssen in den 4 Betriebspunkten Katalysatortemperaturen über

$$T_{Katalysator, Regeneration} > 800 \text{ °C}$$

erreicht werden. Dazu ist in MP 3 und MP 4 eine Optimierung der Katalysatortemperatur über den Lambdasplit nötig, Abbildung 18. Eine beliebige Steigerung des Lambdasplits ist allerdings aufgrund der deutlich sinkenden Verbrennungsstabilität nicht möglich, wie zuvor ebenfalls gezeigt.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14
 $p_{me} = 14 \text{ bar}$, $T_{\text{Kühlmittel}} = 90 \text{ °C}$, $n = 2500 \text{ 1/min}$
 $IVO = 360 \text{ °KW nZOT}$, $IVC = 540 \text{ °KW nZOT}$, $\lambda_{\text{Split,Cyl.2}} = 1.25$
 $T_{nLLK} = 40 \text{ °C}$, $p_{\text{Kraftstoff}} = 16 \text{ bar}$, $\alpha_{50} = 8 \text{ °KW nZOT}$
 $\lambda_{\text{wob,Peak}} = 1.05$, $\lambda_{\text{Spindt}} = 1.01$

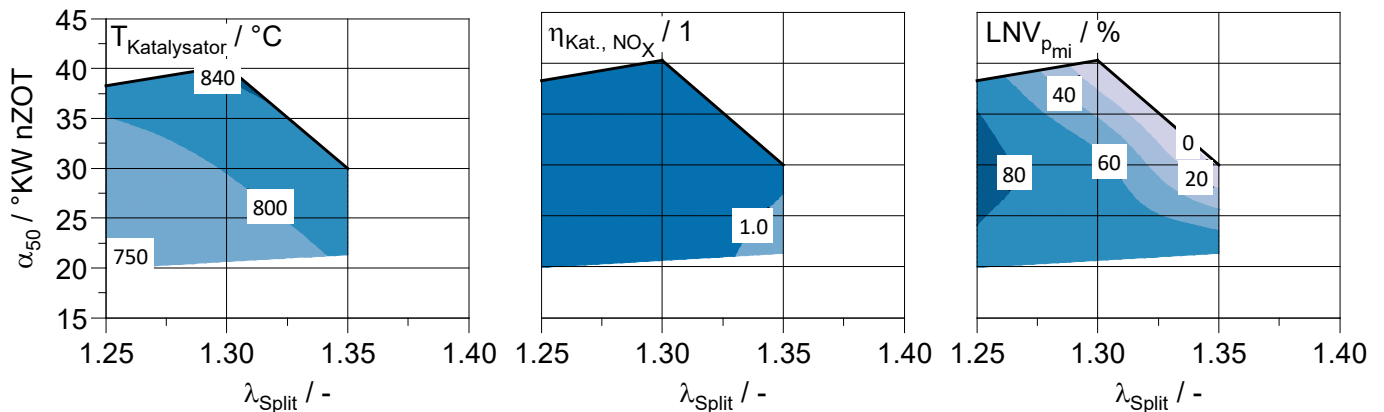


Abbildung 18 Optimierung Lambdasplit und Schwerpunktlage für Desulfatisierung

Für die Betriebspunkte MP 3 und MP 4 ist ein Lambdasplit von

$$\lambda_{\text{Split,Zyl.2,MP 3 u. 4}} = 1.35$$

und eine Schwerpunktlage der Verbrennung von

$$\alpha_{50,MP 3-4} = 22,5 \text{ °KW nZOT}$$

notwendig. Durch eine Optimierung der Einlassventilsteuerzeiten in Richtung maximaler Abgastemperatur kann die Abgastemperatur bei ausreichender Verbrennungsstabilität weiter gesteigert werden.

Wie in Abbildung 17 zu sehen, wird der Motor in der unteren Teillast, bei den Betriebspunkten MP 1 und MP 2 bereits an der Stabilitätsgrenze betrieben, um die Katalysatorwirkungsgrade im Normalbetrieb einzustellen. Eine weitere deutliche Steigerung der Katalysatortemperatur ist in diesen Betriebspunkten nicht möglich, sodass eine Regeneration bei Katalysatortemperaturen über 800 °C nicht realisierbar ist. Daher müssen hier andere Betriebspunkte, höhere spezifische Lasten und/oder Drehzahlen für die Untersuchungen zum Einfluss der Desulfatisierung auf den Kraftstoffverbrauch in der Regeneration genutzt werden. In der Anwendung im Fahrzeug wäre eine Kombination mit einem zusätzlichen Heizer für den Katalysator über eine elektrische Heizung möglich. Eine andere Alternative wäre eine

Hybridisierung des Antriebsstranges bei dem die Betriebspunkte bei niedriger Last und Drehzahl vermieden werden.

Um den Einfluss der Desulfatisierung auf den Kraftstoffverbrauch zu ermitteln, wurden abwechselnd Verschwefelungen und Desulfatisierungen am Motorprüfstand mithilfe der zuvor entwickelten Desulfatisierungsstrategien durchgeführt. Zur Bewertung der Verschwefelung des Katalysators wird der Katalysatorwirkungsgrad für alle gemessenen Abgaskomponenten herangezogen. Dieser wird, wie zuvor erläutert, über eine Messung der Abgaszusammensetzung vor und nach Katalysator bestimmt. Die Dauer, die der Motor mit einem schwefelhaltigen Kraftstoff betrieben werden muss, bis der Katalysatorwirkungsgrad, ausgehend von einem optimalen Katalysatorwirkungsgrad aller Spezies

$$\eta_{i, \text{Katalysator}} > 0,98$$

unter einen Katalysatorwirkungsgrad von

$$\eta_{i, \text{Katalysator}} < 0,9$$

für eine der Abgasspezies fällt, wird als Verschwefelungsdauer definiert. Damit die Verschwefelung des Katalysators unter akzeptablen Motorlaufzeiten am Prüfstand darstellbar ist, wird die Verschwefelung des Katalysators mit einem wesentlich höheren Schwefelgehalt im Kraftstoff durchgeführt, als die Gasnorm für Kraftfahrzeuge DIN EN 16726 zulässt. Der Schwefelgehalt im Kraftstoff wird über die Gas-mischstrecke eingestellt. Dazu wurden Mischungen aus Methan und Carbonylsulfid (COS) mit einer Konzentration von

$$\xi_{\text{COS, Nebenstrom}} = 260 \text{ mg}_{\text{COS}}/\text{kg}_{\text{CH}_4},$$

in 200 bar Prüfgasflaschen vom Projektpartner OGE zur Verfügung gestellt und dem Hauptkraftstoffmassenstrom zu dosiert. Dadurch konnte im Betriebspunkt MP4, Tabelle 1, eine maximale Schwefelkonzentration im Kraftstoff, während der Verschwefelung von

$$\psi_{\text{Schwefel, Verschwefelung, Kraftstoff, MP4}} = 260 \text{ mg}/\text{m}^3.$$

eingestellt werden. Diese ergibt sich, durch den maximal möglichen Schlechtgas-Massenstrom von

$$\dot{m}_{\text{Schlechtgas, max.}} = 0,25 \text{ kg/h,}$$

der durch den Massenflussregler für die Schlechtgasdosierung der Gasmischstrecke begrenzt ist. Um die Verschwehlungsdauer mit einem der Norm entsprechenden Kraftstoff ableiten zu können, wird die Dauer der Verschwehlung mit der erhöhten Schwefelkonzentration linear auf die laut Norm maximal zulässige Schwefelkonzentration (Gasnorm DIN EN 16726) von

$$\psi_{\text{Schwefel, max.Norm, Kraftstoff}} = 30 \text{ mg/m}^3$$

und die entsprechende Verschwehlungsdauer runtergerechnet. Nachdem der Katalysatorwirkungsgrad unter den beschriebenen Grenzwert gefallen ist, wird der Betriebspunkt auf den Desulfatisierungsbetrieb angepasst. Während der Desulfatisierung des Katalysators wird die größte, laut Norm zulässige, Schwefelkonzentration eingestellt. Die Änderung des Betriebspunktes ist bei Motoren ohne vorliegende Kalibrierung nicht wie im realen Motorbetrieb darstellbar. Dies bedingt, dass Änderungen des Betriebspunktes einen erhöhten manuellen Regelbedarf erfordern, um Betriebsgrößen, z.B. das Verbrennungsluftverhältnis, exakt einzuregeln.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

