



Artikel

Reibungsreduzierung für einen Downsizing-Diesel getestet

Motor mit niedrigviskosen Schmierstoffen, darunter ein neuartiges Polyalkylenglykol

David E. Sander ^{1,*}, Christoph ¹, Hannes Allmaier ¹, Slavitsa Damjanovi'c-Die Ballenpresse ²
Knauder und Philippe Mallet ³

¹ Tribologie und Effizienz, Virtual Vehicle Research Center, Inffeldgasse 21A, 8010 Graz, Österreich

² Mechanische Konstruktion des Antriebsstrangs, Renault Lardy Technical Center, 1 Allée Cornuel, 91510 Lardy, Frankreich

³ Diesel Advanced Engineering Technologies, Renault Technocenter, 1 Avenue du Golf, F78084 Guyancourt Cedex, Frankreich

* Korrespondenz: david.sander@v2c2.at; Tel.: +43-316-873-4011

Wissenschaftlicher Herausgeber: Michel Fillon

Eingegangen: 14. März 2017; Angenommen: 27. März 2017; Veröffentlicht: 7. April 2017

Zusammenfassung: Angesichts des zunehmenden Drucks, Emissionen zu reduzieren, ist die Reibungsreduzierung ein immer aktuelles Thema in der Automobilindustrie. Unter den vielfältigen Möglichkeiten, die mechanische Reibung zu reduzieren, ist die Verwendung eines niedrigviskosen Schmierstoffs im Motor eine der effektivsten und wirtschaftlichsten Möglichkeiten. Daher werden Schmierstoffe mit kontinuierlich niedrigerer Viskosität entwickelt und auf den Markt gebracht, die eine Verringerung der Motorreibung bei gleichzeitiger Vermeidung schädlicher Mischschmierung und Verschleiß versprechen. In dieser Arbeit wird ein 1,6-l-Downsizing-Dieselmotor auf einem hochpräzisen Motorreibungsprüfstand eingesetzt, um das Potenzial für eine Reibungsreduzierung mithilfe von Schmiermitteln mit niedriger Viskosität unter realistischen Betriebsbedingungen, einschließlich hoher Motorlasten, zu ermitteln. Insbesondere werden zwei Schmierstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis, 0W30 und 0W20, sowie ein neuartiger experimenteller Schmierstoff untersucht, der auf einem Polyalkylenglykol-Grundöl basiert. Die gesamte Motorreibung wird für alle drei Schmierstoffe gemessen, wobei sich für den 0W20-Schmierstoff im Vergleich zum 0W30-Schmierstoff ein allgemeiner Vorteil von 5 % ergibt. Der Schmierstoff auf Polyalkylenglykol-Basis zeigt jedoch stark reduzierte Reibungsverluste, die etwa 25 % kleiner sind als beim 0W20-Schmierstoff. Da das 0W20 und das Schmiermittel auf Polyalkylenglykolbasis die gleiche HTHS-Viskosität aufweisen, widersprechen die Ergebnisse der allgemeinen Auffassung, dass die HTHS-Viskosität der dominierende Einflussfaktor für die Reibungsverluste ist.

Schlüsselwörter: Motorreibung; Effizienz; Motoröl; synthetisches Schmiermittel; Polyglykol; Messung; Lagertemperatur; HTHS-Viskosität

1. Einleitung

Angesichts immer strengerer weltweiter Emissionsgesetze ist die Automobilindustrie stets auf der Suche nach einer Optimierung der Effizienz des Antriebsstrangs. Reibungsreduzierung ist eine der effizientesten Möglichkeiten, Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu reduzieren [1,2]. Daher werden Schmierstoffe mit kontinuierlich niedrigerer Viskosität entwickelt und auf den Markt gebracht, die eine Reduzierung der Motorreibung versprechen und gleichzeitig schädliche Mischschmierung und Verschleiß vermeiden. Im Automobilsektor werden seit vielen Jahrzehnten gängige Schmierstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis eingesetzt und untersucht [3–8]. Es scheint jedoch, dass die für die nahe Zukunft angestrebten noch niedrigeren Viskositäten kohlenwasserstoffbasierte Schmierstoffe an ihre Grenzen bringen könnten [9]. Neben der offensichtlich erhöhten Gefahr einer Mischschmierung aufgrund der niedrigeren Viskosität kann beispielsweise die höhere Flüchtigkeit von Schmierstoffen mit niedrigerer Viskosität zu einem nachteiligen erhöhten Ölverbrauch des Motors führen. Derzeit werden mehrere alternative Schmiermittelchemien speziell für die Schmierung von Motoren mit niedriger Viskosität entwickelt, beispielsweise ionische Flüssigkeiten [10] und Polyalkylenglykol

Schmierstoffe auf Basis [11,12] . Trotz des offensichtlich großen Unterschieds von 25 % und mehr in den Schmierstoffviskositäten (siehe Tabelle 1) ist der entsprechende Effekt auf die Motorreibung viel geringer [13–15] und es sind hochpräzise Prüfstände erforderlich, um den Nutzen der einzelnen Schmierstoffe zu messen experimentell.

In dieser Studie werden zwei Mehrbereichsschmierstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis (0W30, 0W20) im Hinblick auf ihr Potenzial zur Reduzierung der Motorreibung untersucht. Darüber hinaus wird zum Vergleich eines der neuen Versuchsschmierstoffe getestet, nämlich ein Öl auf Polyalkylenglykolbasis. Für eine Diskussion dieser ungewöhnlichen Schmierstoffklasse verweisen die Autoren auf [11,12,16,17]. Diese Schmierstoffe werden auf einem hochpräzisen Motorprüfstand mit einem verkleinerten Dieselmotor unter einer Vielzahl von Betriebsbedingungen, einschließlich Hochlastbetrieb, getestet . Derselbe Polyalkylenglykol-Schmierstoff wurde kürzlich für den Einsatz in einem Automotormotor getestet [16]. Im Vergleich zu ihrer Arbeit ist die vorliegende Arbeit die erste, die diesen Schmierstoff tatsächlich unter einer Motorlast testet, die deutlich höhere Spannungen in den geschmierten K

2. Testen

Im Folgenden der Motorreibungsprüfstand, die untersuchten Schmierstoffe und der zu prüfende Motor sind besprochen.

2.1. Der Dynamometer

Für die Messungen wurde ein Druckprüfstand für Kraftfahrzeuge verwendet. Im Gegensatz zum befeuerten Motorbetrieb versorgt der Druckprüfstand den Motoreinlass mit Luft unter Druck. In Kombination mit der Eigenkompression des Motors können realistische Zylinderspitzen drücke von bis zu 200 bar im Brennraum realisiert werden [18–20]. Der große Vorteil dieser Methode ist die deutlich höhere Messgenauigkeit im Vergleich zu Tests mit befeuerten Motoren. Der Hauptgrund für die verbesserte Genauigkeit ist der stark reduzierte (ca. Faktor 4) angezeigte mittlere effektive Druck (IMEP) im Vergleich zum befeuerten Betrieb. Daher können Drehmomentaufnehmer mit deutlich kleinerem Messbereich und damit deutlich höherer absoluter Genauigkeit eingesetzt werden. Bei befeuerten Motortests sind nicht nur gekühlte piezoelektrische Sensoren und spezielle Zylinderköpfe erforderlich, auch die Schwankungen zwischen einzelnen Verbrennungszyklen können sehr groß sein. Dies gilt insbesondere für Benzinmotoren, bei denen es häufig zu Schwankungen des Spitzenzylinderdrucks von mehr als 20 % von Zyklus zu Zyklus kommt. Der Hauptnachteil des Druckantriebs ist die unterschiedliche thermische Situation in der Kolbenbaugruppe. Ein direkter Vergleich von Reibungsmessungen für denselben Dieselmotor im befeuerten Betrieb und im Druckbetrieb ergab jedoch sehr ähnliche Ergebnisse [19].

