

Individueller Schlussbericht

IAVF Antriebstechnik GmbH

I. Kurzdarstellung

Forschungsvorhaben GESIR

Gasmotoren mit energieeffizienten Systemtechnologien
und integraler Robustheit

Förderkennzeichen: 19I19006A

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2019 – 31.03.2023

Projektleitung:

Dr.-Ing. P. Berlet, IAVF Antriebstechnik GmbH

Verbundpartner:

Bleistahl Produktions-GmbH & Co. KG (Bleistahl)	19I19006D
Fuchs Lubricants Germany GmbH (Fuchs)	19I19006C
IAVF Antriebstechnik GmbH (IAVF)	19I19006A
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM (IWM)	19I19006E
MAN Truck & Bus SE (MAN)	-

gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Projektträger:

TÜV Rheinland Consulting GmbH

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Aufgabenstellung.....	1
2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	2
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	3
4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrecht, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	3
a) Effizienz und Nachhaltigkeitspotenzial von Gasmotoren	3
b) Tribologische Aspekte.....	4
c) Tribologie und Verschleißanalyse	7
4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	7
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
Abbildungsverzeichnis.....	9

Einleitung

Die Steigerung der Effizienz von Gasmotoren und die Senkung der Emissionen sind von zentraler Bedeutung für die Mobilität und die Energietechnik. Eine Steigerung des indizierten Wirkungsgrads solcher Motoren erfordert jedoch höhere Verbrennungsdrücke und Temperaturen. Dadurch steigen die Belastungen der Motorkomponenten erheblich, wodurch die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Motoren teilweise deutlich verkürzt wird. Insbesondere werden die Belastungen tribologisch hoch beanspruchter Komponenten und Schmierstoffe kritisch. Die begrenzte Verschleiß- und Oxidationsbeständigkeit dieser Komponenten verhindert somit bisher die weitere Effizienzsteigerung der Gasmotoren. Zusätzlich müssen die Motoren für die Verbrennung von verschiedenen Kraftstoffen ertüchtigt werden.

Angesichts dieser Bestrebungen, die Leistung von Gasmotoren weiter zu erhöhen und sie für neue Kraftstoffe wie z.B. Wasserstoff und dessen Derivate zu ertüchtigen, besteht ein dringender Bedarf an technisch und wirtschaftlich machbaren Lösungen. Um hierbei akzeptable Lebensdauern der Motoren und Motorkomponenten zu erreichen, ist es notwendig, den Verschleiß der Motorkomponenten und die Degradation der Schmierstoffe auch bei höheren Belastungen niedrig zu halten.

Lösungsansätze hierfür, die im Vorhaben verfolgt wurden, sind:

- I. Erhöhung der Verschleißbeständigkeit im Bereich der Ventilsitzringe, Ventile und Ventilführungen durch verbesserte, tribologisch angepasste Werkstoffe
- II. Entwicklung thermisch hoch stabiler Schmierstoffe
- III. Erarbeitung neuer Gemischbildungskonzepte und präzise Abstimmung der Betriebsbedingungen im Hinblick auf die Belastungsgrenzen der Motorkomponenten unter Berücksichtigung aktueller und zukünftiger Anforderungen an Wirkungsgrad und Emissionen von Gasmotoren

1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Erhöhung der Belastbarkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer tribologisch höchstbeanspruchter Komponenten in Gasmotoren. Insbesondere sollen Konzepte für effizientere Motoren mit erhöhtem mechanischem Wirkungsgrad entwickelt werden, die emissionsarm sind. Erreicht werden soll dies durch den Einsatz verbesserter Werkstoffe und Schmierstoffe für Motorkomponenten in thermisch und tribologisch am höchsten belasteten Bereichen, insbesondere im Bereich der Ventilführung und des Ventilsitzes. Zur Umsetzung dieser Zielstellungen sollen folgende Schwerpunkte verfolgt werden:

- Zusammen mit den Zielvorgaben von **MAN** sollen für mobile und stationäre Anwendungen Lastenheftvorgaben wie Leistungssteigerung durch Zylinderspitzenendruckerhöhung bei einzuhaltender Abgashöchsttemperatur, Ziellebensdauererhöhung durch eine neue Lkw-Anwendung statt einer reinen Bus-Anwendung sowie für den stationären Einsatz bei unverändert hoher Lebensdaueranforderung Lastenheftvorgaben wie eine deutliche Leistungssteigerung definiert werden (**IAVF**).

- Es sollen von der **IAVF** in Kooperation mit **Bleistahl** die tatsächlichen Beanspruchungen brennraumnaher Komponenten eines Gasmotors in Abhängigkeit ihrer Nähe zum Brennraum mittels thermometrischer Messungen an Ventilsitzringen und Ventilführungen im befeuerten Motor ermittelt werden. Diese sollen als Auslegungsgrundlage für die von den Partnern (**IAVF**, **IWM**, **Fuchs**, **Bleistahl**) durchzuführenden Untersuchungen an verschiedene Komponentenprüfständen verwendet werden.
- Einsatz der neusten und leistungsfähigsten Werkstoffe im Bereich des Ventiltriebs (Ventilsitzring, Ventilführungen) zur Steigerung der Lebensdauer und Anpassung an zukünftige Herausforderungen an den Prüfständen (**IAVF**, **IWM**, **Bleistahl**) nach Entwicklung durch **Bleistahl**.
- Verwendung (**IAVF**, **IWM**, **Bleistahl**, **Fuchs**) und Qualifizierung von thermisch und chemisch hoch beständigen Motorölen sowie von effizienzsteigernden Motorenölen im Hinblick auf maximale Verbrauchssenkung nach Entwicklung durch **Fuchs**.
- Entwicklung von Konzepten zur Steigerung von Leistung, Wirkungsgrad und Robustheit sowie zur Reduzierung der Emissionen von Gasmotoren der Sechszylinderklasse (**IAVF**).
- Systemoptimierung zur Abstimmung der Betriebsbeanspruchungen auf die Belastungsgrenzen der Werkstoffe (**IAVF**).
- Demonstration eines Konzeptes für langlebige effiziente Gasmotoren anhand eines aufgeladenen Sechszylindermotors durch **IAVF** in Zusammenarbeit mit **MAN**.

2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde mit Volkswagen und seinem TGI-Gasmotor begonnen. Während des Projektverlaufs hat sich VW aus dem Gasmotorengeschäft und in der Folge auch aus dem Forschungsvorhaben zurückgezogen. Daher wurde mit der Suche nach einem neuen Kooperationspartner begonnen. Dieser wurde intensiv im europäischen Raum mit Fokus auf Deutschland gesucht. Mit MAN konnte schließlich ein leistungsstarker Partner gewonnen werden, der dieselben Motoren sowohl in mobilen HD- als auch stationären BHKW-Anwendungen einsetzt. Dies erlaubte neben der Optimierung für mobile Anwendungen auch eine gleichzeitige Optimierung für stationäre BHKW-Anwendungen wie z.B. in Quartiersanwendungen. Wegen der Suche nach einem neuen Projektpartner, während der das Forschungsvorhaben ruhte, den erneuten Planungs- und Prüfstandsvorarbeiten nun für eine HD-/BHKW- statt Pkw-Anwendung sowie der Lieferkettenproblematik infolge der Corona-Krise und dem damit einhergehenden Verzug zum ursprünglichen Meilensteinplan wurde das Forschungsvorhaben kostenneutral um 9 Monate verlängert. Diese Zeit konnte erfolgreich verwendet werden, um für die IAVF und auch die anderen Partner im Gesamtverbundvorhaben wichtige Ergebnisse zu erzielen, die zukünftig erfolgsversprechend verwertet werden können.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in enger Verzahnung der Kooperationspartner in die Arbeitspakete:

AP1: Pflichtenheft (**IAVF**)

AP2: Werkstoffoptimierung (**Bleistahl**)

AP3: Schmierstoffoptimierung (**Fuchs**)

AP4: Tribologische Konzepte (**IWM**)

AP5: Bauteilprüfung (**IAVF, IWM**)

AP6: Systemprüfung (**IAVF** mit Unterstützung **MAN**) und

AP7: Demonstration (**IAVF** mit Unterstützung **MAN**)

mit **IAVF** als Konsortialführer und Koordinator

untergliedert. Alle Arbeitspakete wurden durchgehend von Beginn bis Ende des Forschungsvorhabens bearbeitet. Durch regelmäßige Projektmeetings und bilaterale Treffen konnte eine gute Verzahnung der Arbeitspakete und der Partner erreicht werden. Projektanpassungen durch neue Ergebnisse konnten iterativ einbezogen und zur Erreichung der geplanten Ziele für die IAVF und die Partner erfolgreich genutzt werden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrecht, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

a) Effizienz und Nachhaltigkeitspotenzial von Gasmotoren

Gasbetriebene Fahrzeuge stellen eine weithin praktikable Lösung zur erheblichen Senkung von Emissionen dar, da sie im Vergleich zu dieselbetriebenen Motoren insbesondere weniger Partikelemissionen erzeugen und wesentlich leiser sind. Bei Verwendung von aufbereitetem Biogas, sog. Biomethan, stellen Gasmotoren eine nachhaltige und weitgehend CO₂-neutrale Serientechnologie par excellence dar. Darüber hinaus erscheinen die neuen „Power-to-Gas“-Technologien, mit denen aus regenerativen Energiequellen gasförmige Kraftstoffe wie Wasserstoff und dessen Derivate erzeugt werden, für zukünftige robuste Antriebstechnologien aus verschiedenen Gründen überaus attraktiv.

MAN Truck & Bus, hat einen Sechszylinder-Gasmotor für mobile Anwendungen entwickelt, der bei einer Leistung von 235 kW die Abgasstufe EURO VI_d erfüllt. [1]. Darüber hinaus bietet MAN Truck & Bus, einen aufgeladenen Mager-Gasmotor für stationäre Anwendungen mit 220 kW an, der die 2020 gültigen Grenzwerte auf unterschiedlichen Märkten erfüllt. Um zukünftige Emissionsgrenzen zu erfüllen, müssen Mager-Gasmotoren mit SCR-Katalysatoren ausgerüstet werden. Das bedeutet für diese Leistungsklasse eine erhebliche Mehrinvestition. Dadurch rücken Lambda-1-Brennverfahren in den Fokus, da diese mittels Drei-Wege-Katalysator eine wirtschaftliche Abgasreinigung ermöglichen. Um Leistungsdichten und Wirkungsgrade wie mit Mager-Brennverfahren zu erreichen, sind jedoch Technologien wie z.B. Turboaufladung für höhere Abgastemperaturen zwingend notwendig. Die resultierenden thermischen Belastungen, in Kombination mit den vom Markt geforderten Laufzeiten, erfordern höchstrobuste abgasführende Komponenten und Öle.

Größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der Kraftstoffe und die für Erdgas notwendigen höheren Zündtemperaturen erfordern bereits besonderes Augenmerk auf die Reibungs- und Verschleißigenschaften der höchstbelasteten Motorkomponenten. Stand der Technik sind hierbei nitrierte Ventilsitzflächen, sintermetallurgisch hergestellte Ventilsitzringe und Hochleistungs-Messingwerkstoffe für die Ventilfehrung. Außerdem werden in der Kolben-Zylinder-Einheit hoch verschleiß- und temperaturbeständige Werkstoffe z.B. für Kolbenringe verwendet. Auch im Hinblick auf die hohen Spitzendrücke sind konstruktive und werkstofftechnische Maßnahmen notwendig, um einen effizienten und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

Mit Power-to-Gas (PtG) bzw. Power-to-Liquid (PtL) eröffnet sich schließlich auch die Möglichkeit einer nachhaltigen Mobilität bei einer weitgehenden Beibehaltung der Infrastruktur und der Technologie von Verbrennungsmotoren. Eine Nutzung dieser Technologien zur Energiespeicherung und Erzeugung klimaneutraler Kraftstoffe (z.B. aus Sonnen- und Windenergie) ist hoch realistisch [2]. Ein erheblicher Vorteil ergibt sich hier für die Variante Power-to-Gas, da der Energiebedarf für Power to Liquid (PtL) in einer "Well-to-wheel"-Betrachtung (in kWh je gefahrenem km) mehr als doppelt so hoch ist wie bei PtH₂ oder PtCH₄. [3].

b) Tribologische Aspekte

Aus tribologischer Sicht ist zunächst der Aspekt der Reibung und der dadurch verursachten Energieverluste in Motoren bedeutend. Grundsätzlich lassen sich die Reibungsverluste von Verbrennungsmotoren sowohl über eine Erhöhung der äußeren Belastung im tribologischen System als auch durch die Verringerung der Reibung im eigentlichen Kontakt reduzieren. Während im ersten Fall das Ziel primär eine Reduzierung des Energieaufwandes zum Bewegen der mechanischen Bauteile des Motors sowie die Verringerung der hydraulischen Verluste im Ölkreislauf beinhaltet und in der Regel der Verschleiß nicht abnimmt, verringert sich im zweiten Fall unmittelbar das Energieniveau der beteiligten Stoffbereiche. Weniger Verschleiß ist die Folge. Eine Übersicht von Maßnahmen zur Reduzierung der Reibungsverluste in Verbrennungsmotoren gibt Abbildung 1.



Abbildung 1: Ansätze zur Reduzierung der Reibung in Verbrennungsmotoren. [4]

Nennenswerte Verbesserungen wurden in der Vergangenheit noch durch neuere Motorkonstruktionen erreicht, bei denen zunehmend auch Wälzlagerungen zum Einsatz

kommen. Ein nur bei einer Neukonstruktion möglicher Versatz der Kurbelwellenachse gegenüber der Zylinderachse verringert die Kolbenseitenkräfte während der Verbrennungsphase und trägt damit ebenfalls zur Reduzierung der Reibungsverluste bei. Die Reduzierung der Reibungsverluste über die Endbearbeitung bietet zusätzliches Potenzial [5]. Da der überwiegende Teil der Motoren am Ende der Fertigung keinen definierten Einlauf erhält, steht dieser als Mittel zur Reibungsreduzierung nur eingeschränkt zur Verfügung. Über das Grundmaterial und mögliche Beschichtungen hinaus wurde das Potenzial neuer Additive für Motoröle zur Reibungsreduzierung bereits in der Vergangenheit durch die Motorenentwickler intensiv genutzt.

In Abbildung 2 ist gezeigt, dass ein erheblicher Teil der Kraftstoffenergie in einem Verbrennungsmotor durch Reibung verloren geht.

Die Reibungsverluste haben im gezeigten Beispiel mit 11,5% einen hohen Anteil. Jedes Prozent Reibungsminderung im Motor würde die für den Antrieb des Fahrzeugs zur Verfügung stehende mechanische Energie direkt erhöhen und somit ein Mehrfaches der durch Reibminderung eingesparten Energie an Kraftstoffeinsparung ermöglichen.

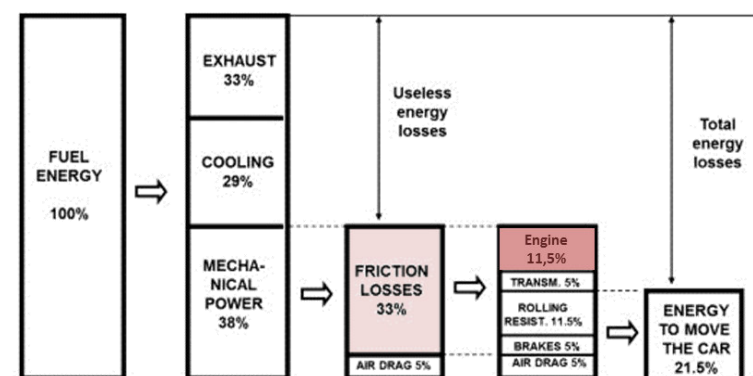


Abbildung 2: Aufschlüsselung der Energieverteilung eines Kraftstoffs bei einem Pkw. [4] Die Verluste durch Reibung im Motor sind farblich hervorgehoben.

Eine Erhöhung des Wirkungsgrades durch eine schnellere, effizientere Verbrennung mit höheren Verbrennungsdrücken und -temperaturen führt zu höheren mechanischen und thermischen Belastungen der Motorkomponenten und damit zu mehr Verschleiß.