$p_{\text{me}} = 14 \text{ bar}$, $T_{\text{Kühlmittel}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $n = 2500 \text{ 1/min}$

IVO = 360 °KW nZOT, IVC = 540 °KW nZOT

$T_{\text{nLLK}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_{\text{Kraftstoff}} = 16 \text{ bar}$, $\alpha_{50} = \text{var}$

$\lambda_{\text{wob,Peak}} = 1.05$, $\lambda_{\text{Spindt}} = 1.0$

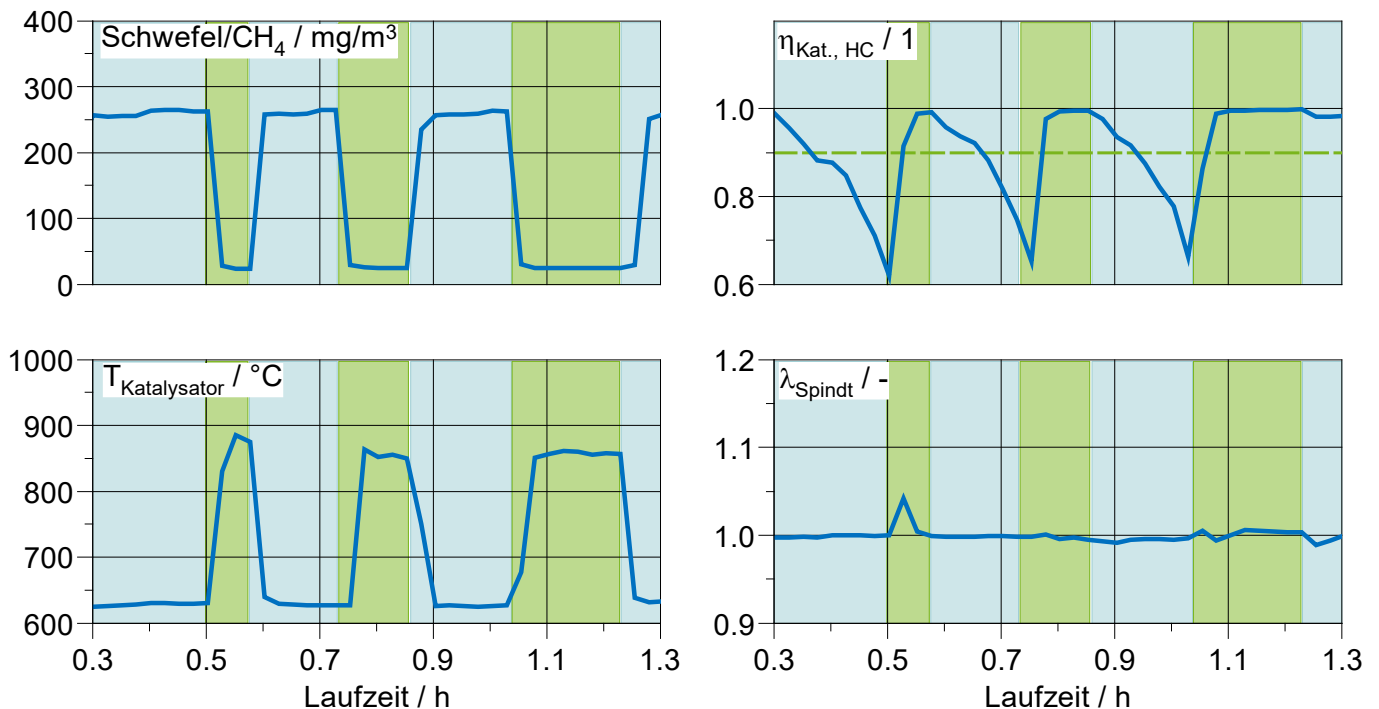


Abbildung 19 Zyklische Verschwehlung und Desulfatisierung im Motorbetrieb

Daher kann es beim manuellen Einstellen der Betriebspunkte zu Abweichungen der Ist- und Soll-Betriebsgrößen kommen, Abbildung 19. Aus diesem Grund ist eine seriennahe Darstellung des Betriebspunktwechsels von der Verschwefelung zur Desulfatisierung am Prüfstand nur bedingt möglich. Die Messungen ermöglichen allerdings den Einfluss unterschiedlicher Desulfatisierungstemperaturen und –dauern abzuleiten und generelle Trends zu identifizieren. In Abbildung 19 ist der mehrfache Wechsel zwischen Verschwefelung und Desulfatisierung am Prüfstand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Wechsel zur Desulfatisierung der Katalysatorwirkungsgrad direkt wieder auf den Zielwert ansteigt. Nach dem Ende der Desulfatisierung fällt der Katalysatorwirkungsgrad wieder langsam ab. Die Dauer der Desulfatisierung wurde jeweils bei unterschiedlichen Katalysatortemperaturen

$$T_{\text{Katalysator}} = 750 \text{ bis } 880 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

zwischen

$$\Delta t_{\text{Desulfatisierung}} = 1 \text{ bis } 10 \text{ Minuten}$$

variiert, um den Einfluss auf den mittleren Kraftstoffverbrauch ableiten zu können. Der mittlere Kraftstoffverbrauch wird durch ein arithmetisches Mittel der Desulfatisierungsdauer, der korrigierten Verschwefelungsdauer und dem entsprechenden Kraftstoffmassenstrom

$$\dot{m}_{\text{Kraftstoff, mittel}} = \frac{\dot{m}_{\text{Verschwefelung}} * t_{\text{Verschwefelung}} + \dot{m}_{\text{Desulfatisierung}} * t_{\text{Desulfatisierung}}}{t_{\text{Verschwefelung}} + t_{\text{Desulfatisierung}}}$$

bestimmt. Bezieht man diesen mittleren Kraftstoffmassenstrom, der sich durch den Bedarf der Desulfatisierung ergibt auf den Kraftstoffmassenstrom im Standardbetrieb (gleicher Betriebspunkt wie Verschwefelung) ergibt sich der Mehrverbrauch durch die Desulfatisierung im entsprechenden Betriebspunkt, Abbildung 20.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14
 $p_{me} = 14 \text{ bar}$, $n = 2500 \text{ 1/min}$