Die Druckbeaufschlagungstechnik verwendet die bekannte IMEP-Methode zur Bestimmung der Reibung mittlerer effektiver Druck (FMPE) durch Subtraktion des mittleren effektiven Bremsdrucks (BMEP),

$$FMPE = IMEP - BMEP \quad (1)$$

mit dem kleinen Unterschied, dass die Vorzeichen von IMEP und BMEP im Vergleich zum befeuerten Motorbetrieb negativ sind. Bei der Untersuchung der Reibungsverluste eines Motors mit der IMEP-Methode kommt es darauf an, zwei Größen, die angezeigte Leistung und die Bremsleistung des Motors, mit höchstmöglicher Genauigkeit zu ermitteln. Der Grund dafür ist, dass es sich bei IMEP und BMEP um zwei große und sehr ähnlich große Größen handelt, die voneinander subtrahiert werden, um eine eher kleine Differenz (FMPE) zu ermitteln. Daher kann jeder signifikante Fehler bei der Bestimmung von BMEP und IMEP leicht zu einem Messfehler in der gleichen Größenordnung wie der zu bestimmende FMPE führen.

Die Messung des IMEP erfolgt praktisch über piezoelektrische Sensoren im Brennraum. Allerdings kann der BMEP nicht direkt als Druck gemessen werden, sondern wird üblicherweise als Bremsmoment gemessen . Die folgende Gleichung setzt den mittleren effektiven Druck p_{me} auf das entsprechende Drehmoment T ,

$$KMU = \frac{IN}{CEO} = \frac{4\dot{\gamma}T}{CEO}, \quad (2)$$

Dabei bezeichnet W die Arbeit pro Zyklus und VD die Volumenverdrängung des Untersuchten 4-Takt-Motor.

Am Reibleistungsprüfstand wurde ein hochpräzises Drehmomentmesssystem (HBM T12) eingesetzt. mit eingebautem Motordrehzahlsensor dient zur Messung des Bremsmoments und der Motordrehzahl. Für Bei der IMEP-Bestimmung ist es wichtig, die Position des (Abschuss-)oberen Totpunkts (TDC) zu bestimmen. des Kolbens mit großer Präzision. Für diese Aufgabe wird ein kapazitiver TDC-Sensor (AVL OT428) verwendet gewährleisten eine hochgenaue TDC-Bestimmung. Idealerweise sollte die OT-Bestimmung für jeden durchgeführt werden Betriebszustand, da die Motorlast und sogar die Öltemperatur die genaue Position des beeinflussen oberer Totpunkt. Ein häufiger Kompromiss besteht darin, die TDC-Bestimmung für einen wichtigen Betrieb durchzuführen Zustand, daher wird der OT für eine Motordrehzahl von 2500 U/min ermittelt.

Öl und Kühlmittel des zu prüfenden Motors werden extern bereitgestellt. Die Temperatur und der Druck des zugeführten Öls und Kühlmittels sind sehr gut stabilisiert und schwanken deutlich weniger vom Nennwert Genauigkeit der verwendeten Sensoren: Für die Temperaturmessungen werden Thermoelemente vom Typ K mit verwendet Es wird eine Genauigkeit von ca. $\pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$ verwendet. Die verwendeten Drucksensoren haben eine Genauigkeit von ca. $\pm 0,05$ bar. Der Zylinderdruck wird in allen Zylindern mittels piezoelektrischer Drucksensoren gemessen.

2.2. Die getesteten Schmierstoffe

In dieser Studie werden drei verschiedene Schmierstoffe und ihre Auswirkungen auf die Motoreffizienz analysiert. Der Motor ist ursprünglich für den Betrieb mit Motorölen der Klasse SAE 5W30/0W30 ausgelegt. Daher ein voll Als Referenz für weitere Arbeiten wird synthetisches 0W30-Motorenöl (Shell PC2018) für Dieselmotoren gewählt Vergleich. Das zweite Öl, ein Schmierstoff mit niedrigerer Viskosität, ist ein vollsynthetisches 0W20-Motoröl (Shell PC2016) mit einem ähnlichen Additivpaket, das im 0W30-Motoröl verwendet wird. Das dritte Motoröl ist vollständig auf Basis eines Polyalkylenglykol (PG)-Grundmaterials (Dow E72 XZ97011.01 [16]) formuliert. Es ist speziell für den Einsatz in Verbrennungsmotoren entwickelt und weist einen sehr hohen Viskositätsindex auf (VI) ohne die Notwendigkeit, VI-verbessernde Zusätze hinzuzufügen. VI-Verbesserer können einen erheblichen Effekt haben nicht-Newtonsches Verhalten [21–24] des Schmierstoffs. Daher ist ein Schmiermittel ohne diese zu erwarten behält seine hohe Viskosität auch bei lokal hohen Scherraten bei, was ein Vorteil für ist hochbelastete Kontakte.

In dieser Arbeit werden die Begriffe 0W30, 0W20 und Polyglykol der Kürze halber nur für diese Bezeichnungen verwendet Schmierstoffe anstelle ihrer vollständigen Namen.

Eine der Schmierstoffeigenschaften ist die Viskosität bei hoher Schergeschwindigkeit und hoher Temperatur (HTHS-Viskosität definiert bei 150 $^{\circ}\text{C}$ und einer Schergeschwindigkeit von 106 s^{-1}), ist nicht nur eng mit dem Kraftstoff verbunden Es wird jedoch sogar ein linearer Zusammenhang vorgeschlagen [25]. Wie erwartet zeigt das 0W30-Schmiermittel eine höhere HTHS-Viskosität als die anderen beiden Öle (3,2 mPa·s vs. 2,6 mPa·s). Es ist jedoch interessant zu beachten, dass die HTHS-Viskosität von 0W20 und dem Schmiermittel auf Polyalkylenglykolbasis identisch ist; Unter dem Gesichtspunkt der reinen HTHS-Viskosität könnte also vermutlich das gleiche Maß an Motorreibung vorliegen erwartet von den 0W20- und PG-Schmierstoffen.

Die physikalischen Eigenschaften aller drei getesteten Motoröle sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Grundlegende rheologische Eigenschaften der getesteten Schmierstoffe.

Parameter	Shell 0W30	Shell 0W20	Dow E72 (PG)
Verwandschaft. Viskosität bei 40 $^{\circ}\text{C}$ [mm ² /s]	51.2	37.8	21.0
Verwandschaft. Viskosität bei 100 $^{\circ}\text{C}$ [mm ² /s]	10.4	7.6	5.6
HTHS-Viskosität [mPa·s]	3.2	2.6	2.6
Viskositätsindex	198	175	229

Abbildung 1 zeigt den Temperaturverlauf für die Viskosität und die Dichte des untersuchten Stoffes Schmierstoffe. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist die Dichte von PG im Vergleich zu etwa 20 % höher die synthetischen Motorenöle auf Kohlenwasserstoffbasis.