In der Literatur wird die Paarung Ventilteller-Ventilsitzring aus Verschleißgesichtspunkten häufig als kritischste Baugruppe in Gasmotoren angegeben.[7][8] Wichtige Verschleißfaktoren am Ventilsitz von Gasmotoren sind die hohen Bauteiltemperaturen und das Fehlen eines Schmierstoffs. Insgesamt sind die Auslassventile wegen der höheren Temperaturen im Auslass und des fehlenden „Gum Content“ in den Ablagerungen grundsätzlich verschleißanfälliger als die Einlassventile von Gasmotoren. Temperatur und Verbrennungsdruck sind primär durch den Prozess bedingt. Direkt beeinflussen lassen sich Materialien, Geometrie und der Auftreffimpuls durch die Federkraft und die Form der Nocken. Die Steifigkeit der Ventile und die Wärmeleitfähigkeit der Ventilsitzringe werden durch die Materialwahl und den Ventilsitzwinkel mitbeeinflusst. Chemische Einwirkungen im Betrieb und die erreichbare Maßhaltigkeit bei Fertigungsprozessen hängen ebenfalls teilweise mit den ausgewählten Werkstoffen zusammen. Optimierungspotenzial bei der Verschleißverringerung ergibt sich also bei Materialwahl, Sitzwinkel und Ventildurchmesser. Der Ventildurchmesser hängt dabei von der notwendigen Menge an Luft oder Gemisch ab, die im Saughub in den Brennraum gefördert werden muss. Eine Verringerung des Ventildurchmessers erhöht also

die Ladungswechselverluste oder senkt den Liefergrad, so dass mit Leistungseinbußen gerechnet werden muss. Eine Vergrößerung des Ventildurchmessers verringert die Steifigkeit des Ventils und erhöht dessen Temperatur, da nur über Ventilsitz und Ventilschaft Wärme abgeleitet werden kann. Bei größerer Entfernung von Ventilsitz und Ventilmitte kann sich daher eine größere Temperaturdifferenz ausbilden. Eine derartige Änderung ist daher aus Verschleißperspektive nicht sinnvoll. Übliche Sitzwinkel liegen zwischen 30° und 45° . 45° -Winkel sind vor allem aus strömungsmechanischer Sicht interessant, da sie die einströmende Luft bzw. das einströmende Gemisch weniger abbremsen. Der Auftreffimpuls erzeugt beim Schließen des Ventils in gleichem Maße reibende und schlagende Beanspruchung am Tribokontakt. Die gängigste Methode, den Verschleiß von Ventiltellern und Ventilsitzringen in Gasmotoren zu reduzieren ist die Änderung der Zusammensetzung der zugrundeliegenden Materialien.

Das System Ventilschaft-Ventilführung ist von der Verbrennung nur mittelbar betroffen. Die Temperaturen des Ventilschafts sind in der Regel deutlich geringer als die des Ventilsitzes. Selbst wenn ein Hohlventil zum Einsatz kommt, das die vertikale Wärmeleitung im Ventil begünstigt, werden nur ca. 30% der Ventilwärmelast über den Ventilschaft und die Führung abgeleitet. Daher ist neben der Wahl der geeigneten Materialien für die Paarung Ventilschaft-Ventilführung vor allem die Darstellung eines geeigneten Schmierfilms wichtig zur Vermeidung von unzulässig hohem Verschleiß. Wegen der geringen Belastung des Ventilschafts stehen für diesen sehr viele Materialoptionen offen. Wird kein Bi-Metall-Ventil verwendet ist der Schaft aus dem gleichen Basismaterial wie der Ventilsitz auch. Er wird allerdings nicht gepanzert, in manchen Fällen aber verchromt. Anders als am Sitz wird das Ventil am Schaft aktiv geschmiert. Das Schmieröl wird durch die Öffnungsbewegung des Ventils von oben durch die Ventilschaftdichtung gezogen. Einer Rückbewegung des Öls durch die Schließbewegung oder den Druck der entweichenden Abgase am Auslassventil kann durch die Verwendung einer Schaftdichtung mit Gasgegendrucklippe entgegengewirkt werden, die bei Gasmotoren üblich ist. Der Eintrag von Motoröl ist neben den Eigenschaften der Dichtlippe von der Radialkraft der Ventilschaftdichtung und der Ölviskosität abhängig. Ölverluste am Ventilschaft ergeben sich durch den Abtransport im vorbeiströmenden Gas sowie chemische Reaktionen mit Abgasen und sind somit stark von Ventilschaft- und Abgastemperatur abhängig. Große Ventilschaftspiele begünstigen den Ölverlust. Ein reduziertes Ventilschaftspiel kann allerdings im Warmlauf des Motors zu Problemen führen, da sich zunächst wenig Öl in der Führung befindet und gleichzeitig das Ventilspiel durch die schnelle Erwärmung des Ventils weiter verringert wird. Ein Klemmen oder Fressen des Ventils ist die Folge.

Nach [9] kann auch an Ventilführungen von Gasmotoren deutlich erhöhter Verschleiß auftreten. Allerdings wird der erhöhte Verschleiß im beschriebenen Fall auch nach einer Reduktion der Radialkraft der Ventilschaftdichtung an demselben System trotz eines stärker ausgeprägten Schmierfilms festgestellt. Möglichkeiten zur Verschleißvermeidung umfassen also sowohl die Auswahl geeigneter Materialien und die Erzeugung hochqualitativer Oberflächen mit guter Ölhaltfähigkeit als auch die Gewährleistung eines konstanten Schmierfilms in der Führung.

Auch die zur Schmierung benötigten Motoröle müssen auf möglichst kleine Reibung hin entwickelt werden – z.B. durch Verminderung der Ölviskosität. Bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsdichte des Motors zur Steigerung des mechanischen Wirkungsgrads ergibt sich hier jedoch ein Risiko verstärkter Misch- oder Grenzreibungszustände, da hier primär die Pumpverluste im Ölkreislauf und nicht die eigentliche Reibung im Kontakt reduziert werden. Im tribologischen Kontakt können durch die Absenkung der Viskosität die

Schmierungsbedingungen sogar verschlechtert und starker Verschleiß der Motorkomponenten verursacht werden [9].

c) Tribologie und Verschleißanalyse

Die Überprüfung der Robustheit kritischer tribologischer Systeme sowie die Lebensdauer- auslegung des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Motorkomponenten werden international fast ausschließlich diskontinuierlich und nicht hochauflösend betrieben. Damit verbunden sind ein unzureichendes Verständnis der tribologischen Prozesse sowie eine große Unschärfe der Lebensdauerabschätzungen. Mit Hilfe der Radionuklidtechnik (RNT), mit der typische Verschleißraten geschmierter Gleitkontakte im Nanometer pro Stunde-Bereich kontinuierlich erfasst werden können, sowie der Einbindung von oberflächenphysikalisch/- chemischen Messverfahren können die tribologischen Prozesse charakterisiert und die für eine genaue Lebensdauerabschätzung notwendigen Extrapolationen durchgeführt werden.[11][12]

4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

- [1] MAN Truck & Bus SE, April 2023,
https://www.man.eu/de/de/bus/der-man-lion_s-city/neue-antriebe.html
- [2] Deutsche Energie-Agentur: „Potenzialatlas Power-to-Gas“, Juni 2016,
https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf#
- [3] Wurster, R.: Chancen und Herausforderungen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen- technik, Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, 2018.
- [4] Berlet, P. et al: Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren, Auswirkungen auf Reibung und Verschleiß, Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, 2013.
- [5] Berlet, P: Einfluss spanender Endbearbeitungen mit geometrisch unbestimmten Schneiden auf tribologische Funktionsflächen im Motorenbau sowie auf Reibung und Verschleiß, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2009.
- [6] K. Holmberg et al.: Global energy consumption due to friction in passenger cars, Tribology International 47 (2012) 221-234.
- [7] Messer, M.: Tribologische Untersuchungen des Systems Ventilsitz-Ventilsitzring. Dissertation, Gottfried Wilhelm-Leibnitz-Universität Hannover, 2013.
- [8] Christopherson, D. et al: Neue Werkstoffe für Ventilsitzringe. MTZ, 11 2015, 52–57.
- [9] Heinemann, R. M.: Vergleichende experimentelle Untersuchungen des Schmierfilms im auslassseitigen tribologischen System Ventilführung-Ventilschaft an einem befeuerten Motor unter Benzin- und Erdgasbetrieb, Dissertation, Wilhelm-Leibnitz- Universität Hannover, 2017.
- [10] V. Wong et al.: Overview of automotive engine friction and reduction trends – effects of surface, material, and lubricant-additive technologies, Friction 4 (2016) 1-28.
- [11] Berlet, P. et al: Optimierung der Tribologie im Zylinderkopf mit Hilfe von Nano- Messtechniken, VDI-Tagung Ventiltrieb und Zylinderkopf, Fellbach, 2004.
- [12] Berlet, P. et al: Optimized machining processes reduce friction losses and component wear in engines, 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, (2013) 1255-1272.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Nur durch die Zusammenarbeit der verschiedenen Projektpartner im Verbundvorhaben GESIR (Gasmotoren mit energieeffizienten Systemtechnologien und integraler Robustheit) konnten die auch wissenschaftlich weit beachteten sehr positiven Ergebnisse erzielt werden.

Mit der 2022 veröffentlichten Renewable Energy Directive (RED) III wurde das Gesamtziel der Europäischen Union für den Verbrauch erneuerbarer Energie bis 2030 auf 45 % angehoben. Damit ist zu erwarten, dass gasförmige Kraftstoffe auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom noch stärker an Bedeutung gewinnen.

Verbrennungsmotoren für Wasserstoff und Methan können für die Erreichung dieses Ziels einen erheblichen Anteil leisten, u.a. da sich beide Kraftstoffe mittels Power-to-X-Verfahren herstellen lassen. Darüber hinaus sind die Anforderungen von Verbrennungsmotoren an die Reinheit des Kraftstoffs weniger hoch als beispielsweise bei Brennstoffzellen. Im Projekt GESIR sind verbesserte Werkstoffe und Schmierstoffe entstanden. Die Projektpartner haben hier die Möglichkeiten moderner Herstellungsverfahren sowie Öl- und Additivtechnologien genutzt, um maßgeschneiderte Materialien und Schmierstoffe zu generieren. Darüber hinaus wurden tribologische Prüfverfahren verbessert, um die Belastbarkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der tribologisch höchstbeanspruchten Komponenten zu gewährleisten und weitere Steigerungen des Wirkungsgrads der Motoren zu ermöglichen.

Zu den Zielvorgaben von **MAN** zählt für mobile Anwendungen eine Leistungssteigerung von 235 auf 295 kW vor allem durch die Erhöhung des Zylinderspitzen drucks auf maximal 160 bar bei einer Abgastemperatur von maximal 800 °C. Für eine Lkw-Anwendung des bisher nur im Bus eingesetzten Motors muss die Ziellebensdauer von 800.000 km auf 1.500.000 km gesteigert werden. Für den stationären Einsatz bei einer unverändert hohen Lebensdaueranforderung von 25.000 h für den Zylinderkopf soll die Leistung von gegenwärtig 140 kW auf mindestens 200 kW erhöht werden.

Um die tatsächlichen Beanspruchungen brennraumnaher Komponenten eines Gasmotors in Abhängigkeit ihrer Nähe zum Brennraum zu ermitteln, wurden von der **IAVF** thermometrische Messungen an Ventildführungen und Ventilsitzringen im Vollmotor durchgeführt. Während des Motorbetriebs nimmt die Bauteilhärte durch die thermische Beanspruchung ab. Durch anschließende Härtemessungen an der Bauteiloberfläche und die Kenntnis des Anlassverhaltens über der Temperatur im Vergleich zu unbelasteten Schwesterbauteilen kann auf die Bauteiltemperatur während des Betriebs geschlossen werden. Darüber hinaus ermöglichen metallographische Schliffe und die Härtemessungen am Schliff auch die Bestimmung der Temperaturverläufe im Material. Entsprechend konnten die im Motor herrschenden Temperaturen von der **IAVF** in Zusammenarbeit mit **Bleistahl** bestimmt werden, die für die Ölentwicklung bei **Fuchs**, die Bauteilentwicklung bei **Bleistahl** und die Bauteilprüfung sowie die Simulation des Tribosystems bei **IWM** wichtige Eingangsparameter darstellten. Des Weiteren wurde bei der **IAVF** die Schmierfilmsituation im Ventildführungs-Ventilschaftbereich aufgeklärt, die für die Simulationsuntersuchungen bei **IWM** eine wichtige Eingangsgröße darstellten. Anhand dieser Ergebnisse konnten **Fuchs** und **Bleistahl** zusammen mit den Randbedingungen von **MAN** optimierte Schmierstoffe und Bauteile für den Ventiltrieb der Zukunft entwickeln. Diese optimierten Schmierstoffe und Bauteile wurden bei **IWM** sowie **IAVF** auf den Prüfständen getestet und in Iterationen verbessert. Die iterativ optimierten Schmierstoffe und Bauteile wurden anschließend zu Demonstrationszwecken auf dem System-Prüfstand einem 6-wöchigen RNT-Lauf unterzogen und die Ergebnisse auf

Lebensdauerlänge extrapoliert. Dadurch gelang in **Zusammenarbeit aller Partner** eine Optimierung der Applikation des Motors am Prüfstand, sowie eine Optimierung von Bauteilen und Schmierstoffen für den Motorbetrieb.

Die gut verzahnte **Zusammenarbeit** erfolgte durch regelmäßige Projektmeetings und Absprachen sowie bilaterale Treffen einzelner Partner.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ansätze zur Reduzierung der Reibung in Verbrennungsmotoren. [4].....	4
Abbildung 2:	Aufschlüsselung der Energieverteilung eines Kraftstoffs bei einem Pkw. [4] Die Verluste durch Reibung im Motor sind farblich hervorgehoben.	5

Individueller Schlussbericht

IAVF Antriebstechnik GmbH

II. Eingehende Darstellung

Forschungsvorhaben GESIR

Gasmotoren mit energieeffizienten Systemtechnologien
und integraler Robustheit

Förderkennzeichen: 19I19006A

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2019 – 31.03.2023

Projektleitung:

Dr.-Ing. P. Berlet, IAVF Antriebstechnik GmbH

Verbundpartner:

Bleistahl Produktions-GmbH & Co. KG (Bleistahl)	19I19006D
Fuchs Lubricants Germany GmbH (Fuchs)	19I19006C
IAVF Antriebstechnik GmbH (IAVF)	19I19006A
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM (IWM)	19I19006E
MAN Truck & Bus SE (MAN)	-

gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Projektträger:

TÜV Rheinland Consulting GmbH

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	1
1.1 Ermittlung der tribologischen Beanspruchungen (AP1 und AP5)	1
i. Zielmotor und Zielvorgaben (AP1).....	1
ii. Thermometrische Messungen an Ventildführungen und Ventilsitzen (AP5)	2
1.2 Charakterisierung der Schmierungssituation (AP5)	4
1.3 Systemprüfung und Demonstration (AP6 und AP7).....	7
i. Steigerung des Wirkungsgrades und Reduzierung der Emissionen	7
ii. Reibleistungsuntersuchungen mit effizienzsteigernden Motorölen.....	11
iii. Verschleißanalysen an der Ventildführung.....	11
iv. Extrapolationsbetrachtungen	16
1.4 Zusammenfassung und Ausblick.....	17
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortschreitenden Verwertungsplans	21
5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	22
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11	22
Abbildungsverzeichnis.....	23

Einleitung

Die Steigerung der Effizienz von Gasmotoren und die Senkung der Emissionen sind von zentraler Bedeutung für die Mobilität und die Energietechnik. Eine Steigerung des indizierten Wirkungsgrads solcher Motoren erfordert jedoch höhere Verbrennungsdrücke und Temperaturen. Dadurch steigen die Belastungen der Motorkomponenten erheblich, wodurch die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Motoren teilweise deutlich verkürzt wird. Insbesondere werden die Belastungen tribologisch hoch beanspruchter Komponenten und Schmierstoffe kritisch. Die begrenzte Verschleiß- und Oxidationsbeständigkeit dieser Komponenten verhindert somit bisher die weitere Effizienzsteigerung der Gasmotoren. Zusätzlich müssen die Motoren für die Verbrennung von verschiedenen Kraftstoffen ertüchtigt werden.