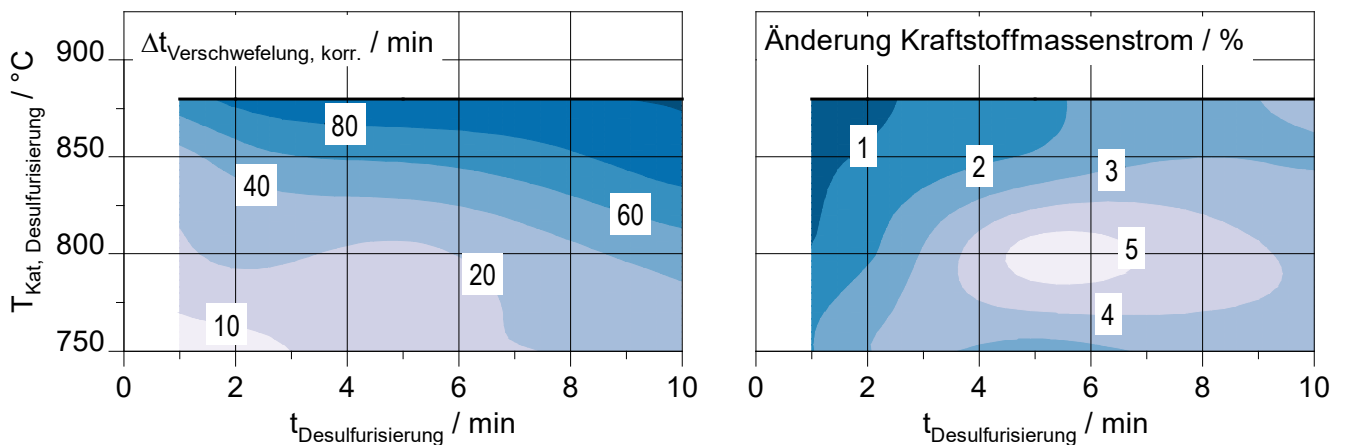


Abbildung 20 Einfluss der Desulfatisierungstemperatur und -dauer auf den mittleren Kraftstoffmehrverbrauch

Mit einer hohen Desulfatisierungstemperatur

$$T_{\text{TWC}} > 850^\circ \text{ C}$$

und einer kurzen Desulfatisierungsdauer

$$t_{\text{Entschwefelung}} < 2 \text{ Minuten}$$

ergibt sich der geringste Kraftstoffmehrverbrauch von

$$\Delta \dot{m}_{\text{min., Kraftstoff, Entschwefelung}} = 1 \%$$

Eine längere Desulfatisierungsdauer erhöht den mittleren Kraftstoffverbrauch im realen Motorbetrieb signifikant, ohne zu einem deutlich höheren Schwefelaustrag aus dem Katalysator und damit einer längeren Verschwefelung zu führen. Bei geringerer Katalysatortemperatur während der Desulfatisierung wird weniger Schwefel pro Zeit aus dem Katalysator ausgetragen, sodass eine längere Desulfatisierung unabdingbar ist. Der geringere Kraftstoffbedarf, um geringere Katalysatortemperaturen einzuhalten, kompensiert nicht die längere Desulfatisierungsdauer, sodass der Nachteil im mittleren Kraftstoffverbrauch größer ist, verglichen mit hoher Desulfatisierungstemperatur und kurzer –dauer. Die Untersuchungen zum Einfluss der Desulfatisierungstemperatur und -dauer wurden zunächst mit reinem Methan ($\psi_{\text{CH}_4, \text{Kraftstoff}} = 100 \%$) durchgeführt.

Um den Einfluss eines wesentlich höheren Wasserstoff-Volumenanteils zu untersuchen, wurde im Betriebspunkt MP 4, in dem bei reinem Methanbetrieb die Abgasnachbehandlung dargestellt werden kann, der Wasserstoff-Volumenanteil auf

$$\phi_{\text{H}_2, \text{max.}} = 30 \text{ Vol.-%}$$

gesteigert. Dazu wurde Wasserstoff über den Schlechtgas-Nebenstrom der Gasmischstrecke dem Kraftstoff zu dosiert.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14
 $p_{\text{me}} = 14 \text{ bar}$, $T_{\text{Kühlmittel}} = 90 \text{ °C}$, $n = 2500 \text{ 1/min}$
 $\text{IVO} = 360 \text{ °KW nZOT}$, $\text{IVC} = 540 \text{ °KW nZOT}$
 $T_{\text{nLLK}} = 40 \text{ °C}$, $p_{\text{Kraftstoff}} = 16 \text{ bar}$, $\lambda_{\text{wob,Peak}} = 1.05$

--- 100 Vol.-% CH₄
 --- 30 Vol.-% H₂

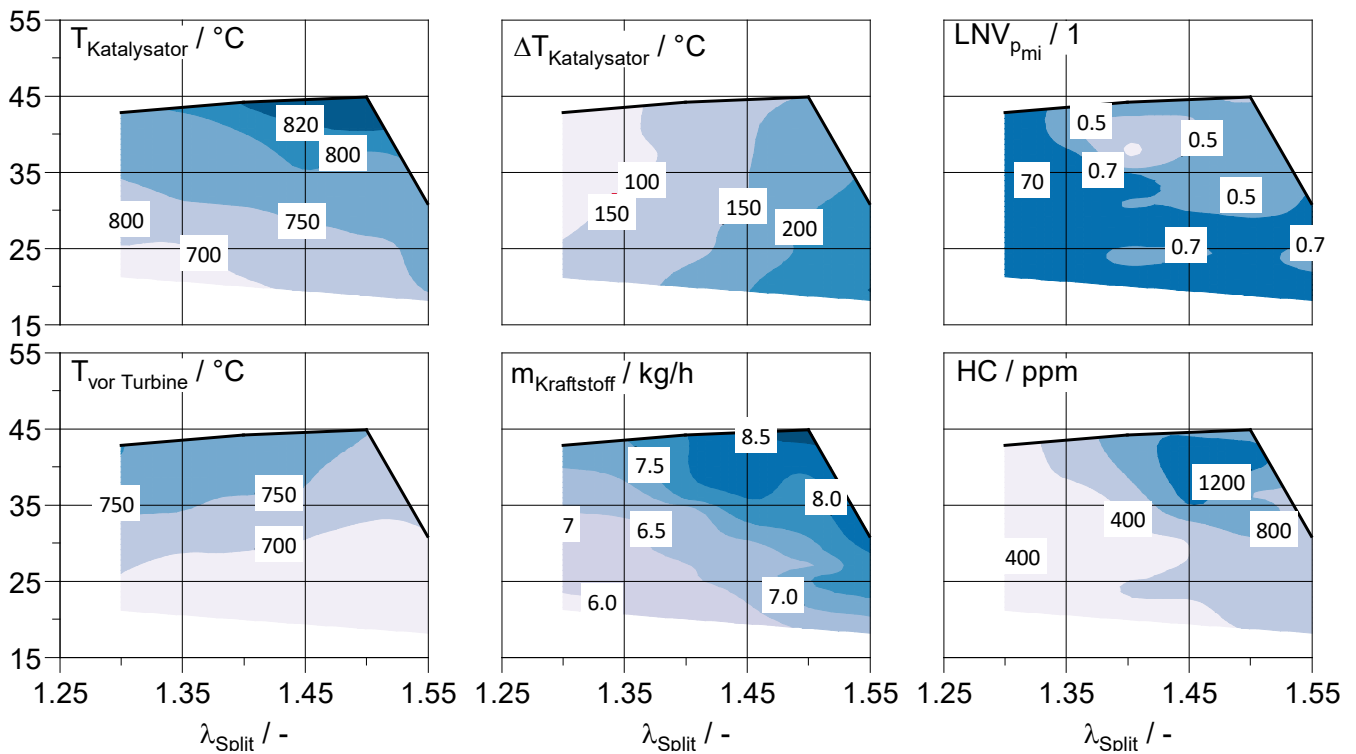


Abbildung 21 Einfluss Verbrennungsschwerpunkte und Lambda Split mit 30 Vol.-% Wasserstoff