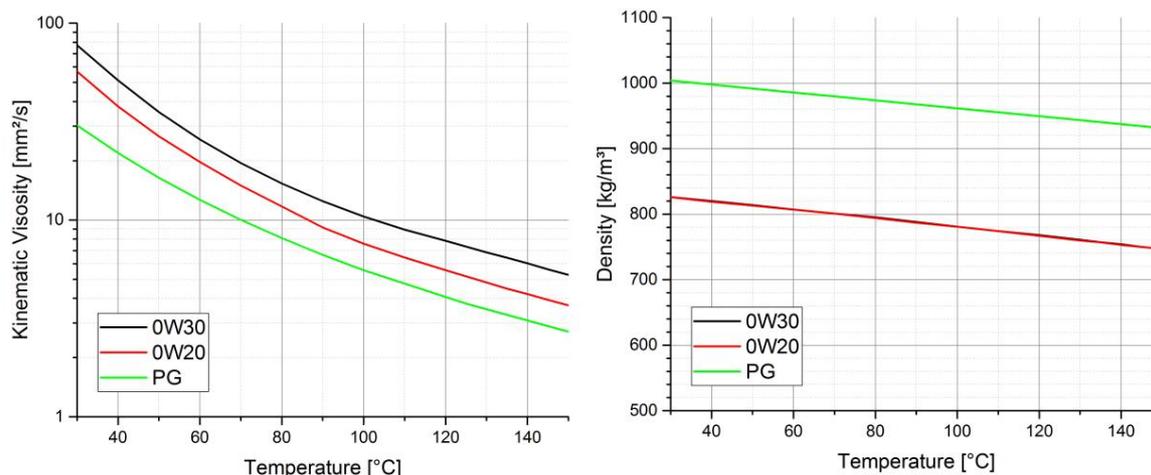


Abbildung 1. Schmierstoffeigenschaften über der Temperatur. **(Links)** Kinematische Viskosität. **(Rechts)** Dichte (bitte beachten Sie, dass die Kurven für die 0W30- und 0W20-Dichten im rechten Diagramm übereinstimmen).

Bei den experimentellen Tests wird große Sorgfalt darauf verwendet, den Motor mit einem neuen (anderen) Schmierstoff zu versorgen. Um zu vermeiden, dass sich verbleibende Reste des vorherigen Schmiermittels mit dem neuen vermischen, wird eine umfangreiche Spülung durchgeführt. Es wird allgemein angenommen, dass etwa 10 bis 15 % des vorherigen Schmiermittels im Motor verbleiben und dies ausreicht, um die Messungen des neuen Schmiermittels zu beeinflussen. Daher wird der Motor zweimal mit dem neuen Schmierstoff gespült und entleert, bevor er die endgültige Ölfüllung des neuen Schmierstoffs erhält.

2.3. Der Motor im Test

Bei dem getesteten Pkw-Motor handelt es sich um einen turboaufgeladenen Reihenvierzylinder-Common-Rail-Dieselmotor mit einem Nennhubvolumen von 1,6 Litern und einem Nennleistungsbereich von 100–130 kW (Renault R9M [26]). Mit einem entsprechenden Leistungsdichtebereich von 62,5–81,3 kW/L repräsentiert es den etablierten Downsizing-Trend, mehr Leistung aus einem reduzierten Hubvolumen zu erzielen. Tabelle 2 listet weitere technische Details des Motors auf. Der Motor wird in einer Vielzahl von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen eingesetzt und ist mechanisch effizient. Dabei kommen unter anderem Stahlkolben zum Einsatz, die aufgrund ihrer geringeren Wärmeausdehnung die Reibungsverluste der Kolbenanordnung reduzieren [27,28].

Motorvorbereitung: Um die Reibungsleistungsverluste nur des Basismotors messen zu können, wurden alle Hilfsgeräte wie Öl- und Wasserpumpe, Lichtmaschine usw. vom Motor entfernt. Außerdem wird die Common-Rail-Pumpe des Einspritzsystems entfernt, die ursprünglich vom Ventiltrieb angetrieben wurde. Folglich wird durch den Wegfall der Hilfssysteme die Belastung des Steuertriebs verringert.

Um eine externe Temperatur- und Druckregelung der Medien zu realisieren, wurden mehrere Teile des Motors, z. B. das Ölmodul und die Ölwanne, modifiziert. Die Zufuhr von Kühlmittel und Motoröl erfolgt über externe Versorgungseinheiten, die auch die Vorlauftemperaturen und -drücke regeln. Die Vorlauftemperaturen und -drücke werden direkt am Kühlmittelkreislauf bzw. Ölkanal des Motors gemessen.

Tabelle 2. Technische Daten des getesteten Motors.

Position/Parameter	Beschreibung
Motorbezeichnung	Renault R9M
Motorkonfiguration	Im Einklang
Anzahl der Zylinder	4
Verschiebung	1598 cm ³
Leistung	100 kW bei 4000 U/min
Drehmomentabgabe	320 Nm bei 1750 U/min
Langweilig	80 mm
Schlaganfall	79,5 mm
Kompressionsrate	15,4:1
Ventiltrieb	DOHC mit Rollennockenfolger
Ventil	4 Ventile pro Zylinder
Kolben	Stahl

Um den Einfluss der verschiedenen Schmierstoffe auf die Temperatur in der Luft untersuchen zu können Hauptlager werden die Temperaturen jedes Hauptlagers mit Thermoelementen vom Typ K gemessen. Die Temperatursensoren messen die Temperatur an der Rückseite der Lagerschale, wie in Abbildung 2 dargestellt. Das verwendete Nummerierungsschema der Hauptlager beginnt mit Hauptlager 1 neben dem Steuerantrieb.

**Abbildung 2.** Temperatursensoren messen die Temperatur jedes Hauptlagers.

Betriebsbedingungen reichen von niedrigen bis hohen Motordrehzahlen bei niedriger und hoher Motorlast werden für zwei unterschiedliche Kühlmittel-/Öltemperaturen durchgeführt. Für die Tests die Öl- und Kühlmittelversorgung die Temperaturen bleiben identisch; Daher wird der Begriff „Medientemperatur“ der Kürze halber verwendet die folgende.

Die Betriebsbedingungen (Drehzahlen und Lasten), unter denen der Motor getestet wird, sind in Abbildung 3 dargestellt. Diese Motorbetriebsbedingungen werden für eine Medientemperatur von 70 und 90 °C durchgeführt. Vor dem Bei den Messungen wird der Motor nach dem Standardverfahren des Herstellers betrieben. Nicht signifikant Während oder nach den nachfolgenden Tests konnte eine Änderung der Motorreibung festgestellt werden.

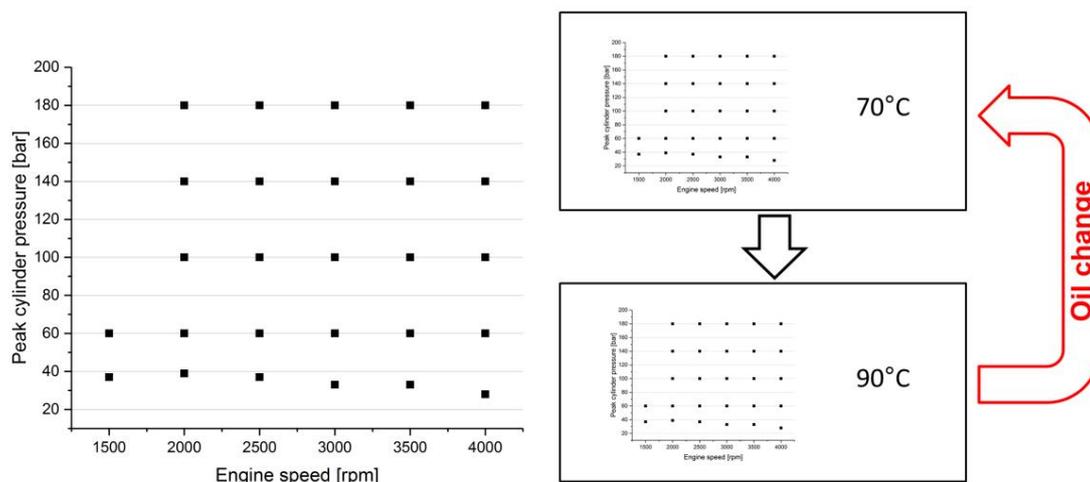


Abbildung 3. Übersicht über den Testablauf. **(Links)** Die Tests deckten den gesamten Bereich der Betriebsbedingungen des Motors ab (in Bezug auf Drehzahl und Last). **(Rechts)** Flussdiagramm der getesteten Motorbetriebsbedingungen. Die Tests werden für zwei verschiedene Medientemperaturen (70 °C, 90 °C) und für drei verschiedene Schmierstoffe (0W30, 0W20 und PG, in dieser Reihenfolge) durchgeführt.