Angesichts dieser Bestrebungen, die Leistung von Gasmotoren weiter zu erhöhen und sie für neue Kraftstoffe wie z.B. Wasserstoff und dessen Derivate zu ertüchtigen, besteht ein dringender Bedarf an technisch und wirtschaftlich machbaren Lösungen. Um hierbei akzeptable Lebensdauern der Motoren und Motorkomponenten zu erreichen, ist es notwendig, den Verschleiß der Motorkomponenten und die Degradation der Schmierstoffe auch bei höheren Belastungen niedrig zu halten.

Lösungsansätze hierfür, die im Vorhaben verfolgt wurden, sind:

- I. Erhöhung der Verschleißbeständigkeit im Bereich der Ventilsitzringe, Ventile und Ventilführungen durch verbesserte, tribologisch angepasste Werkstoffe (Testing u.a. durch IAVF)
- II. Entwicklung thermisch hoch stabiler Schmierstoffe (Testing u.a. durch IAVF)
- III. Erarbeitung neuer Gemischbildungskonzepte und präzise Abstimmung der Betriebsbedingungen im Hinblick auf die Belastungsgrenzen der Motorkomponenten unter Berücksichtigung aktueller und zukünftiger Anforderungen an Wirkungsgrad und Emissionen von Gasmotoren (IAVF in Zusammenarbeit mit MAN)

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1 Ermittlung der tribologischen Beanspruchungen (AP1 und AP5)

i. Zielmotor und Zielvorgaben (AP1)

Bei dem eingesetzten Motor handelt es sich um einen von MAN entwickelten Gasmotor mit sechs Zylindern, Ladeluftkühlung, Turboaufladung und zentralem Gasmischer. Durch ein leichtes Absenken des Verdichtungsverhältnisses und weitere Anpassungen wurde aus dem ursprünglichen Dieselmotor ein Gasmotor entwickelt. Da der Motor an BHKW-Hersteller ohne Motorsteuerung ausgeliefert wird, musste zunächst eine Motorsteuerung und -überwachung in Eigenregie realisiert werden. Den Aufbau auf dem Vollmotorenprüfstand zeigt Abbildung 1.



Abbildung 1: Aufbau des Versuchsmotors im Vollmotorenprüfstand

Zu den Zielvorgaben des Projektpartners MAN zählt für mobile Anwendungen eine Leistungssteigerung von 235 auf 295 kW vor allem durch die Erhöhung des Zylinderspitzenendrucks auf maximal 160 bar bei einer Abgastemperatur von maximal 800 °C. Für eine Lkw-Anwendung des bisher nur im Bus eingesetzten Motors muss die Ziellebensdauer von 800.000 km auf 1.500.000 km gesteigert werden. Für den stationären Einsatz bei einer unverändert hohen Lebensdaueranforderung von 25.000 h für den Zylinderkopf soll die Leistung von gegenwärtig 140 kW auf mindestens 200 kW erhöht werden.

Für den geplanten Vollmotorbetrieb wurde zunächst mit Unterstützung von MAN ein Lastenheft erstellt und viele der Vorgaben gemeinsam mit den Partnern definiert: Dafür fielen insbesondere im Teamleiter- und Ingenieurbereich viele Arbeitsstunden an. Das Lastenheft konnte mit den Ergebnissen aus den thermometrischen Messungen (siehe Abschnitte ii) erfolgreich erstellt werden.

ii. Thermometrische Messungen an Ventilfehrungen und Ventilsitzen (AP5)

Um die tatsächlichen Beanspruchungen brennraumnaher Komponenten eines Gasmotors in Abhängigkeit ihrer Nähe zum Brennraum zu ermitteln, wurden thermometrische Messungen an Ventilfehrungen und Ventilsitzringen im Vollmotor durchgeführt. Während des Motorbetriebs nimmt die Bauteilhärte durch die thermische Beanspruchung ab. Durch anschließende Härtemessungen an der Bauteiloberfläche und die Kenntnis des Anlassverhaltens über der Temperatur im Vergleich zu unbelasteten Schwesterbauteilen kann auf die Bauteiltemperatur während des Betriebs geschlossen werden. Darüber hinaus ermöglichen metallographische Schliffe und die Härtemessungen am Schliff auch die Bestimmung der Temperaturverläufe im Material.

Auf der Einlassseite überschreitet die Bauteiltemperatur an der Ventilfehrung die untere Auflösungsgrenze von 150 °C nicht nennenswert, Abbildung 2 a). Auf der Auslassseite werden am unteren Ende der Ventilfehrung auch an der Kontaktfläche zum Ventilschaft 300 °C erreicht

und teilweise deutlich überschritten, Abbildung 2 b). Insbesondere in Segment 1, das dem benachbarten Auslassventil des Vierventilmotors näher liegt, werden durch die Beaufschlagung mit heißem Abgas bis zu 370 °C erreicht.

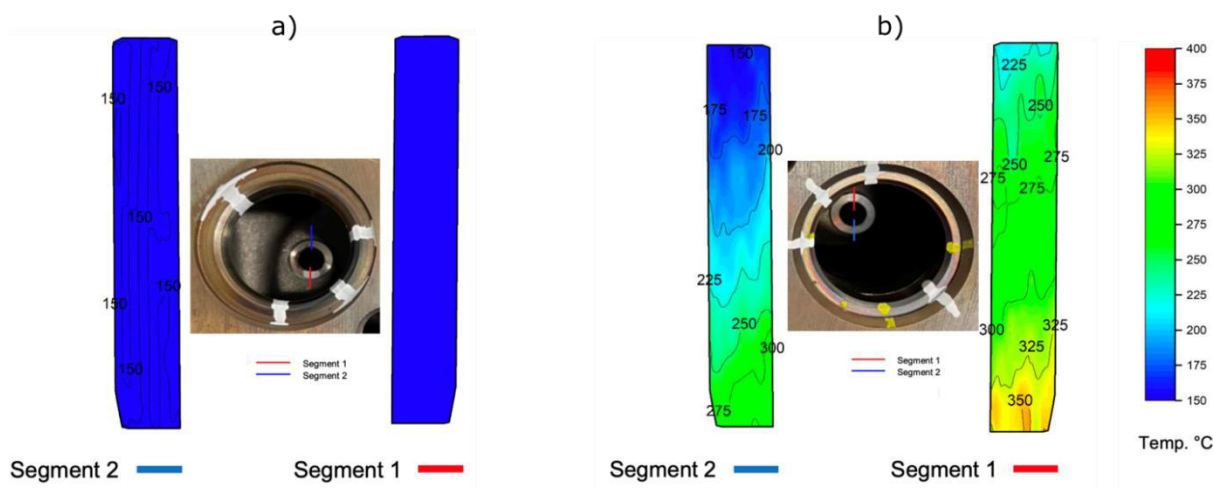


Abbildung 2: Thermometrisch ermittelte Temperaturen an den Ventilfehrungen, a) Einlassseite, b) Auslassseite.

An den Ventilsitzringen werden bereits auf der Einlassseite 300 °C und teilweise noch darüber erreicht, Abbildung 3 a). Da die Sitzringe auch bei geschlossenem Ventil mit heißen Gasen in Kontakt kommen, wurde hier eine maximale Bauteiltemperatur von 355 °C gemessen. Auf der Auslassseite nehmen die Bauteiltemperaturen noch etwas zu und erreichen nahezu 400 °C, Abbildung 3 b). Dabei spielt die Lage im Brennraum eine maßgebliche Rolle. So werden die höchsten Temperaturen in der Nähe der Zündkerze erreicht, wo die Verbrennung beginnt und die thermische Beanspruchung des Materials am längsten dauert. Hier dominiert erfahrungsgemäß die Schmierung durch den Kraftstoff und seine Verbrennungsprodukte über die Schmierung durch Bestandteile des Motoröls.

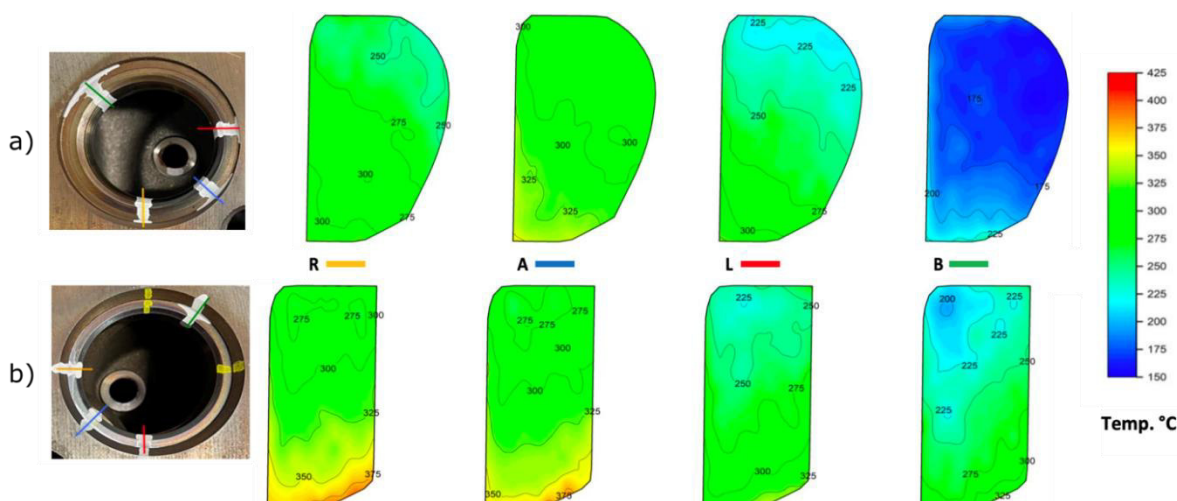


Abbildung 3: Thermometrisch ermittelte Temperaturen an den Ventilsitzringen, a) Einlassseite, b) Auslassseite.

Da der HD-/BHKW-Motor als reiner mechanischer Motor von MAN angeliefert wurde, mussten vor der Durchführung der thermometrischen Messungen alle Ansteuerungen für Gasmischer, Gasfuß, Drehzahl, ...zusammen mit der benötigten Sensorik erst geplant, ausgelegt,

aufgebaut und schließlich in Betrieb genommen werden. Hierfür fielen deutliche Personalkosten im Teamleiter-, Ingenieur- und Mechanik-Bereich sowie Materialkosten für den Motoraufbau an. Motor und Prüfstand wurden von MAN abgenommen. Die Aufgabe konnte erfolgreich abgeschlossen und die Lastenheftvorgaben vervollständigt werden. Weiterhin konnte erfolgreich Randbedingungen für die Auslegung der Komponenten-Prüfstände und für die Simulation geliefert werden.

1.2 Charakterisierung der Schmierungssituation (AP5)

Um die Schmierungssituation im Zylinderkopf unter einsatznahen Bedingungen charakterisieren zu können, wurde ein Zylinderkopfprüfstand mit einem originalen Zylinderkopf des Versuchsmotors konzipiert und aufgebaut. Dadurch konnten vergleichbare Beanspruchungen (Ventilfederkräfte etc.) und Schmierungsverhältnisse (z.B. Öldosierung über Ventilschaftabdichtungen) wie im Vollmotor eingestellt werden, Abbildung 4.

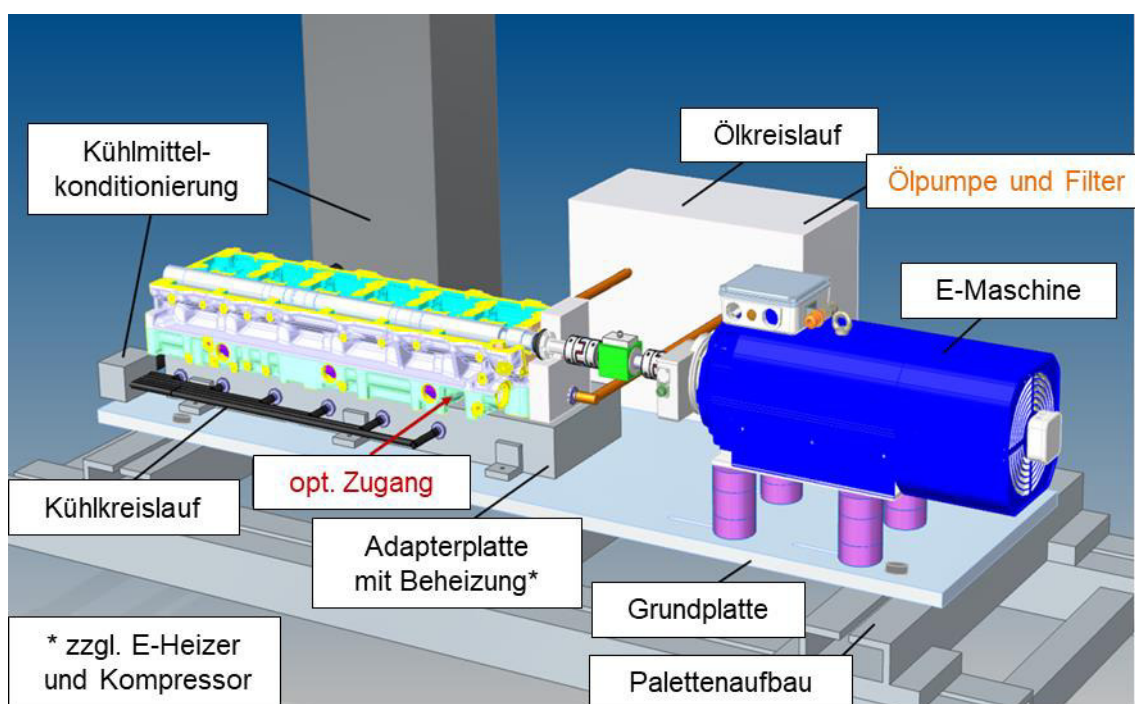


Abbildung 4: Zylinderkopfprüfstand mit einem originalen Zylinderkopf des Versuchsmotors.

Der Zylinderkopf wird über den Kühl- und Ölkreislauf thermisch konditioniert. Zusätzlich wird der Brennraum eines Zylinders mit heißer Druckluft beaufschlagt. Der Heißgasbetrieb erlaubt die Einstellung von Abgasströmen und -drücken sowie Auslassventiltemperaturen wie im Vollmotor.

Ein geschlossenes Modell der Schmierungs- und Verschleißsituation an Ventilführungen im transienten Realsystem ist aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen bis heute nicht vorhanden. Jedoch wurde an einem Pkw-Motor die im Ventilschaft/Ventilführungs-bereich vorherrschende Schmierungssituation mittels optischer Fluoreszenzspektroskopie unter Verwendung einer Saphirführung untersucht [9]. Das hier beschriebene Messverfahren mittels Fluoreszenzspektroskopie wurde an einer Auslassventilführung des Versuchsmotors appliziert. Dazu wurden ein endoskopischer Zugang und eine Hochgeschwindigkeitskamera notwendig. Das Ziel war es, im realitätsnahen Betrieb mit einem minimalinvasiven Zugang, über welchen sowohl die Beleuchtung als auch die Beobachtung stattfindet, die dynamische

Schmierhöhenverteilung zu bestimmen. Mit einer Ventilfehrung in Sandwichbauweise wurde sichergestellt, dass die Ventilfehrung zu großen Teilen in Originalzustand verbleibt. Sowohl die Schmierstoffzufuhr durch die zweilippige Ventilschaftabdichtung im oberen Bereich als auch Wärmeleiteigenschaften der Ventilfehrung entsprachen dem Original. Abbildung 5 zeigt einen Schnitt durch den Zylinder mit dem optischen Zugang für die Ventilfehrung.