Wenn man die Katalysatortemperaturen und Katalysatorwirkungsgrade vergleicht, die mit den gleichen Betriebsparametern wie bei reinem Methanbetrieb (rot gestrichelte Linie) erreicht werden können, kann beobachtet werden, dass bei erhöhtem Wasserstoff-Volumenanteil im Kraftstoff die erreichbare Katalysatortemperatur um

$$\Delta T_{\text{Katalysator}} > 50 \text{ °C}$$

bei ansonsten gleichen Einstellparametern sinkt, Abbildung 21. Die Abgastemperatur vor Turbine sinkt ebenfalls beim Betrieb mit erhöhtem Wasserstoffgehalt durch die schnellere Verbrennung und die gesteigerte Wärmekapazität des Abgases, allerdings nur um

$$\Delta T_{\text{Abgas}} \approx 20 \text{ °C.}$$

Durch die steigende spezifische Wärmekapazität des Abgases und die schnellere Verbrennung bei steigendem Wasserstoffanteil im Kraftstoff ergeben sich geringere Abgastemperaturen bei gleichen Motoreinstellungen. Weiterhin ist eine geringere Exothermie im Katalysator beobachtbar von $\Delta T = 50 \text{ °C}$ mit einem Wasserstoffvolumenanteil von 30 Vol.-%. Dies ist möglicherweise bedingt durch den geringeren Kohlenwasserstoffanteil im Kraftstoff und im Abgas, Abbildung 21. Weitergehende Untersuchungen zu diesem Sachverhalt sollen Gegenstand weiterer Forschungsprojekte sein.

Die bessere Verbrennungsstabilität im Vergleich zum reinen Methanbetrieb erlaubt allerdings höhere Werte für den Lambdaspalt und spätere Verbrennungsschwerpunktlagen als bei reinem Methanbetrieb, Abbildung 21. Dies ist bedingt durch die deutlich höhere Brenngeschwindigkeit und die weiteren Zündgrenzen von Wasserstoff/Methan-Gemischen im Vergleich zu reinem Methan. Katalysatortemperaturen über

$$T_{\text{Katalysator}} > 800 \text{ °C}$$

können allerdings nicht mit einem stabilen Motorbetrieb (Grenzwert $\text{LNV}_{\text{p}_{\text{mi}}} > 70 \text{ %}$) erreicht werden. Das bedeutet, dass ein erhöhter Wasserstoff-Volumenanteil im Kraftstoff Herausforderungen an die Abgasnachbehandlung, insbesondere die Desulfatisierung des Katalysators, stellt und diese ohne zusätzliche Maßnahmen selbst im mittleren Drehzahl- und Lastbereich nicht dargestellt werden kann. Aus diesen Gründen, stellt ein Schwefelgehalt im Gasnetz und damit im Kraftstoff eine große Herausforderung an zukünftige Gasmotoren für Anwendungen im PKW-Bereich und sollte komplett vermieden werden. Als Grenzwert für Schwefel im Kraftstoff wird daher ein Schwefelanteil von

$$\phi_{\text{S, Kraftstoff}} = 0 \text{ Vol.-%}$$

empfohlen, da für die Odorierung des Kraftstoffes schwefelfreie Mittel zur Verfügung stehen.

Im Vergleich zur Zielsetzung konnte ein Messverfahren für die Evaluierung des Katalysators und Strategien für die Desulfatisierung entwickelt werden. Es konnte herausgestellt werden, dass die hohen

erforderlichen Temperaturen für die Desulfatisierung infolge der Limitierung der minimalen Verbrennungsstabilität nicht im gesamten Motorkennfeld dargestellt werden können. Eine Verschwefelung und Desulfatisierung des Katalysators konnte wiederholt am Motorprüfstand umgesetzt und der Einfluss auf die Abgasemissionen und die Wirksamkeit der Desulfatisierungsstrategien konnte aufgezeigt werden. Der Verbrauchsnachteil durch die getroffenen Desulfatisierungsstrategien wurde in den einzelnen Punkten und beim Projektpartner Ford mithilfe von Motorprozesssimulationen nachgewiesen. Dabei wurde eine Steigerung der CO₂-Emissionen im WLTP-Zyklus von 5 % durch den maximal möglichen Schwefelgehalt im Kraftstoff laut Gasnorm ermittelt. Als Grenzwert für den Schwefelgehalt im Kraftstoff wird auf Grundlage dieser Ergebnisse eindeutig empfohlen keinen Schwefelanteil im Kraftstoff zu zulassen.

2.1.3. Einfluss Methanzahl auf das Vollastverhalten des Motors

Der mögliche hohe und variable Wasserstoff-Volumenanteil im Kraftstoff stellt für den Verbrennungsmotor, abseits der Abgasnachbehandlung, noch eine weitere Herausforderung dar. Wasserstoff mit einer Methanzahl von

$$MZ_{\text{Wasserstoff}} = 0$$

hat im Vergleich zu Methan mit einer Methanzahl von

$$MZ_{\text{Methan}} = 100$$

eine signifikant höhere Klopfneigung.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14

$n = 1500 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 14 \text{ bar}$, $T_{in} = 40 \text{ °C}$, $\lambda = 1.0$

IVO = 300 °KW nZOT, IVC = 555 °KW nZOT, SOI = 160 °KW vZOT

—■— 0 Vol.-% H₂ —■— 5 Vol.-% H₂ —■— 10 Vol.-% H₂
 —■— 20 Vol.-% H₂ —■— 30 Vol.-% H₂

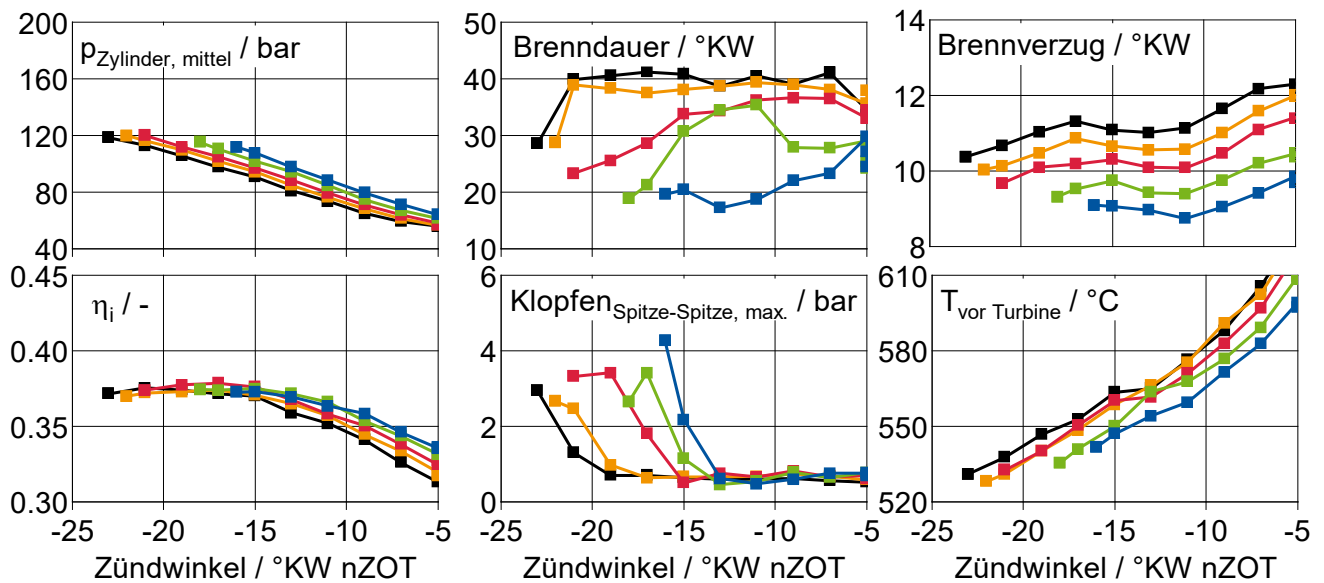


Abbildung 22 Einfluss Methanzahl auf den Motorbetrieb

Daraus folgt, dass die Methanzahl des Methan-/Wasserstoffgemisches im Gasnetz mit steigendem Wasserstoff-Volumenanteil sinkt, was bei der Nutzung als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren, insbesondere hinsichtlich abnormaler Verbrennungsphänomene, von Bedeutung ist. Der Einfluss der schwankenden Methanzahl auf den Motorbetrieb, vor allem im Vollastbetrieb, ist daher von hohem Interesse. Abbildung 22 zeigt einen Vergleich verschiedener Kraftstoffmischungen mit Methanzahlen zwischen