3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Reibungsverluste des Testmotors für alle drei getesteten Schmierstoffe dargestellt. Die Ergebnisse diskutieren das Reibungsdrehmoment für angetriebene und belastete Betriebsbedingungen. Zusätzlich wird der Einfluss des Schmierstoffs auf die Hauptlagertemperaturen und auf die Ölaustrittstemperatur untersucht.

3.1. Reibungstests für Motormotoren

Ausgehend von den Ergebnissen für den motorisierten Zustand sind in Abbildung 4 die erhaltenen Motorreibmomente für die getesteten Schmierstoffe dargestellt. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse für zwei verschiedene Medientemperaturen, nämlich 70 und 90 °C.

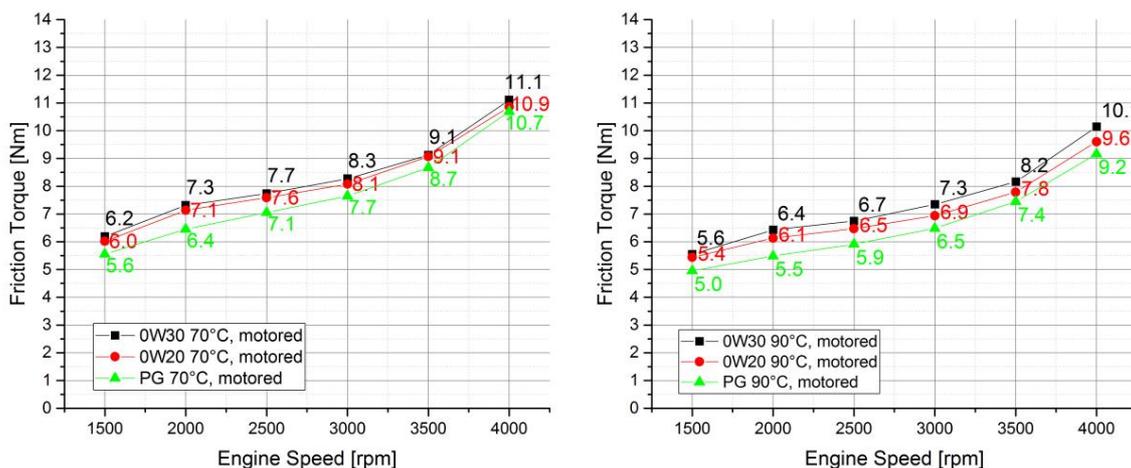


Abbildung 4. Reibungsdrehmoment des Testmotors unter Motorbedingungen für 0W30 (schwarz), 0W20 (rot) und PG (grün). **(Links)** Die Medientemperatur beträgt 70 °C. **(Rechts)** Die Medientemperatur beträgt 90 °C.

Bei allen drei Schmiermitteln steigt das Reibmoment mit der Motordrehzahl. Bei hoher Drehzahl (ca. 3500 U/min) nimmt die Steigung des Reibmoments weiter zu. Obwohl die Viskosität der Schmierstoffe bei einer Erhöhung der Medientemperatur von 70 auf 90 °C um etwa 40 % abnimmt (siehe Abbildung 1), ist die

Der resultierende Unterschied der gesamten Motorreibung für diese beiden Medientemperaturen ist deutlich geringer (nur etwa 10 %).

Das höchste Reibmoment wird mit 0W30 für beide Medientemperaturen erreicht. Bei 90 °C erhöht sich das Reibmoment bei 0W30 von 5,6 Nm bei 1500 U/min auf 10,1 Nm bei 4000 U/min und verdoppelt seinen Wert nahezu. Für die niedrigere Medientemperatur von 70 °C liegen die entsprechenden Reibmomente im Bereich von 6,2 bis 11,1 Nm.

Ein ähnlicher Trend ist zu beobachten, wenn die Viskosität durch die Verwendung eines niedrigviskosen Schmiermittels wie 0W20 gesenkt wird. Bei beiden Medientemperaturen liegen die mit 0W20 erzielten Reibmomente unter den entsprechenden Reibmomenten des Referenzschmierstoffs (0W30). Die Reduzierung des Reibmoments liegt lediglich zwischen 0,1 und 0,5 Nm. Mit PG wird ein deutlich geringeres Reibmoment erreicht.

Im Vergleich zu 0W30 ist eine Reibmomentreduzierung zwischen 0,4 und 0,9 Nm zu beobachten. Abbildung 5 zeigt die Reibungsreduzierung von 0W20 und PG im Vergleich zum 0W30-Schmiermittel.

Interessant ist, dass die gemessenen Unterschiede im Reibmoment, die nur 0,1 Nm betragen, nur 0,03 % des Nenn Drehmoments des Motors ausmachen. Dies zeigt die hohe Genauigkeit des eingesetzten Prüfstands und dass eine solch hohe Genauigkeit unerlässlich ist, um verschiedene Schmierstoffe untersuchen zu können.

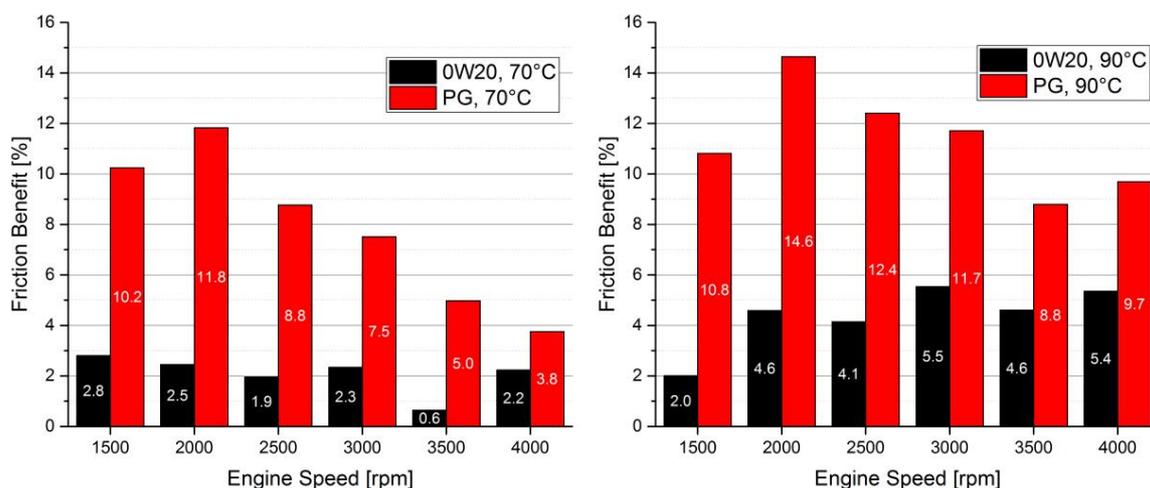


Abbildung 5. Reibungsvorteil bei Motorbedingungen für 0W20 (schwarz) und PG (rot) im Verhältnis zum Reibungsdrehmoment, das mit 0W30 erzielt wird. **(Links)** Die Medientemperatur beträgt 70 °C. **(Rechts)** Die Medientemperatur beträgt 90 °C.