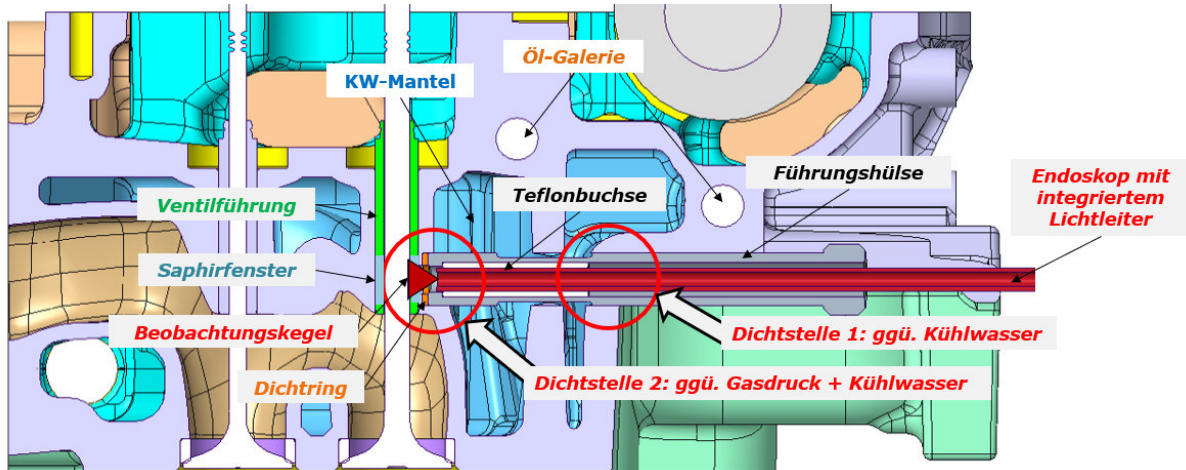


Abbildung 5: Schnitt durch den Zylinder mit dem optischen Zugang für die Ventilfehrung.

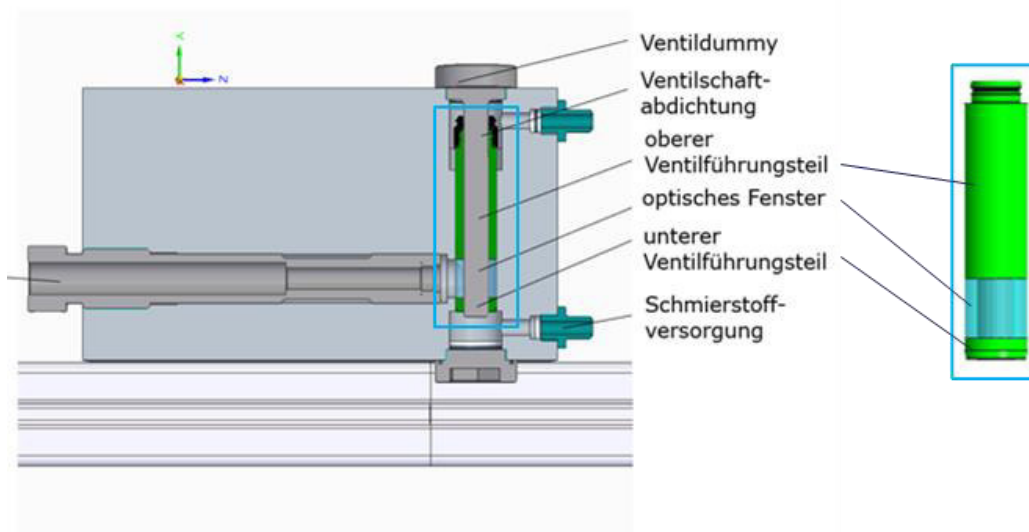
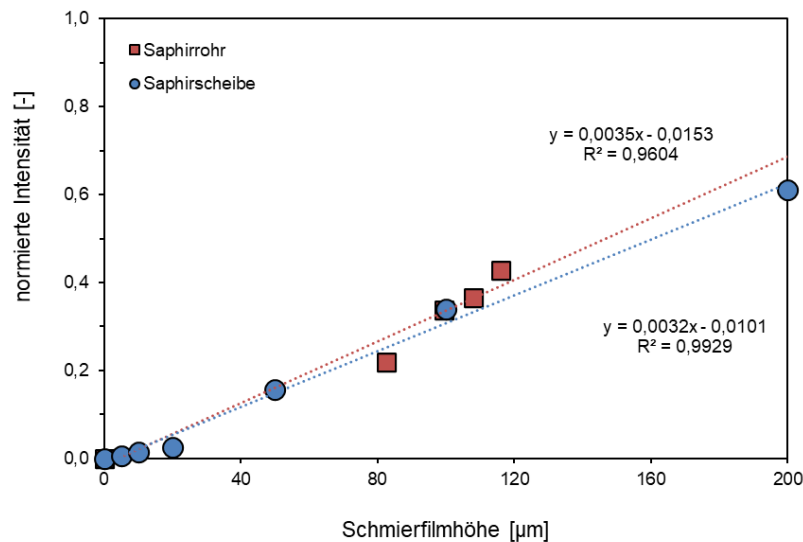


Abbildung 6: Vorrichtung zur Kalibrierung der mittels Fluoreszenzspektroskopie gemessenen Schmierfilmhöhenverteilung.

Um die Schmierungssituation an der Ventilfehrung quantifizieren zu können, wurden mittels der in Abbildung 6 dargestellten Vorrichtung zunächst Kalibriervorversuche durchgeführt. Dazu wurden die für die Untersuchungen vorgesehenen Motoröle mit den fluoreszenzaktiven Tracern Rhodamin 101 und Pyrromethen 567 vorab gemischt und die Vorrichtung damit befüllt. Das Licht einer Hochleistungs-LED wurde über einen Lichtwellenleiter im Endoskop zum Saphirfenster geleitet und dort der Beobachtungsraum ausgeleuchtet, um die Tracer anzuregen. Die von den Tracern emittierte Fluoreszenz wurde von einer Hochgeschwindigkeitskamera über einen zweiten Lichtleiter im Endoskop detektiert. Mittels Nuten in einem Ventilschaft (in Abbildung 6 als Ventildummy bezeichnet), die vorher geometrisch vermessen wurden, konnten definierte Schmierpalte zwischen Ventilschaft und Ventilfehrung in der Vorrichtung eingestellt werden. Durch eine Korrelation zwischen

bekannten Schmierpalten und gemessener Fluoreszenz-Intensität wurde eine (temperaturabhängige) Kalibrierfunktion erstellt. Ergänzt wurden die Kalibrier-Vorversuche durch Korrelationen bekannter Schmierpalte mit gemessenen Intensitäten an einer einfacheren ebenen Geometrie.

Lichteinstellungen: Stromstärke (gekrümmt) = 0,12 A, Stromstärke (eben) = 0,3 A; $T_K = 17^\circ\text{C}$



Funktion für Berechnung Schmierhöhe

$$h = 285,72 \frac{I}{I_0} + 4,37 + 0,71(T - T_k)$$

Abbildung 7: Kalibrierfunktionen zur Bestimmung der Schmierfilmhöhe aus der mittels CCD-Kamera gemessenen normierten Fluoreszenz-Intensität für die ebene Geometrie (blaue Punkte) bzw. die gekrümmte Geometrie (rote Punkte).

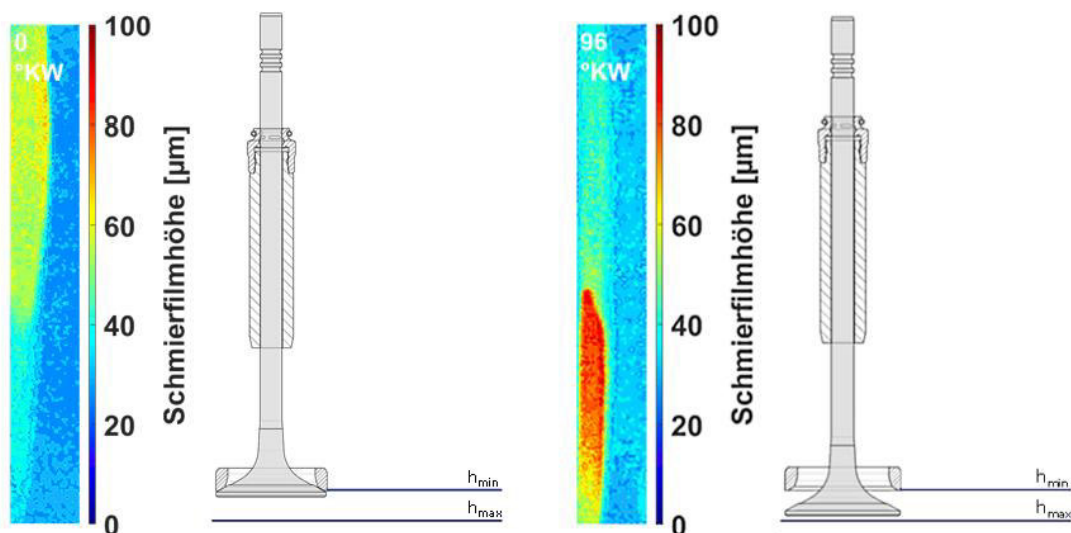


Abbildung 8: Schmierfilmhöhenverteilung in der Ventilfehrung im Betrieb mit der Nockenwellendrehzahl 750 1/min bei Kurbelwellenwinkeln von 0 °KW (links) und 96 °KW (rechts).

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in Abbildung 7 zusammengefasst. Die Nullpunkts-Regressionsgeraden der Fluoreszenz-Intensitäten über den definierten Schmierfilmhöhen

fallen für den ebenen und gekrümmten Kalibrierfall (blaue bzw. rote Punkte in Abbildung 7) nahezu zusammen. Dies bedeutet, dass sich der gekrümmte Fall nicht signifikant vom ebenen Fall unterscheidet. Für den ebenen Fall waren sehr viel mehr Messdaten aus einem größeren Schmierfilmhöhenbereich vorhanden. Der R-Wert war für diesen ebenen Fall größer 0,99 und somit hinreichend verlässlich. Daher konnte aus diesem Datensatz die Intensitäts- und Temperatur-abhängige Funktion zur Ermittlung der Schmierfilmhöhe bestimmt werden.

Abbildung 8 zeigt im Zylinderkopf-Komponentenprüfstand gemessene Schmierfilmhöhenverteilungen bei einer Nockenwellendrehzahl von 750 1/min (Motordrehzahl von 1.500 1/min) beispielhaft nahe des minimalen Ventilhubes bei Kurbelwinkel 0 °KW (Abbildung 8, links) und nahe des maximalen Ventilhubes bei 96 °KW (Abbildung 8, rechts). Bei der Motordrehzahl von 1.500 1/min konnten die Schmierfilmhöhen mittels Fluoreszenz-Spektroskopie mit einer Auflösung von 8 °KW gemessen werden. Wiederholungsmessungen zeigten maximale Abweichungen von 7 %.

Der Komponenten-Prüfstand konnte mit den wichtigen Informationen aus den thermometrischen Messungen für die geplanten Untersuchungen optimal ausgelegt werden. In Zusammenarbeit mit dem KIT konnte die optische Messtechnik für die geplanten Fluoreszenz-Spektroskopie-Untersuchungen konzipiert, geplant, in Voruntersuchungen getestet, aufgebaut und betrieben werden. Dazu fielen vor allem Personalkosten im Ingenieurs- und Studentenbereich sowie Kosten im Bereich FE-Dienstleistungen durch das KIT an, neben einigen Kosten für den Aufbau des Komponenten-Prüfstandes. Die Aufgabe zur Ermittlung der Schmierölsituation im Ventilfehrungsbereich des Motors konnte erfolgreich bearbeitet werden.

1.3 Systemprüfung und Demonstration (AP6 und AP7)

Im Rahmen der Systemprüfung wurden am Vollmotor Untersuchungen zur Steigerung des Wirkungsgrades und zur Reduzierung der Emissionen, Reibleistungsuntersuchungen mit den neuen Motorölen, thermometrischen Messungen zur Ermittlung der relevanten Temperaturen für die Bauteilprüfungen bei IAVF und IWM sowie Verschleißanalysen an der Ventilfehrung durchgeführt.

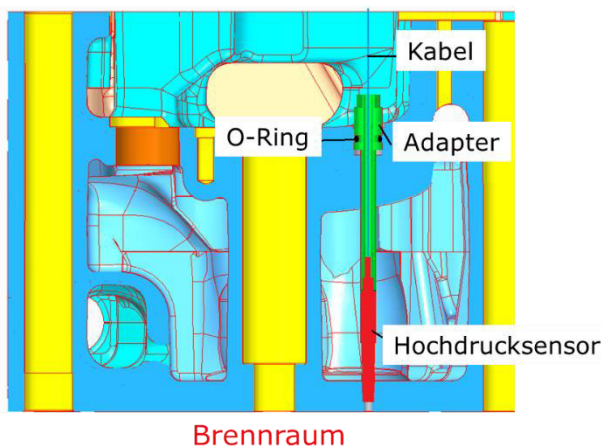
Da der HD-/BHKW-Motor als reiner mechanischer Motor von MAN angeliefert wurde, mussten alle Ansteuerungen für Gasmischer, Gasfuß, Drehzahl, ...zusammen mit der benötigten Sensorik erst geplant, ausgelegt aufgebaut und schließlich in Betrieb genommen werden. Motor und Prüfstand wurden anschließend von MAN abgenommen. Hierfür fielen deutliche Personalkosten im Teamleiter-, Ingenieur- und Mechanik-Bereich sowie Materialkosten für den Motoraufbau an. Die Aufgabe konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

i. Steigerung des Wirkungsgrades und Reduzierung der Emissionen

Für die Untersuchungen zur Steigerung von Leistung und Wirkungsgrad sowie zur Reduzierung der Emissionen unter Berücksichtigung der Vorgaben zu Zylinderdruck und Abgastemperatur war die Bestückung des Motors mit Zylinderdruckaufnehmern notwendig. Da die bei der Entwicklung des Motors eingesetzten Sensoren Kistler 6053CC nicht mehr lieferbar wurden, wurden für Zylinderdruckaufnehmer AVL GH15DKE Adapter zur Verlängerung durch den Wassermantel des Zylinderkopfs konstruiert und gefertigt, Abbildung 9. Darüber hinaus wurden Verschlussstopfen anfertigt, um die Einsatzzeit der Sensoren auf den für diese Untersuchungen erforderlichen Umfang zu begrenzen.

Erste Zylinderdruckmessungen im serienmäßigen Magerbetrieb mit den beiden Zündwinkelauslegungen für die NO_x -Emissionsgrenzen des Motors von 250 und 500 mg/Nm^3 ergaben ausreichend Potenzial für Steigerungen des Zylinderdrucks bis zum maximalen Spitzendruck von 140 bar für die stationäre bzw. 160 bar für die mobile Anwendung, Abbildung 10.

Konstruktion von Adapter und Verschlussstopfen:



Adapter und Sensoren (AVL GH15DKE):



Verschlussstopfen:



Abbildung 9: Querschnitt durch den Zylinderkopf sowie Adapter, Zylinderdrucksensoren und Verschlussstopfen

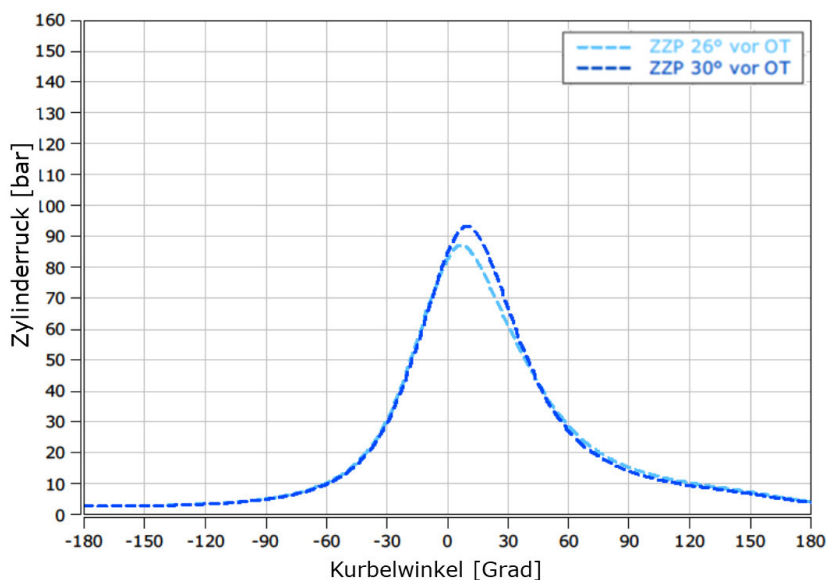


Abbildung 10: Zylinderdruckverläufe (Mittelung über 200 Zyklen) bei 1500 min^{-1} , 1400 Nm, (220 kW) und Referenz-Luftverhältnis 1,73.

Mit dem mageren Referenz-Luftverhältnis liegt der Schwerpunkt der Verbrennung vergleichsweise spät, sodass der Wirkungsgrad mit einem früheren Zündzeitpunkt noch signifikant ansteigt. Allerdings nehmen die NO_x -Emissionen erwartungsgemäß deutlich zu, so dass eine Abgasnachbehandlung unumgänglich ist, Abbildung 11.