$$MZ = 100 - 70,$$

die mit einem Wasserstoffvolumenanteil von

$$\phi_{\text{H}_2, \text{ Kraftstoff}} = 0 - 30 \text{ Vol.-%}$$

korrelieren. Es konnte beobachtet werden, dass das Klopfsignal, Klopfen_{Spitze-Spitze}, bei gleichem Zündwinkel mit sinkender Methanzahl ansteigt. Gleiche Klopfwerte werden bei reinem Methanbetrieb erst bei einem Zündwinkel von

$$\Delta\alpha_{30 \text{ Vol.-% bis } 0 \text{ Vol.-% H}_2} = + 7^\circ \text{ KW}$$

später erreicht. Dies bestätigt eine deutlich höhere Klopfneigung mit sinkender Methanzahl. Weiterhin sinkt durch den steigenden Wasserstoff-Volumenanteil die Brenndauer um mehr als

$$\Delta\text{Brenndauer} > 50 \text{ \%}.$$

Dies bedingt eine geringere Abgastemperatur vor Turbine mit steigendem Wasserstoffvolumenanteil. Daraus ergeben sich Herausforderungen für die Abgasnachbehandlung, wie in Abschnitt 2.1.2 erläutert. Eine Steigerung des Wasserstoffvolumenanteils auf bis zu $\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = 30 \text{ Vol.-%}$ bedeutet bei einem konstanten Zündwinkel von $\alpha_z = -15^\circ \text{ KW nZOT}$ eine um $\Delta T_{\text{vor Turbine}} = 15^\circ \text{ C}$ geringere Abgastemperatur. Bei geringeren Wasserstoffvolumenanteilen reduziert sich dieser Nachteil entsprechend. Die schnellere Verbrennung führt aber beim Vergleich der Kraftstoffe bei gleicher Klopfintensität nicht zu steigenden Spitzendrücken und Wirkungsgraden, da die erhöhte Klopfneigung bei geringeren Methanzahlen den Vorteil der schnelleren Verbrennung überkompensiert. Hingegen führt bei einem Vergleich bei gleichem Zündwinkel eine sinkende Methanzahl zur Steigerung des mittleren maximalen Zylinderspitzendrucks um

$$\Delta p_{\text{Zyl., max, mittel}} \approx 15 \text{ bar}$$

bedingt durch die schnelle Verbrennung und damit frühere Schwerpunktlage der Verbrennung und Spitzendrucklage, Abbildung 23.

MethCar Motor 1.0l R3, Gas-DI-Injektor A-Düse, CR=14
 $n = 1500 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 14 \text{ bar}$, $\lambda = 1.0$
 SOI = $160 \text{ }^\circ\text{KW vZOT}$, $\alpha_{IGN} = 17 \text{ }^\circ\text{KW vZOT}$
 IVO = $300 \text{ }^\circ\text{KW nZOT}$, IVC = $555 \text{ }^\circ\text{KW nZOT}$

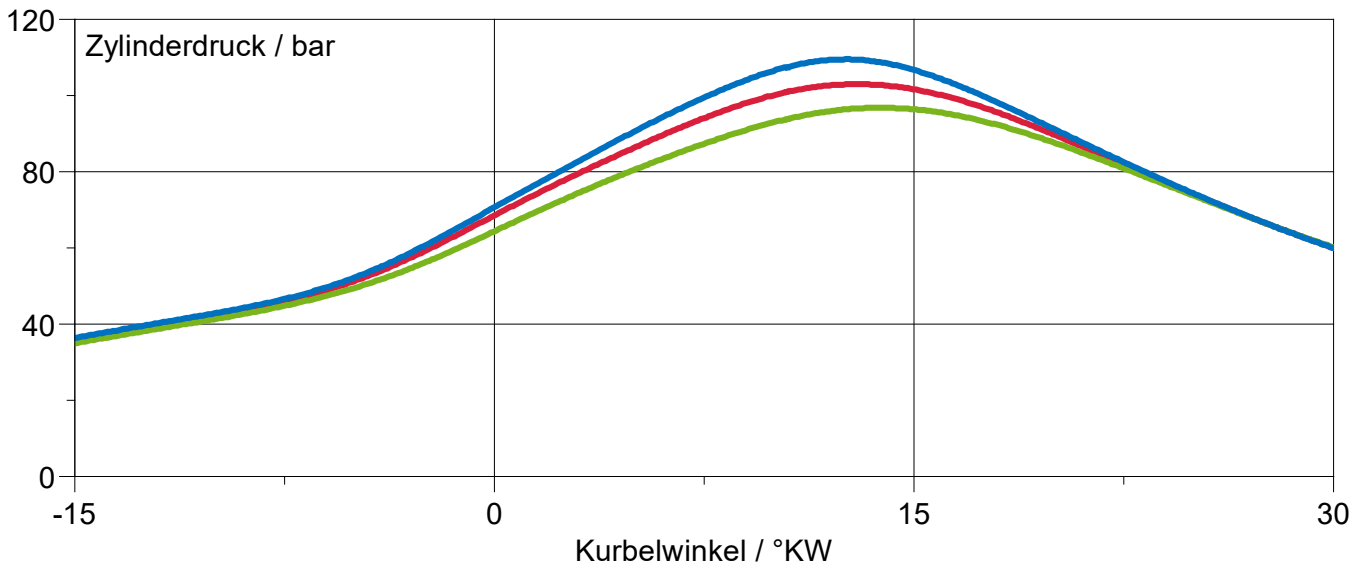


Abbildung 23 Zylinderdruckverläufe bei konstantem Zündwinkel und unterschiedliche Wasserstoffgehalten

Aus der früheren Schwerpunktlage ergeben sich höhere Spitzendruck und -temperaturen im Brennraum, die, in Verbindung mit der geringeren Zündverzugszeit des Methan/Wasserstoffgemisches, zu der erhöhten Klopfneigung mit sinkender Methanzahl führen. In Abbildung 24 sind die Klopfintensitäten der 200 gemessenen Motorzyklen pro Messpunkt über ihrer jeweiligen Verbrennungsschwerpunktlage für 3 verschiedene Methan/Wasserstoff Mischungsverhältnisse dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit steigendem Wasserstoffvolumenanteil im Kraftstoff die Anzahl der klopfenden Zyklen, die oberhalb des Klopflimits liegen erheblich zunehmen. Die Zyklen mit erhöhter Klopfintensität liegen jeweils bei einer frühen Schwerpunktlage im Vergleich zum Mittelwert.