Bei einer Medientemperatur von 70 °C weist 0W20 einen nahezu konstanten Reibungsvorteil von etwa 2 % auf. PG zeigt einen maximalen Reibungsvorteil von 11,8 % bei 2000 U/min. Mit zunehmender Motordrehzahl verringert sich der Reibungsvorteil von PG. Bei 4000 U/min beträgt der Reibungsvorteil 3,8 %.

Bei einer Medientemperatur von 90 °C werden ähnliche Ergebnisse erzielt. Im Vergleich zu PG zeigt 0W20 erneut einen gleichmäßigeren Reibungsvorteil über den gesamten Drehzahlbereich. Bei einer Erhöhung der Medientemperatur von 70 auf 90 °C erhöht sich auch der Reibungsvorteil von 0W20 von etwa 2,2 % auf 5 %. Eine wahrscheinliche Erklärung für den größeren Nutzen bei höherer Medientemperatur könnte der mit zunehmender Temperatur zunehmende Viskositätsunterschied zwischen den beiden Ölen sein (vergleiche Abbildung 1). Für PG liegt der Reibungsvorteil zwischen 8,8 % und 14,6 %. Auch hier zeigt sich mit zunehmender Motordrehzahl ein abnehmender Trend.

3.2. Motorreibungstests unter Last

Für 0W30 und 0W20 wird der gesamte Testvorgang im belasteten Zustand durchgeführt. Dabei werden Zylinderdrücke bis zu 180 bar erreicht und die Drehzahlen liegen zwischen 1500 und 4000 U/min (siehe Abbildung 3). Der Kürze halber konzentrieren sich die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse auf eine Medientemperatur von 90 °C. Abbildung 6 zeigt das mit 0W30 erhaltene Reibmoment im linken Diagramm und das mit 0W20 erhaltene Reibmoment im rechten Diagramm.

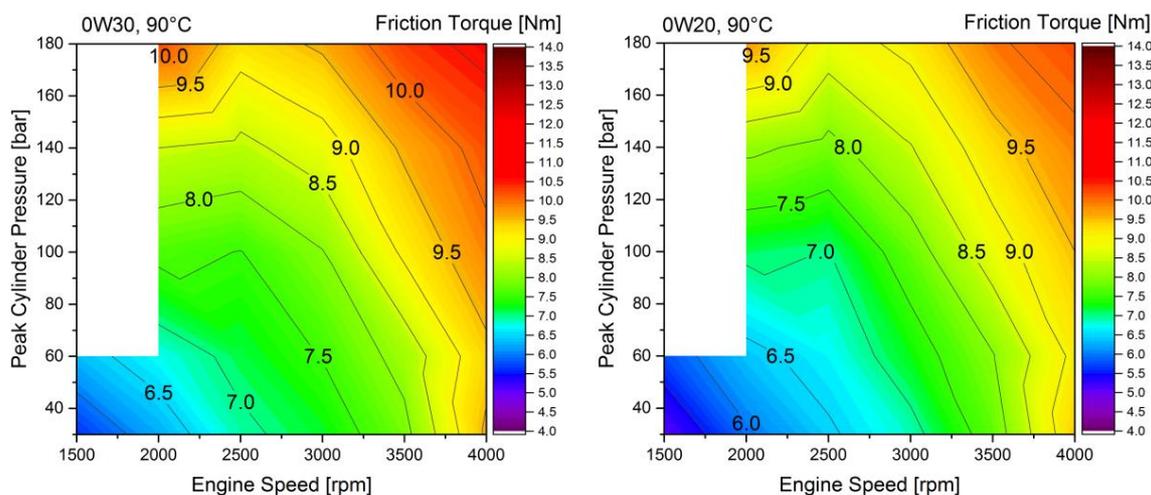


Abbildung 6. Reibungsmoment des belasteten Testmotors bei einer Medientemperatur von 90 °C. **(Links)** Schmiermittel: 0W30. **(Rechts)** Schmiermittel: 0W20.

Generell zeigen beide Schmierstoffe über den gesamten Drehzahl- und Lastbereich ein ähnliches Reibungsverhalten des Motors. Bei beiden Schmierstoffen tritt das niedrigste Reibungsmoment bei niedriger Drehzahl und geringer Last auf. Mit zunehmender Motordrehzahl erhöht sich das Reibmoment, wie bereits in den motorisierten Ergebnissen zu sehen war. Zudem erhöht sich das Reibmoment mit zunehmender Belastung. Daher liegt das maximale Reibmoment bei 4000 U/min und einem Spitzenzylinderdruck von 180 bar. Beide Schmierstoffe zeigen einen recht starken Anstieg des Reibmoments mit der Belastung, insbesondere bei 2000 U/min. Daher ist das Reibmoment bei 2000 U/min und einem Zylinderspitzenruck von 180 bar höher als bei gleicher Belastung bei 2500 U/min und 3000 U/min. Über den gesamten Drehzahl- und Lastbereich weist 0W20 im Vergleich zu 0W30 ein geringeres Reibmoment auf. Der Unterschied zwischen den beiden Schmierstoffen liegt zwischen 0,2 Nm und 0,5 Nm. Der Anstieg des Reibmoments mit zunehmendem Zylinderspitzenruck bei 2000 U/min ist außerdem in Abbildung 7 im Diagramm links dargestellt. Diese Abbildung zeigt das Reibungsmoment, das durch die Zugabe von PG erreicht wird.

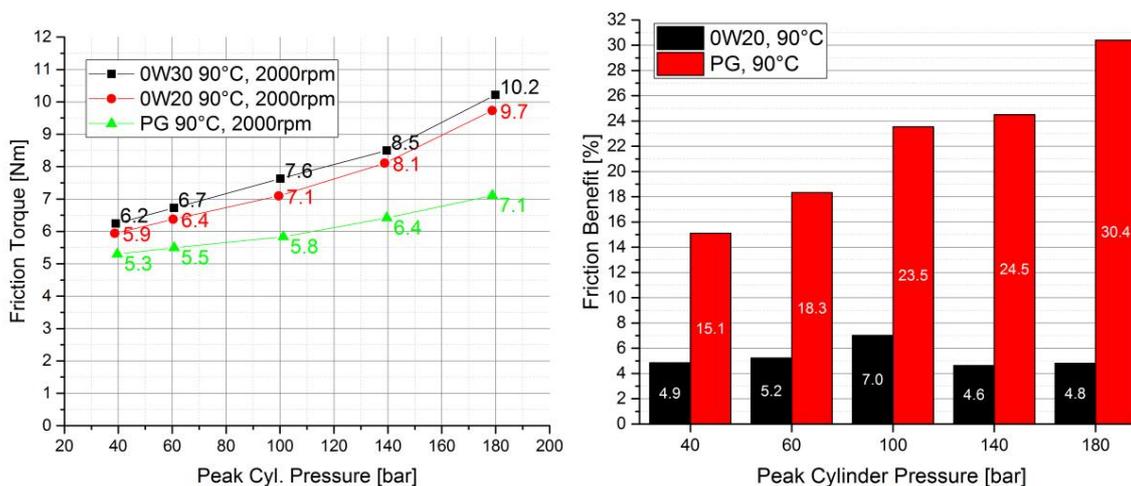


Abbildung 7. Ergebnisse für den Testmotor unter Last bei 2000 U/min und einer Medientemperatur von 90 °C. **(Links)** Reibungsmoment des Testmotors bei Belastung für 0W30 (schwarz), 0W20 (rot) und PG (grün). **(Rechts)** Reibungsvorteil für den Testmotor unter Lastbedingungen für 0W20 (schwarz) und PG (rot) bezogen auf das mit 0W30 erhaltene Reibungsdrehmoment.