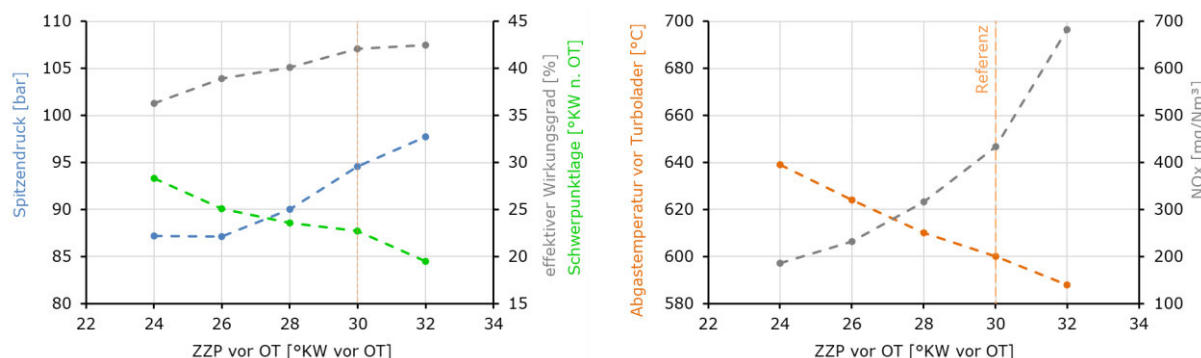


Abbildung 11: Zylinderspitzendruck, effektiver Wirkungsgrad, Verbrennungsschwerpunktlage sowie Abgastemperatur und NO_x-Emissionen über dem Zündzeitpunkt bei 1500 min⁻¹, 1400 Nm, (220 kW) und Referenz-Luftverhältnis 1,73.

Unter der Prämisse einer erforderlichen Abgasnachbehandlung kann die Leistung des Gasmotors mit der aktuellen Auslegung des Turboladers bereits im Magerbetrieb auf 290 kW bei 1800 min⁻¹ angehoben werden. Die Zielleistung für mobile Anwendungen von 295 kW wird bei einem Verbrennungsluftverhältnis von 1,73 schon fast erreicht.

Durch leichtes Anfeuchten des Gemischs wird die Verbrennung schneller, wodurch der Wirkungsgrad unter Referenzbedingungen bis auf 43,3% zunimmt und die Abgastemperatur zunächst sinkt. Bei weiterer Anfeuchtung steigt die Abgastemperatur wieder. Die wirkungsgradoptimale Schwerpunktlage wird dann im Bereich der Klopfgrenze erreicht.

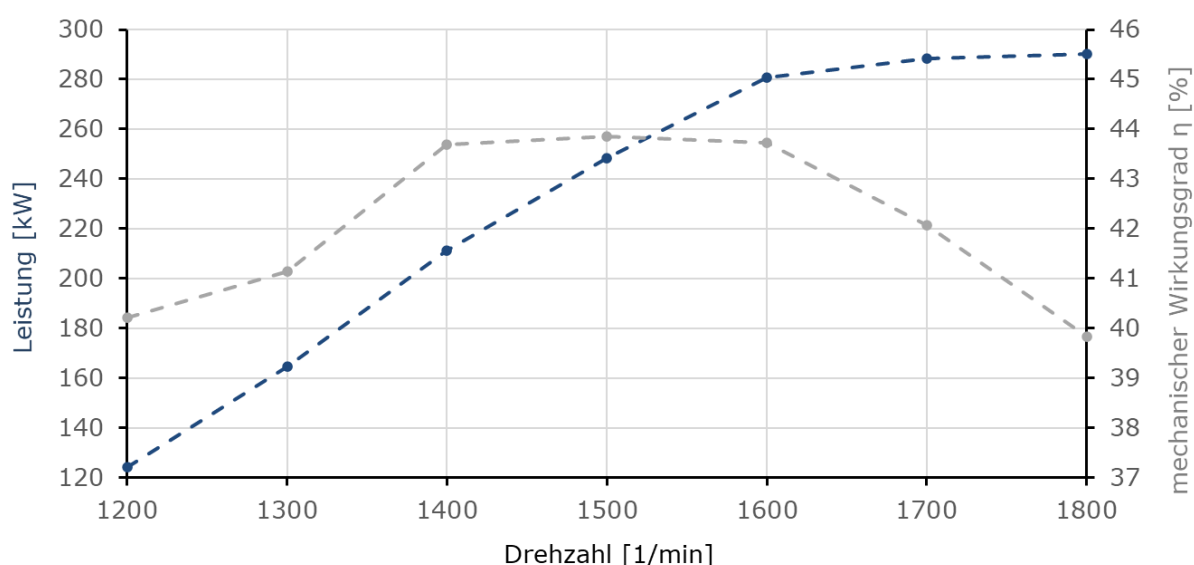


Abbildung 12: Leistung und mechanischer Wirkungsgrad über der Motordrehzahl bei einem Zündzeitpunkt von 30°KW vor OT und Referenz-Luftverhältnis 1,73.

Durch das stöchiometrische Gemisch verschiebt sich die Schwerpunktlage der Verbrennung deutlich nach früh. Die ideale Schwerpunktlage von 6° bis 10° KW nach OT bereits bei Zündzeitpunkten von 20° bis 24° KW vor OT erreicht. Bei diesen Zündwinkeln wird die Leistung durch das Erreichen der Klopfgrenze beschränkt. Ab den späteren Zündwinkeln Bei 18° KW vor OT ist die maximale Abgastemperatur von 800 °C das begrenzende Kriterium. Somit liegt die maximal erreichbare Leistung im stöchiometrischen Betrieb ohne weitere Maßnahmen an der Gemischaufbereitung, der Brennraumform oder dem Verdichtungsverhältnis des Motors bei 199 kW.

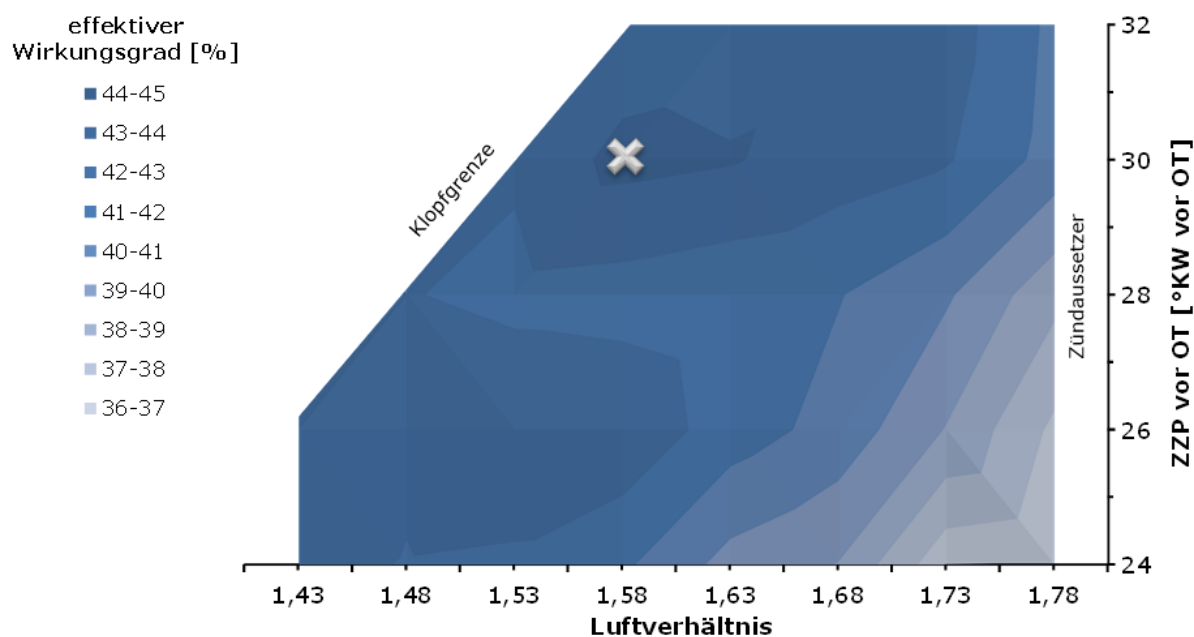


Abbildung 13: effektiver Wirkungsgrad über dem Luftverhältnis und dem Zündzeitpunkt bei 1500 min^{-1} , 1400 Nm , (220 kW) und einem Zündzeitpunkt von 30°KW vor OT mit dem Motoröl GEMAN-Ref 1 -SAE 40.

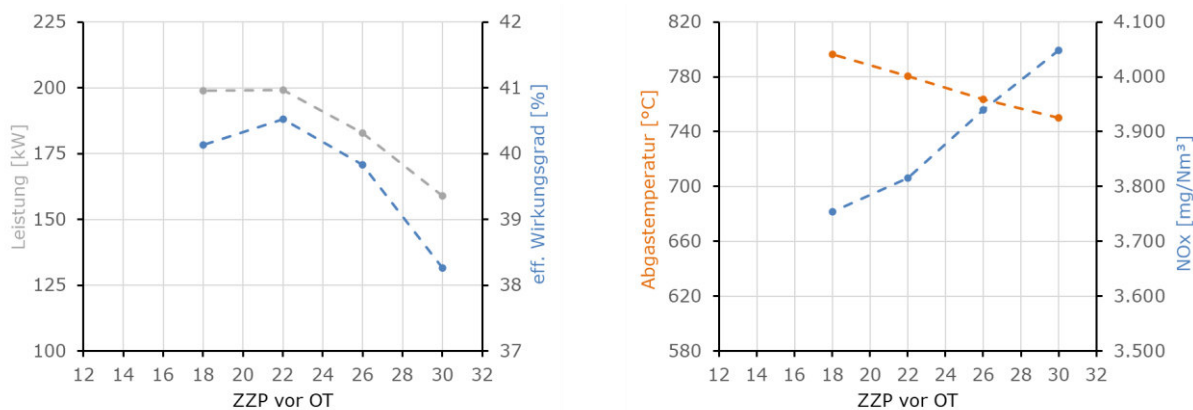


Abbildung 14: Leistung und mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO_x -Emissionen über dem Zündzeitpunkt bei 1500 min^{-1} und stöchiometrischem Luftverhältnis

Für den Betrieb des Motors vielen v.a. Personalkosten im Ingenieur- und Mechanik-Bereich sowie Materialkosten für Betriebsmittel und Wartung des Motors an. Die Aufgaben Leistungssteigerung bis 295 kW und 199 kW im Mager- bzw. stöchiometrischen Betrieb und Effizienzsteigerung deutlich über $39,3\%$ hinaus (Magerbetrieb) bei Abgastemperaturen unter 800°C und Spitzendruck unter 160 bar konnten sehr erfolgreich abgeschlossen werden.

ii. Reibleistungsuntersuchungen mit effizienzsteigernden Motorölen

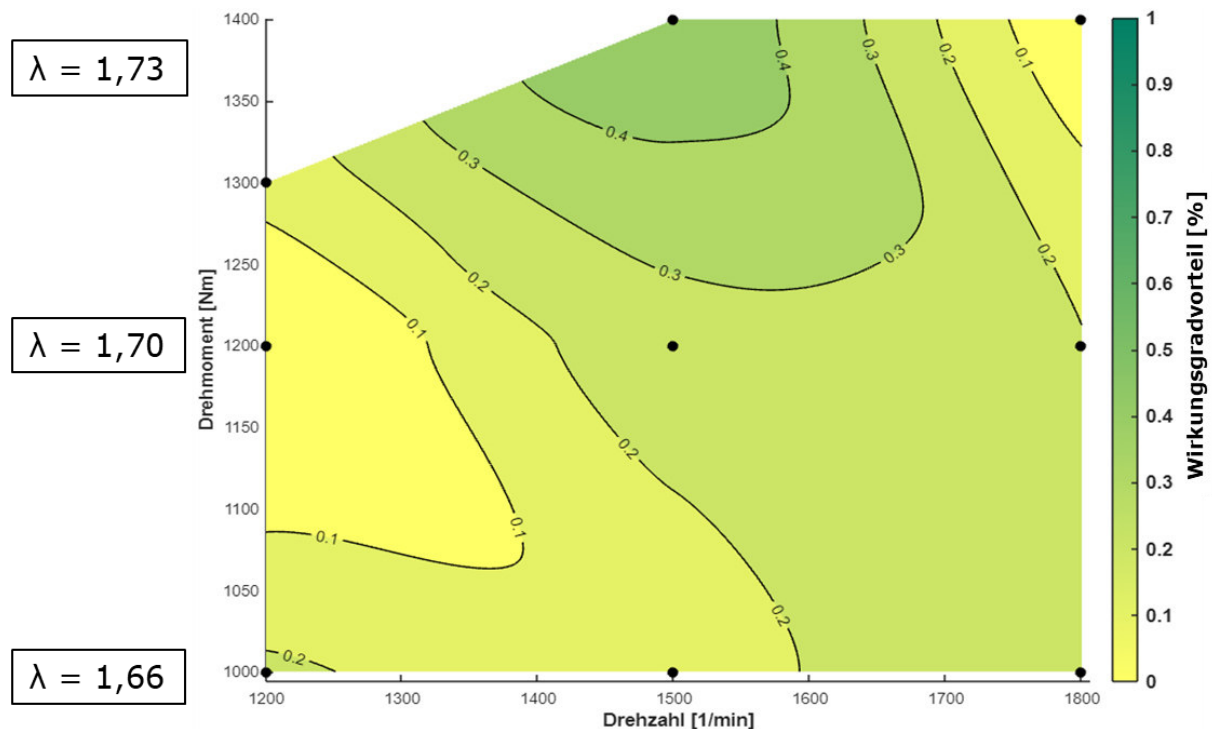


Abbildung 15: Wirkungsgraddifferenz zwischen GEMAN-Ref 1 -SAE 40 und GEMAN-11 SAE 30 bei 1500 min⁻¹ und einem Zündzeitpunkt von 26 °KW vor OT

Um die in der Schmierstoffentwicklung in der Tribomesszelle erkennbaren Reibungsvorteile neuer niedrigviskoser Motorenöle auch im Vollmotor zu untersuchen, wurden im Rahmen des Projekts vergleichende Wirkungsgraduntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen auch im Vollmotor Potenzial zur Verbesserung des Wirkungsgrades, Abbildung 16.

Der mechanische Wirkungsgrad des Motors von 39,8%, der durch die in der Einleitung beschriebenen Maßnahmen auf 43,3% steigern ließ, nimmt durch den Einsatz des neuen SAE 30-Öls für stationäre Anwendungen um weitere 0,42% zu.

Für den Betrieb des Motors fielen v.a. Personalkosten im Ingenieur- und Mechanik-Bereich sowie Materialkosten für Betriebsmittel und Wartung des Motors an. Die Aufgabe Effizienzsteigerung durch den Einsatz optimierter Schmierstoffe mit einer Wirkungsgradverbesserung von 0,42% bei Referenzbedingungen konnte für die stationäre Anwendung erfolgreich abgeschlossen werden.

iii. Verschleißanalysen an der Ventilfehrung

Um den Verschleiß der Ventilfehrung aus dem neuen Werkstoff mit Hilfe der Radionuklidtechnik kontinuierlich und hoch aufgelöst messen zu können, wurde die Ventilfehrung A6.2 an der dem Brennraum zugewandten Seite auf einer Höhe von 5 mm mittels schwerer geladener Teilchen in einem Beschleuniger radioaktiv markiert, Abbildung 17. Durch die Art der geladenen Teilchen und die Einstellungen am Beschleuniger ergab sich ein linearer Bereich der Aktivität pro Messtiefe von 35 µm.

Anschließend wurde der Motor komplettiert und auf einem Vollmotorenprüfstand bei IAVF aufgebaut sowie die erforderliche Messtechnik adaptiert und kalibriert, Abbildung 18.