MethCar Motor, Gas-DI, CR = 14
 $n = 1500$ 1/min, $p_{me} = 14$ bar, $\lambda = 1.0$
 SOI = 160 °KW vZOT, $\alpha_{IGN} = 17$ °KW vZOT
 IVO = 300 °KW nZOT, IVC = 555 °KW nZOT

● 0 Vol.-% H₂, 100 Vol.-% CH₄
 ● 10 Vol.-% H₂, 90 Vol.-% CH₄
 ● 30 Vol.-% H₂, 70 Vol.-% CH₄

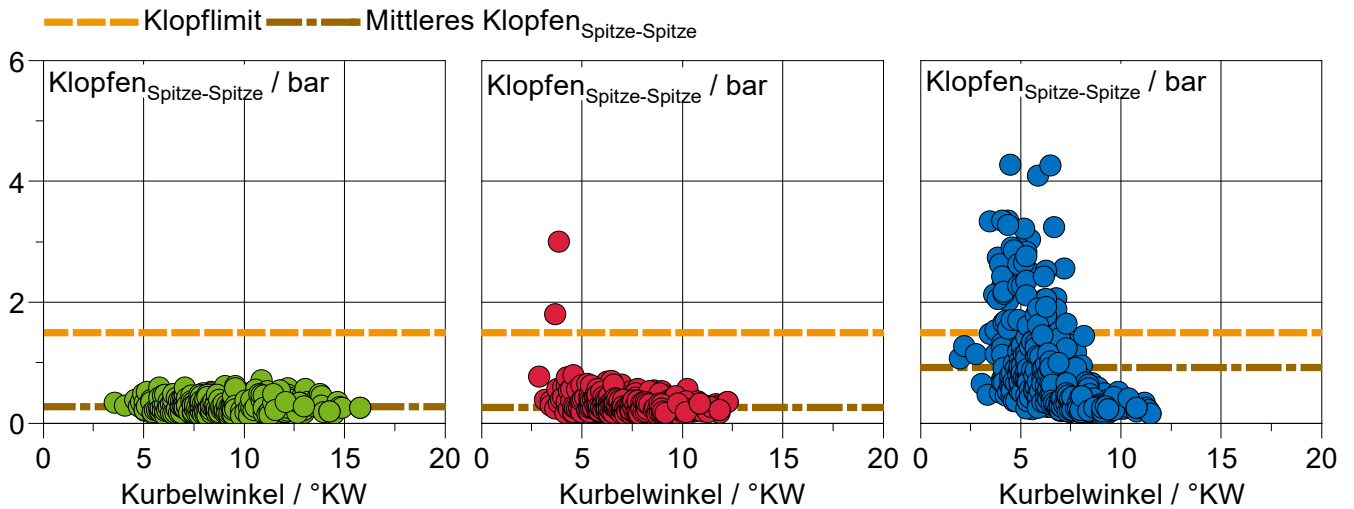


Abbildung 24 Klopfintensität in Abhängigkeit der Verbrennungsschwerpunktlage verschiedener Wasserstoffgehalte im Kraftstoff bei konstantem Zündwinkel

Diese erhöhte Neigung zur abnormalen Verbrennung kann an der Vollast des Methanmotors, wo sehr hohe Spitzendrücke vorliegen, bei reduzierter Methanzahl zu Vorentflammungen führen, siehe Abbildung 25. Diese Ereignisse werden ausgelöst durch eine vorzeitige Entflammung des Gemisches an heißen Stellen im Brennraum. Vornehmlich sind Öltropfen, die verdampfen und sich aufgrund der Umgebungsbedingungen entzünden oder heiße Oberflächen (z.B. Auslassventile, Zündkerze), verantwortlich für diese Vorentflammungen. Problematisch sind diese Ereignisse, da die erreichten Zylinderspitzen drücke, die Spitzendrucklimitierung des Motors übersteigen können. Diese Phänomene nehmen in ihrer Häufigkeit mit steigendem Wasserstoffvolumenanteil deutlich zu und müssen in der Mechanikentwicklung des Motors berücksichtigt werden, da diese sonst zu einer Schädigung des Motors führen.

MethCar Motor, CR = 14, Gas-DI, Kraftstoff = 70 Vol.-% CH₄, 30 Vol.-% H₂
 n = 2000 1/min, BMEP = 28 bar, T₁ = 40 °C, MFB50 = 19 ° KW nZOT

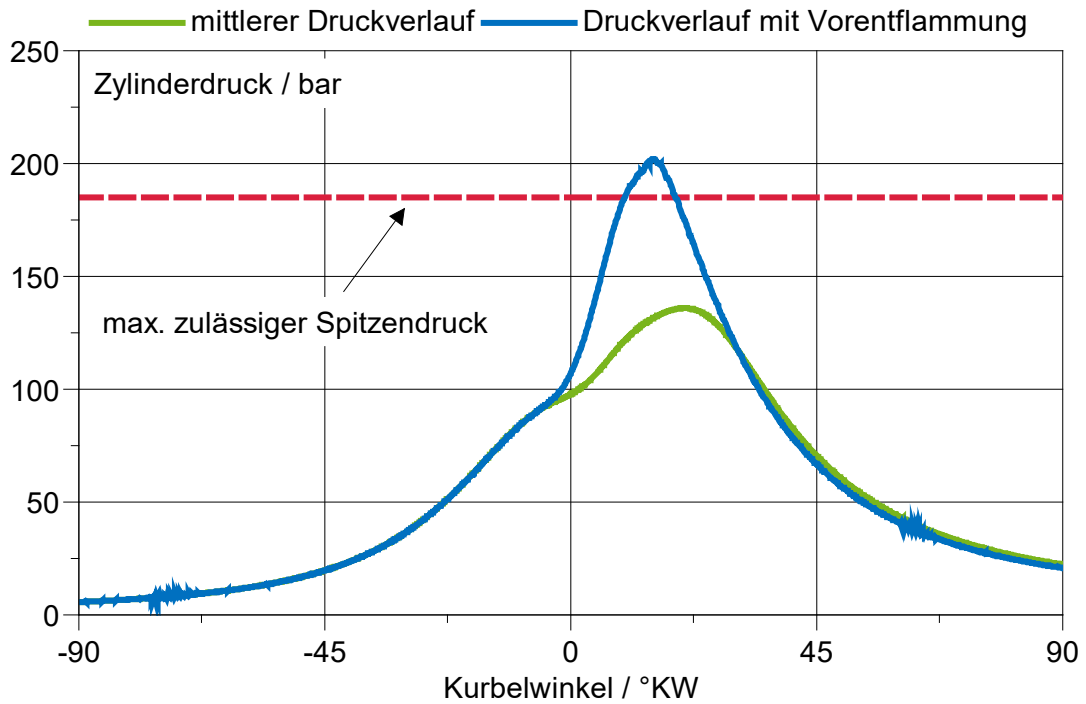


Abbildung 25 Betriebspunkt mit Vorentflammung nahe der Vollast

Daher muss für den Vollastbetrieb mit $\psi_{H_2, \text{Kraftstoff}} = 30 \text{ Vol.-%}$ die maximale Last im niedrigen bis mittleren Drehzahlbereich

$$n = 1750 - 3000 \text{ 1/min}$$

reduziert werden im Vergleich zum Betrieb mit reinem Methan, siehe Abbildung 26.