Vergleicht man den Einfluss der Motordrehzahl, Abbildung 4, mit dem Einfluss der Last bei einer Motordrehzahl von 2000 U/min, Abbildung 7, ist es interessant festzustellen, dass sowohl Drehzahl als auch Last ungefähr den gleichen Einfluss haben und das gesamte Reibungsdrehmoment des Motors fast verdoppeln (Das Reibungsdrehmoment reicht von 6,2 bis 11,1 Nm bei 1500 bis 4000 U/min Motordrehzahl für 0W30 im Vergleich zu 6,2 bis 10,2 Nm Reibungsdrehmoment bei 2000 U/min für 40 bis 180 bar Spitzenzylinderdruck. Bemerkenswert ist, dass der Einfluss der Motorlast auf das Motorreibmoment bei 2000 U/min am stärksten ist und bei höheren Motordrehzahlen schwächer ausfällt, siehe Abbildung 6. Doch auch wenn die Reibmomente für diese beiden Betriebspunkte ähnlich groß sind, kommt es zu den entsprechenden Reibungsverlusten (die sich auf den Kraftstoffverbrauch auswirken) sind bei 2000 U/min immer noch nur halb so hoch wie bei 4000 U/min.

Das mit 0W30 erzielte Reibmoment steigt von 6,2 Nm bei etwa 40 bar Zylinderspitzenruck auf 10,2 Nm bei 180 bar Zylinderspitzenruck. Für 0W20 ist der Verlauf des Reibmoments ähnlich, jedoch in seiner Größe um ca. 0,4 Nm reduziert. Allerdings zeigt PG ein anderes Verhalten als 0W30 und 0W20. Der Einfluss der Belastung auf das Reibmoment ist deutlich geringer; Das Reibmoment steigt von 5,3 Nm bei 40 bar Zylinderspitzenruck auf 7,1 Nm bei 180 bar Zylinderspitzenruck. Somit ergibt sich bei maximaler Belastung eine drastische Reduzierung des Reibmoments um 3,1 Nm gegenüber 0W30. Das Diagramm rechts in Abbildung 7 zeigt den Reibungsvorteil für 0W20 und PG im Verhältnis zu 0W30. Während der Reibungsvorteil von etwa 5 % für 0W20 über den Zylinderspitzenruck relativ stabil bleibt, erhöht sich der Reibungsvorteil für PG von 15 % auf 30 %.

3.3. Hauptlagertemperaturen

Zusätzlich zur gesamten Motorreibung werden die wichtigsten Lagertemperaturen ausgewertet, um den Einfluss des Schmierstoffs auf die Lagerleistung zu diskutieren. Beim Wechsel des Schmierstoffs mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften treten gleichzeitig zwei Effekte auf. Erstens variieren die Verluste aufgrund der viskosen Reibung, was sich auf die Wärmeableitung und darüber hinaus auf die Temperatur des Lagers auswirkt. Zweitens beeinflusst die Viskosität den Ölfluss durch das Lager und damit die Wärmekonvektion, was wiederum Einfluss auf die Hauptlagertemperatur hat. Daher werden diese beiden Effekte in dieser Studie nicht voneinander getrennt.

Abbildung 8 zeigt die gemessenen Temperaturen an Hauptlager 1 (Diagramm links) und Hauptlager 3 (Diagramm rechts) für den Motorbetrieb. Das Hauptlager 1 befindet sich am Steuertrieb und das Hauptlager 3 befindet sich in der Mitte der Kurbelwelle. Zusätzlich zu den gemessenen Lagertemperaturen werden die gemessenen Ölvorlauftemperaturen angezeigt, die während des gesamten Testvorgangs sehr stabil sind.

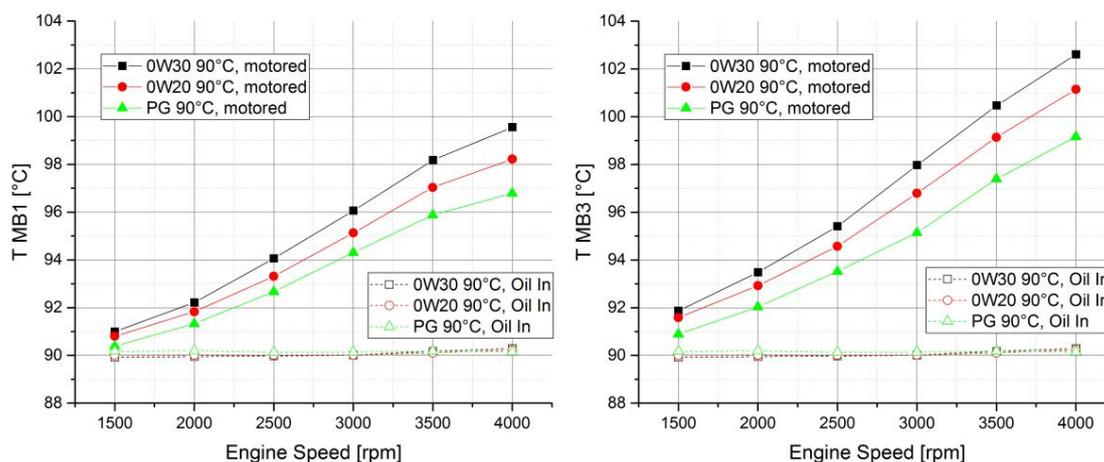


Abbildung 8. Hauptlagertemperatur und Ölversorgungstemperatur des Testmotors bei angetriebenen Bedingungen für 0W30 (schwarz), 0W20 (rot) und PG (grün). Die Medientemperatur beträgt 90 °C. (**Links**) Hauptlager 1, befindet sich am Steuertrieb. (**Rechts**) Hauptlager 3, in der Mitte gelegen.

Im Allgemeinen steigt die Lagertemperatur mit der Motordrehzahl. Aufgrund der höheren Scherspannungen im Schmierfilm bei hoher Geschwindigkeit kommt es zu höherer Reibung und Wärmeableitung. Bei 1500 U/min ist die Hauptlagertemperatur im Vergleich zur Ölvorlaufemperatur nur geringfügig höher. Mit den beiden Schmierstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis, 0W30 und 0W20, beträgt die Temperatur 91 °C am Hauptlager 1 und 92 °C am Hauptlager 3. Die mit PG erreichte Lagertemperatur ist sogar niedriger als die mit 0W30 und 0W20 erreichten Temperaturen. Mit zunehmender Motordrehzahl nimmt der Temperaturunterschied zwischen den drei Schmierstoffen zu. Die höchste Temperatur und damit die größten Reibungsverluste in den Hauptlagern treten bei 0W30 auf, gefolgt von 0W20 und PG. Bei 4000 U/min beträgt der Temperaturunterschied 1,5 °C zwischen 0W30 und 0W20 und 3–4 °C zwischen 0W30 und PG.