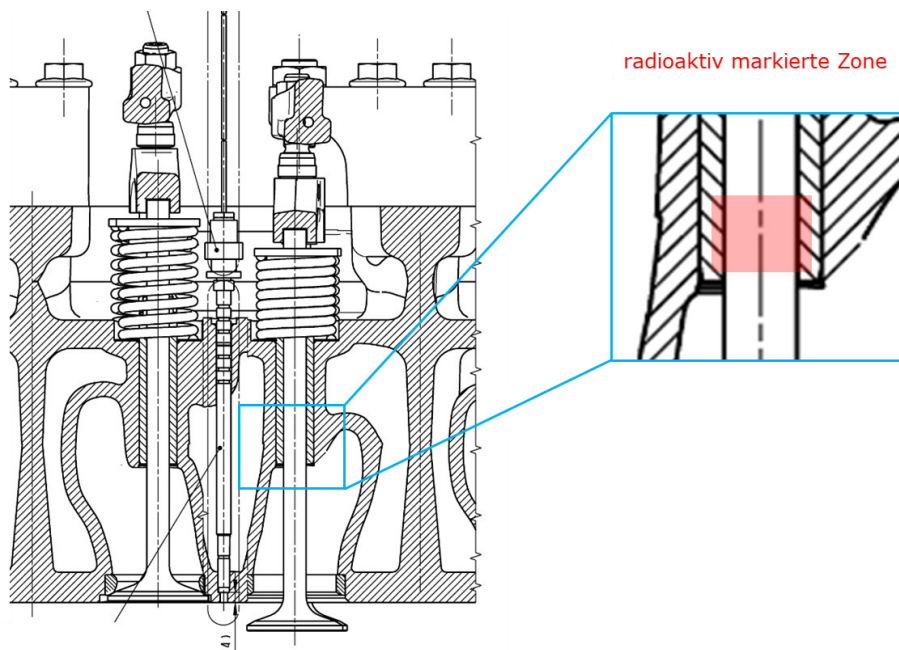


Abbildung 17: Schnitt durch den Zylinderkopf des Versuchsmotors sowie radioaktiv markierte Zone der Ventilfehrung.

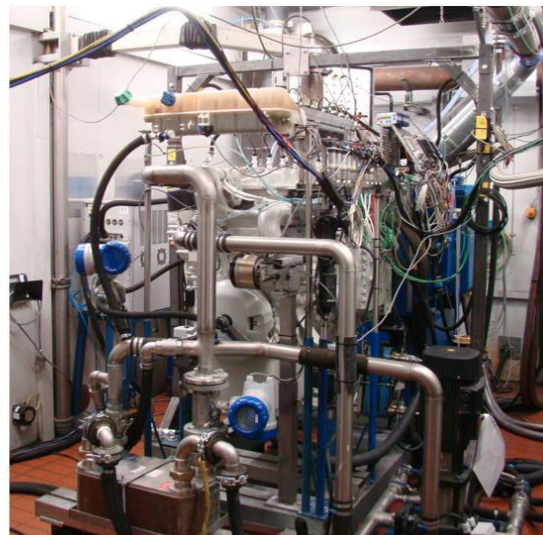
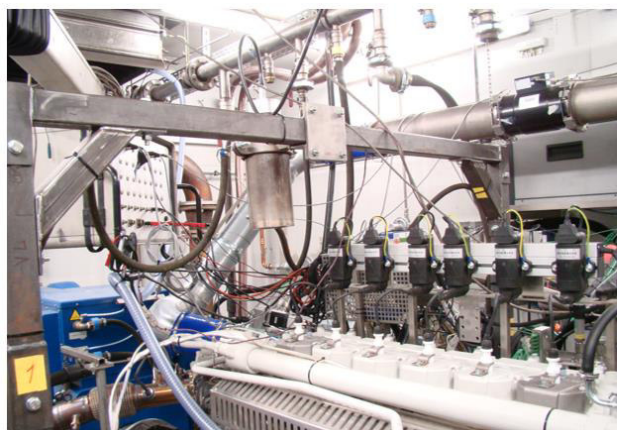


Abbildung 18: Aufbau des Motors im Vollmotorenprüfstand mit Gasversorgung und RNT-Verschleißmesstechnik

Der Einlauf des Motors erfolgte unter Referenzbedingungen bei 1500 min^{-1} mit 220 kW. Die Verschleißkurve des neuen Materials nicht schnell einen degressiven Verlauf und liegt im unteren Bereich des entsprechenden Streubandes für Serienmotoren. Die Verschleißgeschwindigkeit als erste Ableitung über der Zeit erreicht bereits nach 20 h ein sehr niedriges Niveau, Abbildung 19. Bei einem Luftverhältnis von 1,73 wurde der auf höheren Wirkungsgrad ausgelegte frühe Zündwinkel von 30°KW v. OT dem NO_x -optimierten

Zündwinkel von 26 °KW v. OT vorgezogen, da hier die Zylinder-Spitzendrücke höher sind. Die Abgastemperaturen bei 1500 min⁻¹ sind mit 600 °C trotz der vergleichsweise langen Brenndauer des mageren Gemisches entsprechend niedrig.

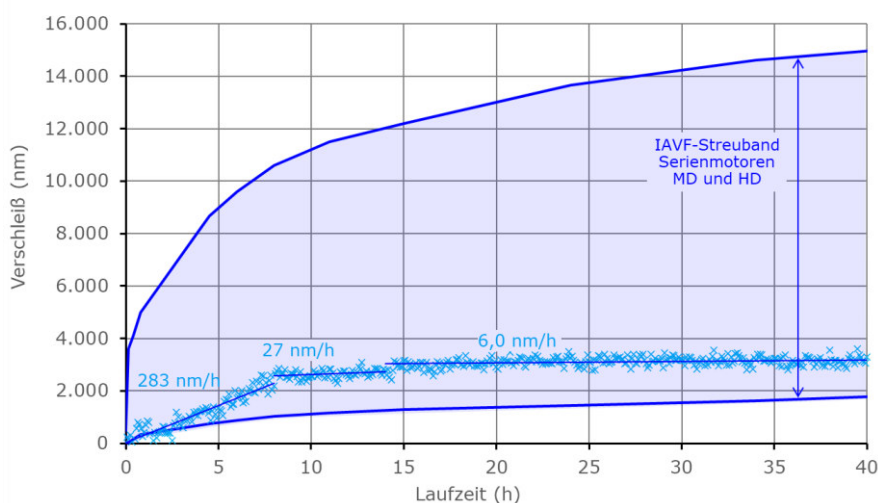


Abbildung 19: Verschleiß und Verschleißgeschwindigkeiten der Ventileitung sowie IAVF-Streuband vergleichbarer Motoren über der Laufzeit.

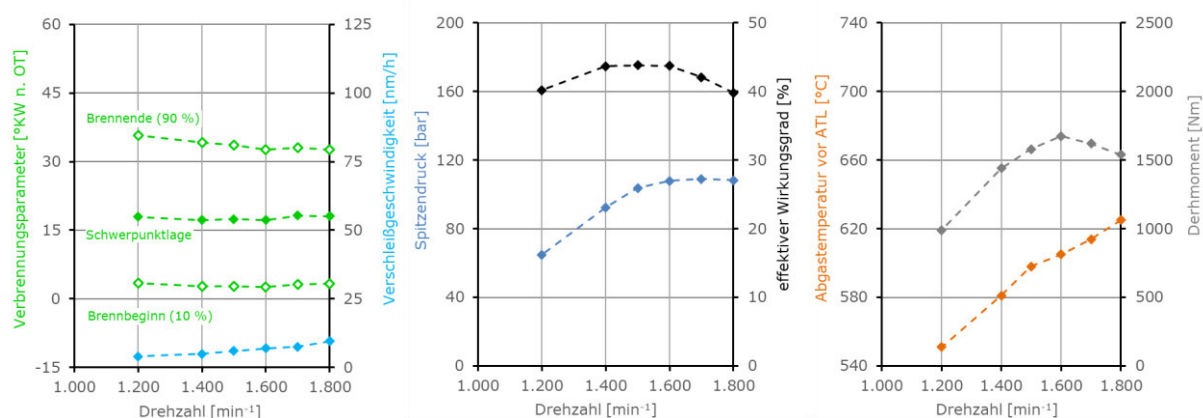


Abbildung 20: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventileitung, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und Drehmoment mit einem Zündzeitpunkt von 30°KW vor OT über der Drehzahl.

Über der Drehzahl nimmt die Anzahl der Ventilhübe pro Zeit und damit der Reibwert des Ventils in der Führung zu. Die sehr niedrigen Verschleißgeschwindigkeiten liegen auch hier im unteren Bereich vergleichbarer Serienmotoren.

Auch ein noch späteres Brennbereich bei weiter abgemagertem Gemisch und längerer Brenndauer führt bei Abgastemperaturen um 600°C noch nicht zu einem Ansteigen der Verschleißgeschwindigkeiten an der Ventileitung. Es ist davon auszugehen, dass das SAE40-Referenzöl trotz der vergleichsweise hohen Bauteiltemperatur am brennraumnahen Ende der Führung für eine adäquate Schmierung des tribologischen Systems ausreicht.

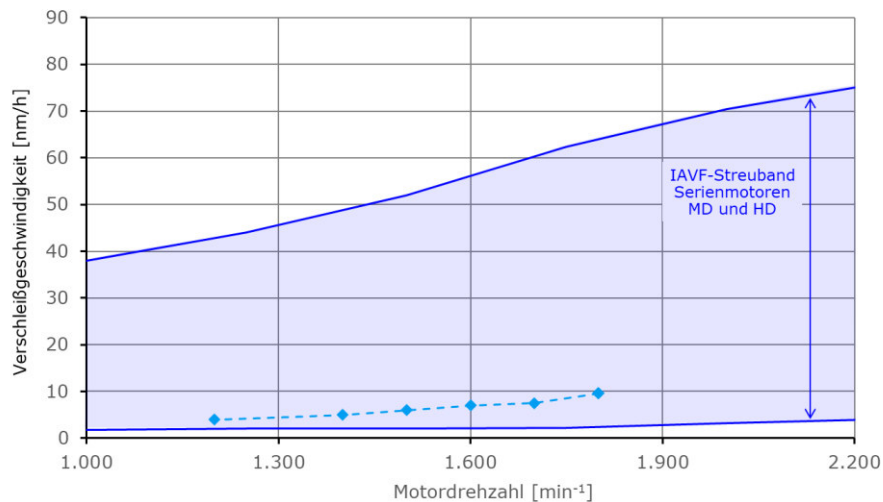


Abbildung 21: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfeuerung sowie IAVF-Streuband vergleichbarer Motoren über der Drehzahl.

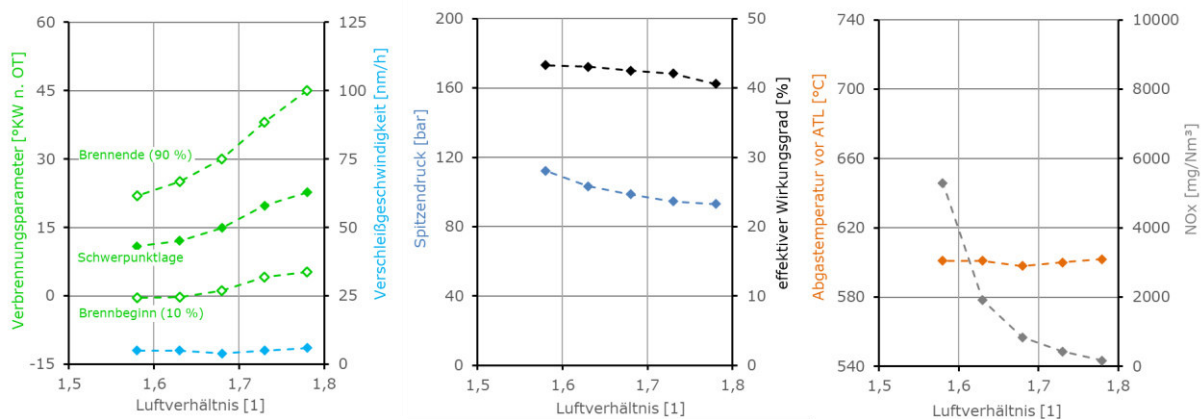


Abbildung 22: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfeuerung mit dem SAE40-Referenzöl, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO_x-Emissionen über dem Luftverhältnis.

Der Einsatz des neuen niedrigviskosen GEMAN-11-SAE 30-Öls verringert nicht nur die Reibungsverluste des Motors und erhöht dadurch den mechanischen Wirkungsgrad, wie in Abschnitt 0 dargestellt. Der neue Schmierstoff senkt auch die Verschleißgeschwindigkeiten signifikant, Abbildung 23: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfeuerung mit unterschiedlichen Schmierstoffen, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO_x-Emissionen über dem Zündzeitpunkt. Abbildung 23. Dies hat sich bereits in den Voruntersuchungen in der Tribomesszelle angedeutet.

Im stöchiometrischen Betrieb mit Abgastemperaturen von 750 °C und darüber steigt der Führungsverleiß auch bei einem früheren Brennbereich erheblich an, Abbildung 24.

Beim Einsatz des weiter viskositätsreduzierten Motoröls GEMAN-13 SAE 20 erreichen die Verschleißgeschwindigkeiten selbst unter Referenzbedingungen mit niedrigen Abgastemperaturen im Magerbetrieb unzulässig hohe Werte, Abbildung 25. Der verschleißfördernde Einfluss einer späten Zündung wirkt sich hier überproportional aus.

Die Wiederholungsmessungen im Referenzpunkt zeigen, dass das Verschleißverhalten der Ventilfeuerung im Rahmen der kontinuierlichen und hoch aufgelösten Verschleißmessungen

mit der RNT nach dem Einlauf trotz der zwischenzeitlich erhöhten Verschleißgeschwindigkeiten, z.B. mit dem erheblich viskositätsreduzierten Motoröl GEMAN-13 SAE 20 konstant war.

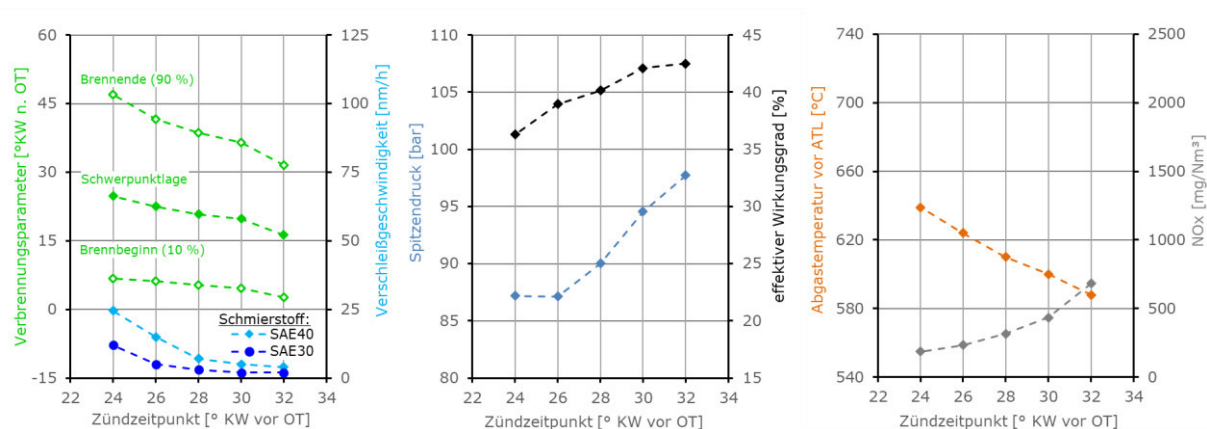


Abbildung 23: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO_x-Emissionen über dem Zündzeitpunkt.