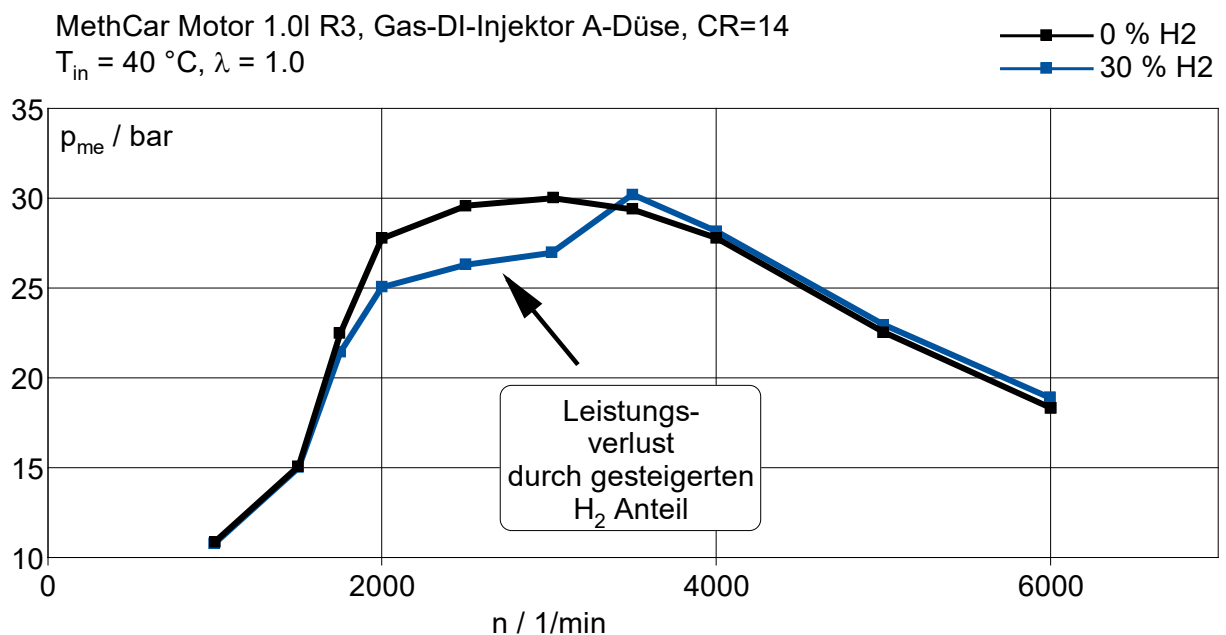


Abbildung 26 Vollast mit 0 Vol.-% und 30 Vol.-% Wasserstoff

Bei

$$n = 2500 \text{ 1/min}$$

bedingt dies vergleichsweise einen Lastverlust von

$$\Delta p_{me, 30 \text{ Vol.-% H}_2} = -4 \text{ bar} = -13,8 \%$$

um einem stabilen Motorbetrieb zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird ein Grenzwert für den Wasserstoffgehalt im Kraftstoff von

$$\phi_{\text{H}_2, \text{ Grenzwert}} \leq 10 \text{ Vol.-%}$$

empfohlen. Dadurch wird die maximale Klopfneigung des Kraftstoffes und die Anzahl klopfender Verbrennungen limitiert, Abbildung 24. Höhere Wasserstoffanteile führen zu einem signifikanten Anstieg von Vorentflammungen und starken Klopfereignissen, die für den Motorbetrieb nicht mehr akzeptabel sind und eine deutliche Lastreduktion erfordern. Demzufolge wird empfohlen die Methanzahl auf

$$MZ_{\text{Grenzwert}} \geq 90$$

zu begrenzen, was einem Wasserstoffvolumenanteil von $\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = 10 \text{ Vol.-%}$ entspricht bei reinem Methan als Basiskraftstoff. Folglich ergibt sich ein minimal zulässiger Heizwert von

$$H_{u, \text{ Grenzwert}} \geq 32.96 \text{ MJ/m}^3.$$

Höhere Kohlenwasserstoffe als Methan können enthalten sein, solange $H_{u, \text{Grenzwert}}$ und $MZ_{\text{Grenzwert}}$ nicht unterschritten werden. Wie in Abschnitt 2.1.2 gezeigt bedeutet ein erhöhter Wasserstoffgehalt bis $\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = 30 \text{ Vol.-%}$ zudem eine Herausforderung für die Abgasnachbehandlung, da die erforderlichen Temperaturen im Katalysator nicht mehr erreicht werden können. Bei einer Limitierung des maximalen Wasserstoffgehaltes auf $\psi_{\text{H}_2, \text{Kraftstoff}} = 10 \text{ Vol.-%}$ wird der Einfluss auf die Abgasnachbehandlung limitiert.

2.1.4. Empfehlung Kraftstoffspezifikation

Abschließend soll, wie in Abschnitt 1.1., beschrieben, eine Empfehlung für die Kraftstoffspezifikation von EE-C-Methan gegeben werden, die auf den Ergebnissen in Abschnitt 2.1.1. bis 2.1.3. basiert. Grundsätzlich gelten die Grenzen der Gasnorm EN16723-2. Die empfohlenen Änderungen auf Basis dieses Forschungsprojektes sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Grenzwerte		Begründung
		Min.	Max.	
Wasserstoff	% mol/mol	-	10	Limitierung durch erhöhte Klopfneigung und Nachteile in der Abgasnachbehandlung.
Gesamtschwefel	mg _S /m ³	-	0	Desulfatisierung bedingt erheblichen Anstieg der CO ₂ Emissionen und kann nicht in allen Betriebsbereichen ohne zusätzliche Maßnahmen realisiert werden.
Methanzahl	Index	90	-	Limitierung durch erhöhtes Auftreten abnormaler Verbrennungsphänomene bei dedizierten Methanmotoren.
Kompressoröl	mg _{Öl} /m ³	-	18,6	Höhere Ölgehalte bedingen eine Verkokung des Injektors. Aktuell ist ein Ölgehalt für die Dauerhaltbarkeit der Injektoren unabdingbar.
Gesamtsilizium (Siloxan)	mg _{Si} /m ³	-	0	Sandbildung im Brennraum führt zur Motorschädigung.
Heizwert	MJ/m ³	32,96	-	Ergibt sich aus maximal zulässigem Wasserstoffgehalt.

Tabelle 2 Empfehlungen für eine Kraftstoffspezifikation von EE-C-Methan

2.2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind in Tabelle 3 aufgeführt. Wichtigste Positionen sind hierbei die Personalkosten und die Vergabe von Aufträgen. Die Vergabe von Aufträgen beinhaltet die Beauftragung der BEA Testing GmbH für die Prüfstandbetreuung während aller Prüfstandphasen des Projektes, um einen effizienten Prüfstandbetrieb zu gewährleisten. Dies war insbesondere für die Dauerlaufversuche unabdingbar.

Kostenart	Ausgaben
Personalkosten	295.549,43 €
Reisekosten	2.019,55 €
Investitionen	25.519,39 €
Vergabe von Aufträgen	130.012,28 €
Sonstige	12.554,81 €
Summe	465.655,46 €

Tabelle 3 Positionen zahlenmäßiger Nachweis

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

EE-C-Methan kann je nach Art der Herstellung unterschiedliche Begleitkomponenten (Wasserstoff, Schwefel) und Verunreinigungen (Kompressoröl, Siloxan) enthalten. Um den Einfluss dieser Begleitkomponenten und Verunreinigungen auf den Motorbetrieb, die Motorkomponenten und Abgasnachbehandlung untersuchen zu können, war ein hoher Personaleinsatz notwendig, der ohne eine Förderung nicht darstellbar gewesen wäre. Dadurch konnte der Lehrstuhl Empfehlungen für Grenzwerte der Begleitkomponenten und Verunreinigungen ableiten und für weitere Normungsarbeiten empfehlen, siehe Abschnitt 2.1.