Der Temperaturanstieg in den Hauptlagern aufgrund der Motorlast ist in Abbildung 9 dargestellt. Auch hier sind in den beiden Diagrammen Hauptlager 1 und Hauptlager 3 dargestellt. Hauptlager 3 weist einen stärkeren Temperatur- und Reibungsanstieg auf, da das Lager durch die Belastung zweier benachbarter Zylinder beansprucht wird, während Hauptlager 1 nur einen benachbarten Zylinder hat. Die Temperatur steigt linear mit dem Spitzendruck im Zylinder. Während die Lagertemperatur bei 0W30 und 0W20 parallel ansteigt, ist die Neigung bei PG etwas geringer. Insbesondere bei hohen Motorlasten ergibt sich daher ein Temperatur- und Reibungsvorteil in den Hauptlagern.

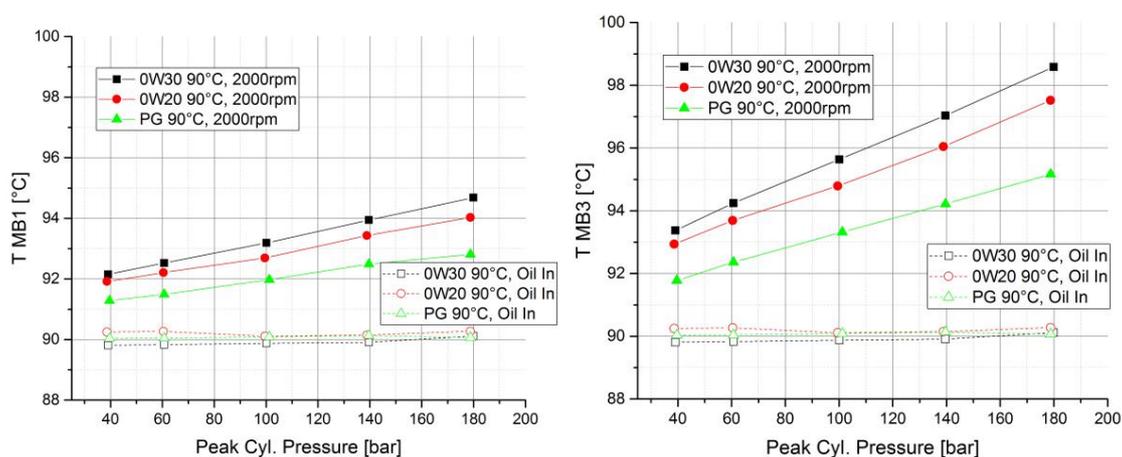


Abbildung 9. Hauptlagertemperatur und Ölversorgungstemperatur des Testmotors unter Lastbedingungen für 0W30 (schwarz), 0W20 (rot) und PG (grün). Die Medientemperatur beträgt 90 °C. **(Links)** Hauptlager 1, befindet sich am Steuertrieb. **(Rechts)** Hauptlager 3, in der Mitte gelegen.

3.4. Schmierstoffaustrittstemperatur

Der größte Teil der Wärme, die durch Reibung im Motor entsteht, wird vom Schmierstoff abgeführt [29]. Die Schmierstoffaustrittstemperatur stellt somit die Kühlleistung des Schmierstoffs dar. Abbildung 10 zeigt die gemessene Schmierstoffaustrittstemperatur im linken Diagramm im angetriebenen Zustand und im rechten Diagramm im belasteten Zustand.

Die Schmierstoffaustrittstemperatur steigt mit Last und Drehzahl bis auf die letzte Drehzahlstufe bis 4000 U/min. Der Grund dafür ist, dass bei 4000 U/min der Ölversorgungsdruck um 2,2 bar erhöht wird. Dadurch fließt mehr Schmierstoff durch die Lager und transportiert mehr Wärme. Die beiden Schmierstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis, 0W30 und 0W20, weisen ähnliche Auslaufemperaturen auf. Erst bei hoher Drehzahl und hohen Zylinderspitzen drücken zeigt 0W20 eine niedrigere Temperatur, die den Gesamtreibungsverlusten im Motor entspricht (vergleiche Abbildungen 4 und 7). Die mit PG erzielte Schmierstoffaustrittstemperatur liegt deutlich unter der Temperatur, die bei kohlenwasserstoffbasierten Schmierstoffen auftrat. Neben der geringeren Wärmeentwicklung aufgrund der geringeren Reibung im Motor hat die höhere volumetrische Wärmekapazität von PG den zusätzlichen Vorteil einer verbesserten Kühlung des Motors [11].

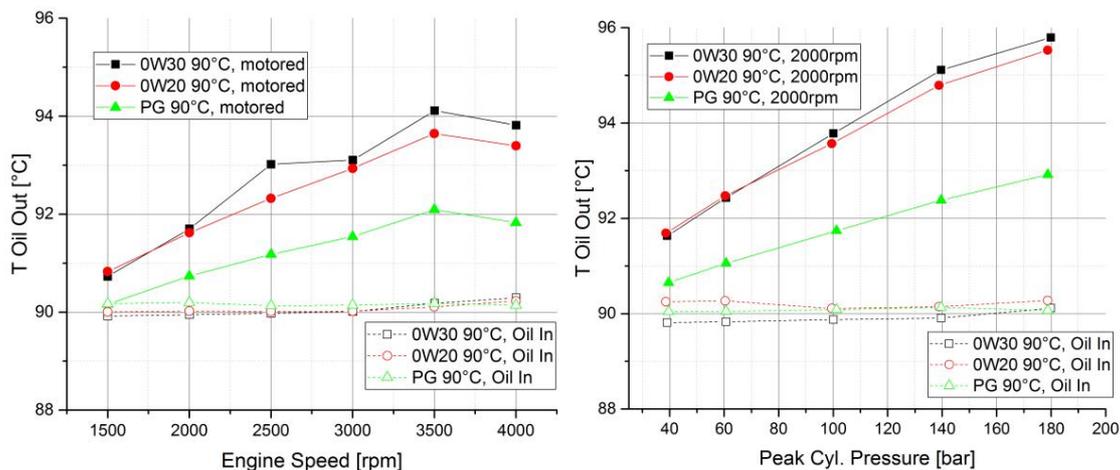


Abbildung 10. Ölaustrittstemperatur und Ölversorgungstemperatur des Testmotors für 0W30 (schwarz), 0W20 (rot) und PG (grün). Die Medientemperatur beträgt 90 °C. **(Links)** Motorische Bedingungen. **(Rechts)** Beladene Bedingungen bei 2000 U/min.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Das Potenzial zur Reibungsreduzierung durch den Einsatz von Schmiermitteln mit niedriger Viskosität wird in dieser Studie anhand eines verkleinerten Dieselmotors auf einem hochpräzisen Prüfstand untersucht. Da der Motor für den Betrieb mit 0W30-Schmierstoffen ausgelegt ist, stellt 0W30 die Referenz für die beiden anderen getesteten Schmierstoffe 0W20 und PG dar.

Das gemessene Reibmoment zeigt ein charakteristisches Verhalten; Sowohl die Motordrehzahl als auch die Motorlast erhöhen die gesamte Motorreibung in ähnlicher Größenordnung. Im angetriebenen Zustand wird aufgrund der geringeren Schmierstoffviskosität bei hohen Temperaturen ein deutlicher Vorteil von etwa 10 % festgestellt, wenn die Medientemperatur von 70 auf 90 °C erhöht wird.

4.1. Vollsynthetisches, niedrigviskoses Schmiermittel

Die mechanische Motorleistung wird zusätzlich mit einem vollsynthetischen Leichtlaufschmierstoff (0W20) analysiert und die Ergebnisse mit den Ergebnissen mit dem Referenzschmierstoff (0W30) verglichen. Der Verlauf des Reibmoments über Drehzahl und Belastung ist bei beiden Schmierstoffen identisch. Daher erscheint das Vorhandensein eines Metall-Metall-Kontakts in den geschmierten Kontakten unwahrscheinlich, da dies außerdem zu einem erhöhten Reibungsmoment führen würde (siehe beispielsweise [30]).