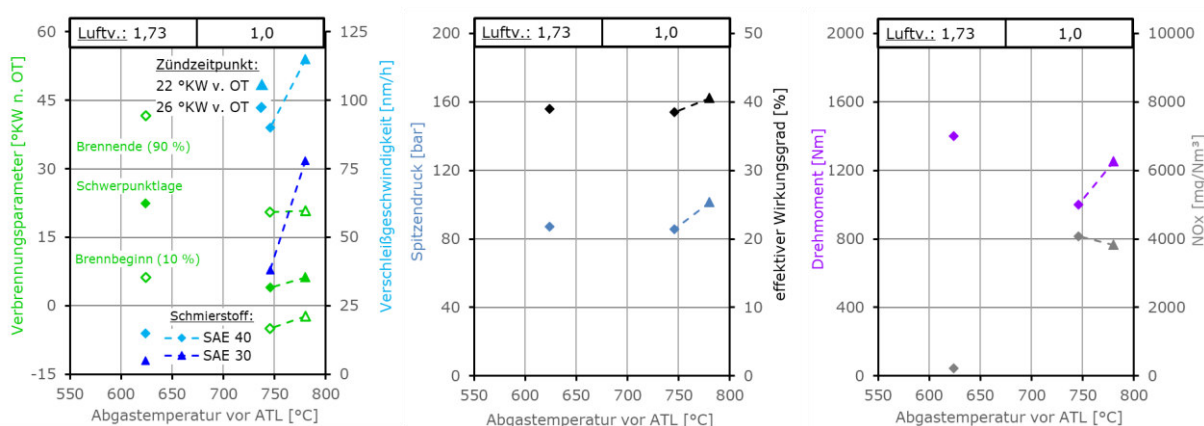


Abbildung 24: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und Drehmoment mit unterschiedlichen Luftverhältnissen und Zündwinkeln über der Abgastemperatur.

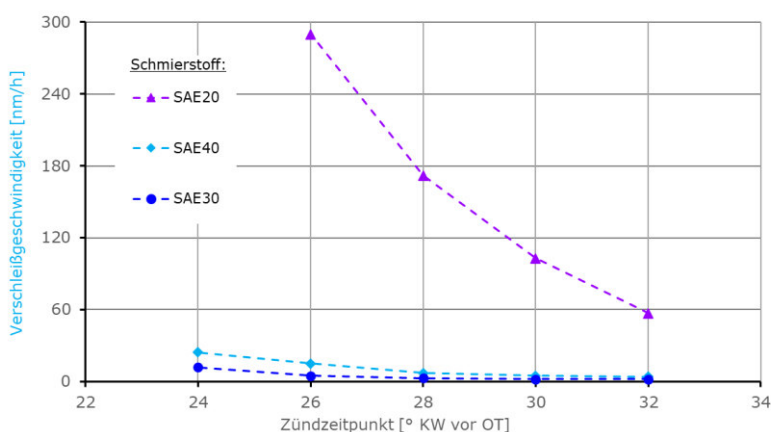


Abbildung 25: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen über dem Zündzeitpunkt.

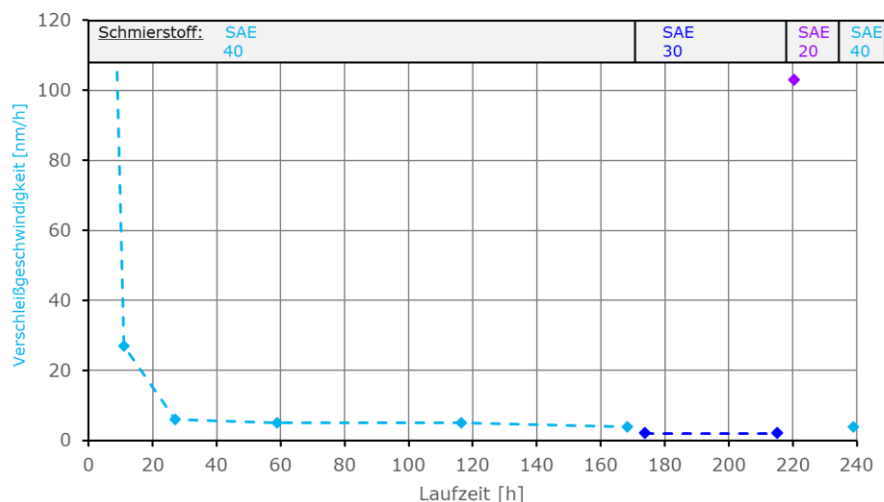


Abbildung 26: Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen über der Laufzeit.

iv. Extrapolationsbetrachtungen

Für den stationären Einsatz z.B. in BHKW beträgt die Lebensdauernanforderung an den Zylinderkopf 25.000 h, bevor ein Austausch des Zylinderkopfes vorgesehen ist, um Funktionsstörungen oder einem Ausfall des Motors vorzubeugen. Mit den neuen Technologien soll die Lebensdauer auf 35.000 h erhöht werden.

Für eine Lkw-Anwendung des bisher nur im Bus eingesetzten Motors muss die Ziel-lebensdauer von 800.000 km auf 1.500.000 km gesteigert werden.

Zusätzlich zum Vergleich der neuen Werkstoffe und Schmierstoffe mit den bisherigen Referenzen wurden die mit der RNT hoch aufgelöst gemessenen Verschleißgeschwindigkeiten deshalb für die stationäre Anwendung über der Laufzeit sowie für mobile Anwendungen über der Fahrstrecke extrapoliert. Gegenüber dem Verschleiß über Lebensdauer kann der Einlaufverschleiß der Ventilfehrung von weniger als 4 μm (Abbildung 19) vernachlässigt werden.

Wie aus Abbildung 27 zu erkennen ist, liegt der Verschleiß an der Ventilfehrung am unteren Ende mit der neuen Werkstoff- und Schmierstofftechnologie etwa auf der Hälfte der bei Motoren dieser Größenordnung maximal zulässigen 250 μm . Auch eine Erhöhung der Lebensdauer von 25.000 auf 35.000 h ist möglich.

In der mobilen Anwendung kann die Lebensdauer für den Einsatz im Lkw mit einer geeigneten Werkstoff- und Schmierstofftechnologie durchaus von 800.000 auf 1.500.000 km erhöht werden, ohne dass unzulässig hoher Verschleiß an der Ventilfehrung zu Funktionsstörungen im Ventiltrieb führt.

Für die Planung und den Betrieb des Motors (iii. Verschleißuntersuchungen) sowie die Auswertung (iv. Extrapolationsbetrachtungen) fielen v.a. Personalkosten im Teamleiter- und Ingenieur-Bereich, Materialkosten für Betriebsmittel und Wartung des Motors sowie Aktivierungskosten an. Die Aufgaben Herausfahren optimierter Schmierstoffe und optimierte Ventilfehrungs- sowie Ventilsitzwerkstoffe konnten überaus erfolgreich abgeschlossen

werden. Insbesondere wurden die Potentiale für den Einsatz der optimierten Öle sehr erfolgreich abgeschätzt.

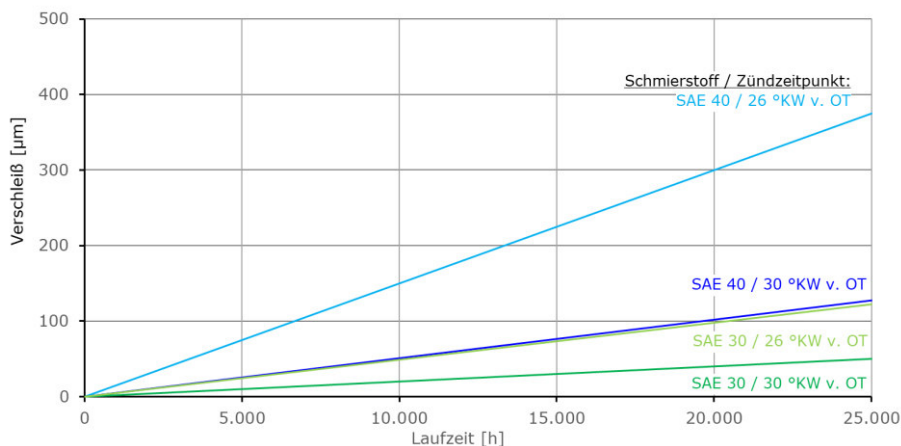


Abbildung 27: Extrapolation des Verschleißes der Ventile mit unterschiedlichen Schmierstoffen und Zündwinkeln über der Laufzeit.

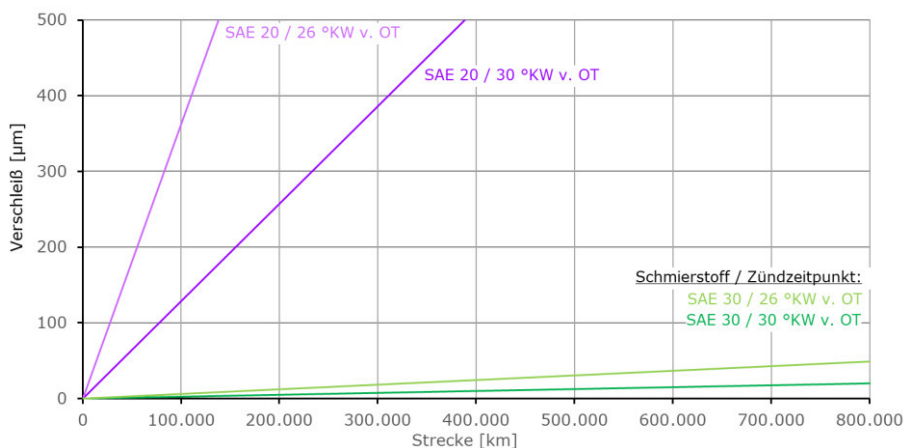


Abbildung 28: Extrapolation des Verschleißes der Ventile mit unterschiedlichen Schmierstoffen und Zündwinkeln für eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h über der Strecke.

1.4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der 2022 veröffentlichten Renewable Energy Directive (RED) III wurde das Gesamtziel der Europäischen Union für den Verbrauch erneuerbarer Energie bis 2030 auf 45 % angehoben. Damit ist zu erwarten, dass gasförmige Kraftstoffe auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom noch stärker an Bedeutung gewinnen.

Verbrennungsmotoren für Wasserstoff und Methan können für die Erreichung dieses Ziels einen erheblichen Anteil leisten, u.a. da sich beide Kraftstoffe mittels Power-to-X-Verfahren herstellen lassen. Darüber hinaus sind die Anforderungen von Verbrennungsmotoren an die Reinheit des Kraftstoffs weniger hoch als beispielsweise bei Brennstoffzellen. Im Projekt GESIR (Gasmotoren mit energieeffizienten Systemtechnologien und integraler Robustheit) sind verbesserte Werkstoffe und Schmierstoffe entstanden. Die Projektpartner haben hier die Möglichkeiten moderner Herstellungsverfahren sowie Öl- und Additivtechnologien genutzt, um

maßgeschneiderte Materialien und Schmierstoffe zu generieren. Darüber hinaus wurden tribologische Prüfverfahren verbessert, um die Belastbarkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der tribologisch höchstbeanspruchten Komponenten zu gewährleisten und weitere Steigerungen des Wirkungsgrads der Motoren zu ermöglichen.

Fazit zum Erreichen der gesteckten Ziele:

- In Summe konnte die IAVF ihr lückenhaftes Spektrum an Prüfmethoden für Gasmotoren erfolgreich schließen.
- Es konnte die Kosten- und Zeit-effiziente RNT-Prüftechnik für den Einsatz in Gasmotorensystemen vorbereitet und überaus erfolgreich angewendet werden.
- Damit wurde eine Erweiterung des Anwendungsspektrums an Prüfmethoden für den Einsatz in Gasmotoren und Blockheizkraftwerken mit höheren Abgastemperaturen von 850 °C bzw. höheren Verbrennungsspitzen drücken von 160 bar erfolgreich nachgewiesen.
- Es erfolgte – durch das interdisziplinäre Team aus Forschung und Industrie – eine deutliche Erweiterung des Knowhows im Bereich Hochtemperatur-Tribologie: Es gibt nun eine Verbesserung der Voraussagbarkeit bei hohen Belastungen.
- Dank der Kooperation mit der Forschung konnte sehr erfolgreich eine Integration optischer Messtechniken zur Bewertung des Verschleißes an Hochtemperaturwerkstoffen erarbeitet werden.

Es konnten somit alle Ziele erreicht und in einzelnen Bereichen sogar deutlich übererfüllt werden. Das Vorhabens-Budget wurde eingehalten. Die Vorhabensdauer musste bedingt durch das Ruhen des Vorhabens während des Partnerwechsels und durch die Lieferkettenprobleme in Folge der Corona-Krise um 9 Monate verlängert werden.

Anhand des Abgleichs zwischen den im Projekt erreichten Zielen und dem Stand der Technik vor Vorhabensbeginn werden die Ergebnisse hinsichtlich der nachfolgenden Kriterien folgendermaßen bewertet:

- Nutzen der Ergebnisse für neue Produktentwicklungen → ja
- Nutzen der Ergebnisse für weitere Forschungsvorhaben → ja, v.a. im Bereich Wasserstoffmotoren im HD- und BHKW-Bereich
- Nutzen der Ergebnisse für technische Innovationen → ja
- Erwarteter wirtschaftlicher Nutzen → ja

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In der Folge wird nun auf die wichtigsten Kosten-/Zuwendungspositionen eingegangen:

Personalkosten:

Die größte Kostenposition stellten die Personalkosten dar, da die IAVF sowohl Komponenten- als auch Vollmotor- und Demonstrator-Versuche planen, vorbereiten und durchführen durfte.

Durch den Partnerwechsel von VW zu MAN musste außerdem von einem Pkw- zu einem HD- bzw. BHKW-Motor umgeplant werden. Des Weiteren erfolgte der Motor- und Komponenten-aufbau zunächst für den Pkw-Motor und anschließend nochmals für den HD-/BHKW-Motor. Da der HD-/BHKW-Motor als reiner Grundmotor angeliefert wurde, mussten darüber hinaus alle Ansteuerungen für Gasmischer, Gasfuß, Drehzahl, ...zusammen mit der benötigten

Sensorik geplant, ausgelegt aufgebaut und in Betrieb genommen sowie schließlich in den verschiedensten Prüfläufen betrieben werden.

Es wurde mit Unterstützung von Bleistahl thermometrische Messungen am Vollmotor durchgeführt, die es erlaubten die im Bereich Ventilsitzring und Ventilfehrung auftretenden Temperaturen im Betrieb zu bestimmen. Es wurde ein Komponentenprüfstand geplant, konzipiert und aufgebaut, der zwar nicht befeuert betrieben wurde, es dafür aber über eine Druckerzeugung mittels Kompressors und Heizung mittels Heizelementen erlaubte, Kompressionsdrücke und Abgastemperaturen, wie bei den thermometrischen Messungen im Verbrennungsmotor bestimmt, einzustellen. Mit dem Komponentenprüfstand war es nun erstmals möglich die Schmierungsituation im Ventilfehrungsbereich optisch mittels Fluoreszenz-Spektroskopie bei voller Drehzahl zu bestimmen. Dazu musste zusammen mit dem KIT die Fluoreszenz-Spektroskopie-Messtechnik für die Anwendung im Ventilfehrungsbereich erstmalig ausgelegt, aufgebaut, getestet und in Betrieb genommen werden.

Am System-Prüfstand wurden mit den unterschiedlichsten Bauständen der Ventilfehrungen und Ventilsitzringen, die in verschiedenen Zylinderköpfen verbaut wurden, sowie den unterschiedlichsten Versuchsmustern von Motorölkandidaten die verschiedensten Prüfläufe vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet. In Rekursionen erfolgte eine Optimierung der Bauteile und Öle.

Schließlich erfolgte zur Demonstration der Ergebnisse die Lebensdauerabschätzung durch einen verlängerten Vollmotor-RNT-Prüflauf mit kontinuierlicher Verschleißmessung am Ventiltrieb auf dem Systemprüfstand der IAVF statt wie geplant am KIT. Die Untersuchungen dazu mussten geplant, vorbereitet, aufgebaut, durchgeführt und ausgewertet werden. Mit den Ergebnissen konnten sehr erfolgreich die Vorteile der optimierten Ventiltriebsbauteile und der optimierten Schmierstoffe im Betrieb aufgezeigt und auf Lebensdauer extrapoliert werden.

Des Weiteren war die IAVF als Konsortialführer koordinierend im Forschungsverbund tätig.

FE-Dienstleistungen:

Eine weitere große Kostenposition waren die FE-Dienstleistungen durch das KIT. Das KIT unterstützte bei der Auslegung der Fluoreszenz-Spektroskopie zur erstmaligen Anwendung im Ventiltrieb eines Verbrennungsmotors bei Betriebstemperaturen und -drehzahl. Das KIT unterstützte weiterhin konstruktiv beim Aufbau des Komponenten-Prüfstandes, bei der Auswahl der Tracer, der Optiken und der dazu notwendigen Messtechnik sowie bei der Auswertung der Vorversuche und Prüfläufe am Komponenten-Prüfstand. Außerdem wurden durch das KIT Sicherheits- und Betriebs-Schulungen sowie Einweisungen bei der IAVF zur Nutzung der Messtechnik durchgeführt.