Die Förderung erlaubte weiterhin die Umsetzung notwendiger Anpassungen am Motorprüfstand, um einen Betrieb des Motors mit Methan/Wasserstoffmischungen sicher durchführen zu können. Die Investitionen in den Motorprüfstand haben eine Anschlussfähigkeit in kommenden Wasserstoff-Forschungsprojekten. Ein effizienter Prüfstandbetrieb durch eine 24/7-Betreuung, der vor allem für die Verschleißuntersuchungen der Methan-DI-Injektoren wichtig war, konnte durch die Förderung dargestellt werden. Dies ermöglichte einen effizienten Motorbetrieb während der gesamten Projektlaufzeit und führte zu einer Vielzahl an Forschungsergebnissen.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Eine kommerzielle Nutzung der Projektergebnisse ist seitens der RWTH Aachen nicht vorgesehen. Die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse werden als Grundlage für weiterführende Entwicklungen und Kooperationen genutzt. Hierbei stellt insbesondere die Sektorkopplung Energie und Mobilität einen wichtigen Aspekt der Forschungsausrichtung des Lehrstuhls dar.

Des Weiteren stehen die Ergebnisse und insbesondere die entwickelten Methoden und Werkzeuge nach Projektabschluss für die Akquise neuer Forschungsprojekte, im Besonderen im Bereich Wasserstoff-Verbrennungsmotor, zur Verfügung. Darüber hinaus werden die Ergebnisse in Form von Vorlesungen in die Lehre eingebunden. Die erzielten Forschungsergebnisse werden darüber hinaus in Form von Artikeln in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und als Konferenzbeiträge dem Fachpublikum öffentlich zugänglich gemacht.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind von dritter Seite keine FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Geplant:

- [1] *Abnormale Verbrennungsphänomene von wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotoren mit Direkteinspritzung*; Fischer M., Günther M., Pischinger S., Seibel J., Kramer U., Lorenz T.; 5. Internationale Tagung Zündsysteme für Ottomotoren 08.12.2021
- [2] *Influence of desulfurization strategies on carbon dioxide emissions of a methane gas direct injection engine*; Fischer M., Günther M., Pischinger S., Kramer U., Nederlof C., van Almsick T.; International Journal of Natural Gas Science and Engineering

2.7. Literaturverzeichnis

- [1] W. Cartellieri: **Erweiterung der Energieerzeugung durch Kraftgase**, Frankfurt: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Heft 81, 1968.
- [2] G. Taucar, W. Cartellieri: **Erweiterung der Energieerzeugung durch Kraftgase, Teil 2**, Frankfurt: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Heft 81, 1968.
- [3] W. Cartellieri, U. Pfeifer: **Erweiterung der Energieerzeugung durch Kraftgase, Teil 3**, Frankfurt: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Heft 120, 1971.
- [4] W. Cartellieri, U. Pfeifer: **Die Bewertung der Klopfestigkeit von Kraftgasen mittels der Methanzahl und deren praktische Anwendung bei Gasmotoren**, Motorentechnische Zeitschrift, 33. Jahrgang, Nr. 10, pp. Seite 389-420, 10 Oktober 1972.
- [5] N.N.; **EN 16726: Gas infrastructure — Quality of gas - Group H**, CEN European Standard EN 16726: 2016
- [6] N.N.; **EN 16723-2: Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network — Part 2: Automotive fuel specifications**; CEN European Standard EN 16723-2: 2017
- [7] Kramer, U., Lorenz, T., Hofmann, C., Ruhland, H., Klein, R., Weber, C.: **Methane Number Effect on the Efficiency of a Downsized, Dedicated, High Performance Compressed Natural Gas (CNG) Direct Injection Engine**. SAE Technical Paper 2017-01-0776, Detroit 2017

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht RTWH Aachen Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme)
3. Titel Abschlussbericht MethCar - Methan-Motoren für PKW	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Pischinger, Stefan Prof. Dr.-Ing. Günther, Marco Dr.-Ing Fischer, Marcus M. Sc.	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2021 6. Veröffentlichungsdatum Februar 2022 7. Form der Publikation Bericht TIB Hannover
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RTWH Aachen Templergraben 55, 52062 Aachen Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme), Forckenbeckstraße 4, 52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen 19I18010G 11. Seitenzahl 43
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 7 14. Tabellen 2 15. Abbildungen 26
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, am 17.02.2022	
18. Kurzfassung <p>Eine regenerative Einspeisung von Methan und Wasserstoff in das aktuelle Gasnetz würde die CO₂ Emissionen in einer Well-to-Wheel Betrachtung signifikant reduzieren. Am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme wurden die Standfestigkeit von Gas-DI-Injektoren und die Abgasnachbehandlung in Abhängigkeit der Kraftstoffzusammensetzung untersucht. Die Untersuchungen am Lehrstuhl haben gezeigt, dass ein Ölgehalt von 18,6 mg/m³ im Gas erforderlich ist, um vorzeitigen Verschleiß zu verhindern. Der mögliche Schwefelgehalt im Kraftstoff, aufgrund einer Odorierung, erfordert eine Desulfatisierung des Katalysators im Motorbetrieb. Dabei muss im Serienbetrieb ein stabiler Motorbetrieb gewährleistet werden. Das bedeutet, dass der indizierte Mitteldruck einzelner Verbrennungszyklen nicht kleiner als 70 % des mittleren indizierten Mitteldruckes ist. Unter dieser Randbedingung ist es im gesamten Motorkennfeld nicht möglich die Desulfatisierung durchzuführen. Daher sind hier alternative Methoden notwendig, um die erforderlichen Katalysatortemperaturen zu erreichen. Untersuchungen zum Einfluss der Methanzahl auf das Vollastverhalten haben gezeigt, dass die wesentlich schnellere Verbrennung bei einer Steigerung des Wasserstoffgehaltes bis 30 Vol.-% nicht zu einem höheren Wirkungsgrad führt. Die erhöhte Klopfneigung im Vollastbetrieb führt zu einer für den Serienbetrieb unzulässigen Anzahl an anomalen Verbrennungsphänomenen.</p>	

19. Schlagwörter

E-Methan, EE-C-Methan, E-Kraftstoff, CNG, Erdgas, H₂, Wasserstoff, Methanzahl, Gasqualität, Dauerhaltbarkeit

20. Verlag

TIB Hannover

21. Preis

tbd

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report RWTH Aachen Chair of thermodynamics of mobile energy conversion systems (tme)
3. title MethCar – Methane Combustion Engines for Passenger Cars	
4. author(s) (family name, first name(s)) Pischinger, Stefan Prof. Dr.-Ing.	5. end of project August 2021 6. publication date January 2022 7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) RWTH Aachen Chair of thermodynamics of mobile energy conversion systems (tme), Forckenbeck- straÙe 4, 52074 Aachen (Germany)	9. originator's report no. 10. reference no. 19I18010G 11. no. of pages 43
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 7 14. no. of tables 2 15. no. of figures 26
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. Abstract <p>A regenerative supply of methane and hydrogen into the current gas grid would significantly reduce CO₂ emissions in a well-to-wheel analysis. At the Chair of Thermodynamics of Mobile Energy Conversion Systems the robustness of methane DI-injectors and the exhaust gas aftertreatment as function of the fuel composition were investigated. The investigations at the chair have shown that an oil content in the gas is required to prevent premature wear of the injectors. The possible sulfur content in the fuel requires desulfurization of the catalytic converter during engine operation. Stable engine operation must be ensured in series operation. This means that the indicated mean effective pressure of individual combustion cycles is not less than 70% of the mean indicated mean effective pressure. Under this boundary condition, it is not possible to perform desulfurization in the entire engine map. Alternative methods are therefore necessary here to achieve the required catalyst temperatures. Studies on the influence of the methane number on the full load behavior have shown that the much faster combustion with an increase in the hydrogen content up to 30 Vol.-% does not lead to a higher efficiency. The increased tendency to knock leads at full-load operation to an inadmissible number of abnormal combustion phenomena for series operation.</p>	
19. keywords E-methane, RE-methane, E-fuel, CNG, natural gas, H ₂ , hydrogen, methane number, gas quality, durability	

20. publisher
TIB Hannover

21. price
tbd