Schließlich arbeitet das KIT unterstützend bei der Vorbereitung des geplanten Demonstrator-Prüflaufs mit und bereitete einen Zylinderkopf für die Demonstrator-Untersuchungen mit vor, wenn auch die Untersuchungen sehr erfolgreich am System-Prüfstand der IAVF durchgeführt wurden, sicherlich auch dank der tatkräftigen Unterstützung durch das KIT.

Verbrauchsmaterial insbesondere für den Motor:

Als weiterer gewichtiger Kostenfaktor ist das Verbrauchsmaterial insbesondere für den Motor zu nennen. Zum einen sind über die 3 ¾ Jahre der Dauer des Verbundvorhabens Kosten für Betriebsmittel wie Strom, Kraftstoffe, Betriebsstoff etc. angefallen. Da der für das Vorhaben

neu gewonnenen Motorenhersteller MAN nicht als Zuwendungsempfänger, sondern lediglich als assoziierter Partner vertreten war, stellte er auch „lediglich“ den Grundmotor ohne Elektrik, Sensorik, Steuerung und Ersatzteile zur Verfügung. Die entsprechenden Sensoren, Komponenten, Steuergeräte sowie Messtechnik wie z.B. Druckquarze für die Indizier-Messtechnik kaufte die IAVF passend für den Motor zu. Hinzu kommen Instandhaltungskosten und Kosten für den Austausch von Verbrauchsmaterial sowie für die eingesetzte Messtechnik. Weiterhin hat der HD-/BHKW-Motor mit knapp 300 kW eine deutlich höhere Leistung als der ursprüngliche geplante Pkw-Motor mit 115 kW. Dadurch fielen deutlich höhere Kraftstoffkosten sowie Betriebsmittelkosten an.

Bauteilaktivierung:

Als weitere größere Kostenposition ist die Bauteilaktivierung von Ventilfehrungen für die kontinuierliche Verschleißmessung mittels RNT zu nennen. Die Aktivierung musste für den zu verwendenden optimalen Ventilfehrungswerkstoff nach Verbau im Zylinderkopf ausgelegt, geplant und durchgeführt werden. Im Prüflauf mit dem aktiven Bauteil konnte der Verschleiß im Betrieb über Laufzeit bestimmt werden und daraus sehr erfolgreich eine Lebensdauerabschätzung vorgenommen werden.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Nur eine Förderung durch das BmWK und die Zusammenarbeit in dem Forschungsverbund ermöglichten es der IAVF und den Partnern auf dem neuesten Stand der Forschung und Entwicklung zu bleiben und mit Produktinnovationen die steigenden Anforderungen hinsichtlich Umweltfreundlichkeit, Effizienz und Leistungsfähigkeit erfüllen zu können. Ein Vorentwicklungsprojekt wie dieses wären sonst nicht realisierbar gewesen. Die Förderung war notwendig, um die hohen Ziele der Energieeffizienz unter Beachtung der technischen Risiken erreichen zu können. Das neue Werkstoffkontaktsystem hat hervorragende Verschleißbeständigkeit und geringe Reibung mit exzellenter Temperaturbeständigkeit und hat daher im Vergleich zum Stand der Technik sein großes Potential aufgezeigt. Gleichzeitig waren unterschiedlichste neue Technologien erforderlich, um die neuen Werkstoffe und Schmierstoffe reproduzierbar gemäß den Anforderungen für die an Gasmotoren von morgen herzustellen und zu testen. Die Umsetzung der Projektziele konnte nur durch das interdisziplinäre Team aus unterschiedlichen technologischen Bereichen, wie Werkstoffherstellung, Schmierstoffentwicklung, Fertigung, Analytik, Simulation und Anwendungserprobung, erfolgen. Nur so war gewährleistet, dass die Projektziele erreicht werden konnten.

Das Erfolgsrisiko war hoch, da für die neu entwickelten Lösungen für verbesserte Motorkomponenten nicht nur eine technische Machbarkeit (Reproduzierbarkeit), sondern auch ein Funktionsnachweis (hohe Lebensdauer bei starker tribologischer und korrosiver Beanspruchung) zu erbringen waren sowie auch eine Senkung der Betriebskosten bei den Endanwendern ermöglicht werden musste. Der Aufwand für eine gezielte Motoroptimierung und die Validierung von Prototypen war extrem hoch. Ohne eine gründliche Vorentwicklung mit wissenschaftlich-technischer Unterstützung durch ein Forschungsinstitut wäre der Einsatz verbesserter Komponenten nicht möglich gewesen, da die IAVF und auch die anderen Partner einen zu hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand für deren Arbeiten ohne Unterstützung des BmWK und die Mitarbeit in einem gut organisierten Verbundprojekt nicht hätten leisten können. Ein voreiliger Einsatz von Prototypen wäre seitens der Automobilindustrie nicht

zulässig gewesen. Daher waren auch die geplanten Weiterentwicklungen der Validierungsmethoden hilfreich, um für die künftigen Anwendungen den Prüfaufwand zu reduzieren. Auch Aspekte der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung konnten mitbetrachtet werden. Eine Realisierung des Projektes hing daher davon ab, dass die Möglichkeit einer Förderung durch das BmWK gegeben waren.

Alle Arbeitspakete erwiesen sich als notwendig, um das Gesamtziel im gut verzahnten Forschungsvorhaben zu erreichen. Es wurde für alle Vorhabensziele erfolgreiche und umsetzbare, zukunftssträchtige Lösung gefunden. Die für die Umsetzung benötigten FE-Dienstleistungen, Materialien und Personalkosten waren in vollem Umfang zur Erreichung der angestrebten und auch überaus erfolgreich umgesetzten Projektziele unbedingt notwendig. Die vom KIT im Rahmen der FE-Dienstleistungen unterbeauftragten Arbeiten waren für das Gesamtvorhaben unabdingbar und haben bei der IAVF darüber hinaus zu einem deutlichen Knowhow-Gewinn beigetragen.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortschreitenden Verwertungsplans

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Bei Schaffung einer Kompetenz im Bereich der motorischen Analytik von modernsten Sinterwerkstoffen im Ventiltriebs-Bereich bei BHKW-Gasmotoren als auch automobilen HD-H₂-Motoren erwartet die IAVF weitere Aufträge aus der deutschen und europäischen Industrie. Durch die Weiterentwicklung und Ausrichtung der Prüftechnik auf Gasmotoren (Erdgas oder Wasserstoff, bzw. Mischungen daraus) können zukünftige Motoren- und Antriebstechnologien in Kooperation mit der deutschen und europäischen Automobilindustrie effektiv unterstützt werden. Hierdurch sind für die IAVF deutlich wachsende Umsatzzahlen zu erwarten. Die entwickelten Prüftechnologien könnten sich auch auf neue Technologien wie 3D-Druck tribologischer Funktionsbauteile für effiziente Antriebstechnologien, aber auch insbesondere für nicht-automobile Anwendungen (BHKW-Anwendungen) ausdehnen. Bei günstiger Geschäftslage und Weiterentwicklung der Transformation im Automobil- und Energie-Bereich könnte das zur Neueinstellung von 2 Mechanikern sowie einem Projektingenieur und einem Labortechniker in den nächsten Jahren führen, die sich bei einem Durchstarten der Wasserstofftechnologie noch deutlich erhöhen könnten.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Nach Ablauf der Projektlaufzeit leistet das Fraunhofer IWM weiter Unterstützung für die Projektpartner, indem für neue Anwendungen in den Bereichen der tribologisch belasteten Komponenten in Gasmotoren und darüber hinaus auch in anderen Branchen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden. Durch diese Grundlagenarbeiten kann abgesichert werden, dass neue verschleißbeständige Werkstoffe und Komponenten sowie Schmierstoffe innerhalb von 3 bis 5 Jahren nach Abschluss des Projekts zur Markteinführung gelangen. Schließlich sind die Projektergebnisse als Vorarbeiten für weitere Forschungsprojekte auf dem Gebiet tribologisch hoch beanspruchter Komponenten für die Energietechnik und Mobilität zu verwenden.

Des Weiteren wurden schon während der Laufzeit des Forschungsvorhabens einige weit beachtete Veröffentlichungen u.a. auf den GfT- und Nextlube-Tagungen in Göttingen bzw. in Düsseldorf präsentiert. Eine weitere Veröffentlichung mit sehr großer Reichweite in der

europäischen Automobilindustrie ist in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ für November 2023 geplant (siehe geplante Veröffentlichungen [1]).

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Für die IAVF ergeben sich durch das Forschungsvorhaben neue Chancen bei der Erprobung von Gasmotoren, zukünftig insbesondere im Bereich Wasserstoffanwendungen. Vor allem aufgrund des anhaltenden Trends, Erprobungen von der Straße auf den Prüfstand zu verlagern („Road-to-Rig“) sind hier für IAVF deutliche Umsatzsteigerungen (jährlich bis 10%) zu erwarten. Dies inkludiert insbesondere den Bereich Schmierölerprobung, in dem die IAVF durch das Forschungsvorhaben deutlich an Kompetenz gewonnen hat. Darüber hinaus bietet die im Ausbau befindliche Komponentenerprobung die Möglichkeit, neue Werkstoffe, Schmierstoffe und Komponenten bereits in einem frühen Stadium der Entwicklung zu erproben, mit dem zu erarbeitenden Wissen wird IAVF in die Lage versetzt, solche zeit- und kostensparenden Erprobungen bei den Kunden anzubieten.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Trotz intensiver Recherche wurden keine weiteren Fortschritte bekannt.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11

Erfolgte Veröffentlichungen:

- [1] Berlet, P., Cornelsen, T., Emde, D., Hoffmann, D., Kailer, A., Khader, I., Kürten, D., Luther, R., Neuhaus, J., Pöhlmann, K., Rausch, J., Rynio, C.: Tribologische Aspekte zukünftiger Verbrennungsmotoren für Power-to-X, Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, 2021.
- [2] Kürten D., Berlet P., Harperscheid, M., Luther R., Kailer A., Nübling F., Pöhlmann K., Rausch J.: Modellbetrachtungen zu thermisch hoch belasteten Tribokontakten für Gasmotoren, Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, 2022.
- [3] Pöhlmann K., Berlet P., Cornelsen T., Emde D., Hoffmann D., Kailer, A., Kürten D., Rynio C.: Anwendungsnahe Bewertung neuer Werkstoffe für thermisch und tribologisch hoch belastete tribologische Systeme in Gasmotoren, Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, 2022.
- [4] Berlet P., Züfle M.: Impact of hydrogen on the operation of internal combustion engines, Fraunhofer IWM μ TC-Workshop Tribologie in Wasserstoffumgebung, Karlsruhe, 2022.
- [5] Berlet P., Cornelsen T., Harperscheid, M., Luther R., Kailer, A., Kürten D., Pöhlmann K., Rausch J., Rynio C.: Development of new materials and engine oils for the use in thermally and tribologically highly stressed systems, Nextlube 1st International Conference on Tribology and Sustainable Lubrication, Düsseldorf, 2023.

Geplante Veröffentlichungen:

- [1] Berlet P., Rausch J., Rynio C., Wöhner, P.: Entwicklung innovativer Werkstoffe und Schmierstoffe als Basis für zukünftige Verbesserungen bei Wirkungsgrad und Emissionen von stationären Gasmotoren, Motortechnische Zeitschrift (MTZ) Industrial, 11/2023.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau des Versuchsmotors im Vollmotorenprüfstand.....	2
Abbildung 2:	Thermometrisch ermittelte Temperaturen an den Ventilfehrungen, a) Einlassseite, b) Auslassseite.....	3
Abbildung 3:	Thermometrisch ermittelte Temperaturen an den Ventilsitzringen, a) Einlassseite, b) Auslassseite.....	3
Abbildung 4:	Zylinderkopfprüfstand mit einem originalen Zylinderkopf des Versuchsmotors.	4
Abbildung 5:	Schnitt durch den Zylinder mit dem optischen Zugang für die Ventilfehrung. .	5
Abbildung 6:	Vorrichtung zur Kalibrierung der mittels Fluoreszenzspektroskopie gemessenen Schmierfilmhöhenverteilung.....	5
Abbildung 7:	Kalibrierfunktionen zur Bestimmung der Schmierfilmhöhe aus der mittels CCD-Kamera gemessenen normierten Fluoreszenz-Intensität für die ebene Geometrie (blaue Punkte) bzw. die gekrümmte Geometrie (rote Punkte).....	6
Abbildung 8:	Schmierfilmhöhenverteilung in der Ventilfehrung im Betrieb mit der Nockenwellendrehzahl 750 1/min bei Kurbelwellenwinkeln von 0 °KW (links) und 96 °KW (rechts).....	6
Abbildung 9:	Querschnitt durch den Zylinderkopf sowie Adapter, Zylinderdrucksensoren und Verschlussstopfen.....	8
Abbildung 10:	Zylinderdruckverläufe (Mittelung über 200 Zyklen) bei 1500 min ⁻¹ , 1400 Nm, (220 kW) und Referenz-Luftverhältnis 1,73.....	8
Abbildung 11:	Zylinderspitzendruck, effektiver Wirkungsgrad, Verbrennungsschwerpunktlage sowie Abgastemperatur und NO _x -Emissionen über dem Zündzeitpunkt bei 1500 min ⁻¹ , 1400 Nm, (220 kW) und Referenz- Luftverhältnis 1,73.	9
Abbildung 12:	Leistung und mechanischer Wirkungsgrad über der Motordrehzahl bei einem Zündzeitpunkt von 30°KW vor OT und Referenz-Luftverhältnis 1,73.....	9
Abbildung 13:	effektiver Wirkungsgrad über dem Luftverhältnis und dem Zündzeitpunkt bei 1500 min ⁻¹ , 1400 Nm, (220 kW) und einem Zündzeitpunkt von 30°KW vor OT mit dem Motoröl GEMAN-Ref 1 -SAE 40.	10
Abbildung 14:	Leistung und mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO _x - Emissionen über dem Zündzeitpunkt bei 1500 min ⁻¹ und stöchiometrischem Luftverhältnis	10
Abbildung 15:	Wirkungsgraddifferenz zwischen GEMAN-Ref 1 -SAE 40 und GEMAN-11 SAE 30 bei 1500 min ⁻¹ und einem Zündzeitpunkt von 26 °KW vor OT	11
Um die in der	Schmierstoffentwicklung in der Tribomesszelle erkennbaren Reibungsvorteile neuer niedrigviskoser Motorenöle auch im Vollmotor zu untersuchen, wurden im Rahmen des Projekts vergleichende Wirkungsgraduntersuchungen	

	durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen auch im Vollmotor Potenzial zur Verbesserung des Wirkungsgrades, Abbildung 16.....	11
Abbildung 17:	Schnitt durch den Zylinderkopf des Versuchsmotors sowie radioaktiv markierte Zone der Ventilfehrung.....	12
Abbildung 18:	Aufbau des Motors im Vollmotorenprüfstand mit Gasversorgung und RNT-Verschleißmesstechnik	12
Abbildung 19:	Verschleiß und Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung sowie IAVF-Streuband vergleichbarer Motoren über der Laufzeit.	13
Abbildung 20:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und Drehmoment mit einem Zündzeitpunkt von 30°KW vor OT über der Drehzahl.	13
Abbildung 21:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung sowie IAVF-Streuband vergleichbarer Motoren über der Drehzahl.	14
Abbildung 22:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit dem SAE40-Referenzöl, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO _x -Emissionen über dem Luftverhältnis.	14
Abbildung 23:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und NO _x -Emissionen über dem Zündzeitpunkt.....	15
Abbildung 24:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen, Verbrennungsparameter, mechanischer Wirkungsgrad sowie Abgastemperatur und Drehmoment mit unterschiedlichen Luftverhältnissen und Zündwinkeln über der Abgastemperatur.	15
Abbildung 25:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen über dem Zündzeitpunkt.....	15
Abbildung 26:	Verschleißgeschwindigkeiten der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen über der Laufzeit.	16
Abbildung 27:	Extrapolation des Verschleißes der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen und Zündwinkeln über der Laufzeit.....	17
Abbildung 28:	Extrapolation des Verschleißes der Ventilfehrung mit unterschiedlichen Schmierstoffen und Zündwinkeln für eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h über der Strecke.....	17