Für den gesamten untersuchten Drehzahl- und Lastbereich wird ein Reduktionspotenzial der gesamten Motorreibungsverluste durch den Einsatz von 0W20 identifiziert. Bei einer Medientemperatur von 90 °C reduzieren sich die Reibungsverluste im motorisierten Zustand und unter Last bei einer Motordrehzahl von 2000 U/min um etwa 5 %. Es ist interessant festzustellen, dass ein Unterschied von fast 25 % in der HTHS-Viskosität (3,2 mPa·s gegenüber 2,6 mPa·s) erforderlich ist, um diesen Reibungsreduzierungsvorteil von 5 % für das 0W20 zu erzielen.

Für beide Schmierstoffe werden auch die Hauptlagertemperaturen ausgewertet. Durch die Reibung in den Lagern entsteht Wärme und die Lagertemperatur steigt dadurch an. Aufgrund geringerer Reibungsverluste in den Lagern wird bei Verwendung von 0W20 statt 0W30 eine niedrigere Temperatur beobachtet. Bei Metall-Metall-Kontakt würde die Lagertemperatur ansteigen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptlager im rein hydrodynamischen Schmierbereich arbeiten.

4.2. Ultra-niedrigviskoses Schmiermittel auf Polyalkylenglykollbasis

Der dritte in dieser Studie untersuchte Schmierstoff ist ein ultraniedrigviskoser Schmierstoff (PG) auf Polyalkylenglykollbasis. Die Ergebnisse zeigen, dass PG ein großes Potenzial zur Reibungsreduzierung des gesamten Motors bietet. Obwohl der PG-Schmierstoff die gleiche HTHS-Viskosität von 2,6 mPa·s wie der getestete 0W20-Schmierstoff aufweist, ergeben sich drastische Unterschiede im gemessenen Reibmoment. Dies widerspricht dem Vorhergehenden

Arbeiten, die die HTHS-Viskosität direkt mit dem Kraftstoffverbrauch in Verbindung bringen, was offenbar nur für Schmierstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis gilt.

Im Vergleich zu 0W30 reduziert sich das Reibmoment mit PG im angetriebenen Zustand um etwa 10 %, und bei hoher Last ist ein deutlicher Effizienzvorteil von bis zu 30 % zu beobachten. Die im Vergleich zu 0W30 sehr niedrige Viskosität führt zu einer geringeren Reibung in den geschmierten Kontakten, die im rein hydrodynamischen Schmiermodus arbeiten. Daher weisen die Hauptlager aufgrund der geringeren Reibungserwärmung im Lager eine deutlich niedrigere Temperatur auf. Ein zusätzlicher Vorteil kann bei Kontakten auftreten, die im Misch- und Grenzschmierbereich arbeiten .

Neben dem Reibungsvorteil weist das untersuchte PG im Vergleich zu den beiden kohlenwasserstoffbasierten Motorölen eine höhere Wärmekapazität auf . Daher wurde in dieser Studie eine bessere Kühlleistung für PG ermittelt . Der letztendliche Einsatz von Schmierstoffen auf Polyalkylenglykollbasis in zukünftigen Motoren hängt jedoch von weiteren Eigenschaften ab; zum Beispiel die chemische Verträglichkeit von PG mit anderen Materialien, das Verschleißverhalten, die Performance mit DLC-Beschichtungen und das Alterungsverhalten im befeuerten Motorbetrieb.

4.3. Ausblick

Als zukünftige Arbeit ist eine weitere Aufschlüsselung der Reibungsverluste in die Teilsysteme des Motors (Kolbenbaugruppe , Kurbelwellenlager, Ventiltrieb und Steuertrieb) von Interesse, da die verschiedenen Teilsysteme normalerweise in unterschiedlichen Schmierregimen arbeiten, was eine noch größere Steigerung ermöglichen würde detaillierte Analyse der getesteten Schmierstoffe.

Danksagung: David E. Sander, Christoph Knauder und Hannes Allmaier möchten sich herzlich für die großzügige Genehmigung von Renault zur Veröffentlichung aller Daten bedanken. Darüber hinaus möchten wir Jean-Pierre Le Lagadec und Geoffrey Pagnoux für ihre hilfreiche Rezension dieses Artikels danken . Außerdem möchten wir der Dow Europe GmbH für die Bereitstellung des Polyalkylenglykol-Schmiermittels unseren Dank aussprechen. Dieses Projekt wurde vom Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 636380 gefördert. Darüber hinaus wurde die Arbeit in diesem Projekt teilweise durch das Programm COMET K2 – Kompetenzzentren für exzellente Technologien des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), des österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (bmwfw) gefördert. die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), das Land Steiermark und die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft (SFG).

Autorenbeiträge: Alle Autoren konzipierten und gestalteten die Experimente und diskutierten die Ergebnisse; Christoph Knauder und David E. Sander führten die Experimente durch; Slavitsa Damjanović-Le Baleur und Philippe Mallet stellten den Testmotor und die Testausrüstung zur Verfügung; Hannes Allmaier und David E. Sander analysierten die Daten und verfassten den Artikel.

Interessenkonflikte: Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Abkürzungen

In diesem Manuskript werden folgende Abkürzungen verwendet:

WIR	Viskositätsindex
PG	Polyalkylenglykol
EIS	Verbrennungsmotor
HTHS	Hohe Temperatur, hohe Scherung (Viskosität)
IMEP	Angezeigter mittlerer effektiver Druck
BMEP	Bremse mittlerer effektiver Druck
FMEP	Reibung bedeutet effektiven Druck
OT	Oberer Totpunkt
DOHC	Doppelte obenliegende Nockenwellen
DLC	Diamantähnlicher Kohlenstoff

Verweise

1. Fontaras, G.; Samaras, Z. Auf dem Weg zu 130 g CO₂/km – Abschätzung der zukünftigen Eigenschaften eines durchschnittlichen europäischen Personenkraftwagens. *Energiepolitik* **2010**, *38*, 1826–1833.

2. Holmberg, K.; Andersson, P.; Erdemir, A. Globaler Energieverbrauch durch Reibung in Pkw. *Tribol. Int.* **2012**, *47*, 221–234.
3. Okrent, EH Der Einfluss der Schmiermittelviskosität und -zusammensetzung auf Motorreibung und Lagerverschleiß. *ASLE Trans.* **1961**, *4*, 97–108.
4. Davison, ED; Haviland, ML Auswirkungen der Schmierstoffviskosität auf den Kraftstoffverbrauch von Pkw; Technisches SAE-Papier 750675; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1975.
5. Gjerde, HB; Younghouse, EC Ein Dieselmotortest zur Bewertung der Auswirkungen von Schmiermitteln auf den Kraftstoffverbrauch; SAE-Technisches Dokument 841368; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1984.
6. Taylor, RI; Coy, RC Verbesserte Kraftstoffeffizienz durch Schmierstoffdesign: Ein Rückblick. *Proz. Inst. Mech. Ing. J* **2000**, *214*, 1–15.

7. Carden, P.; Pisani, C.; Andersson, J.; Feld, I.; Lainé, E.; Bansal, J.; Devine, M. Die Auswirkung von Öl mit niedriger Viskosität auf Verschleiß, Reibung und Kraftstoffverbrauch eines Schwerlast-Lkw-Motors. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* **2013**, *6*, 311–319.
8. Plumley, MJ; Wong, VW; Martins, TV demonstriert einen verbesserten Kraftstoffverbrauch durch den Einsatz spezifischer Subsysteme Schmierstoffe für einen modifizierten Dieselmotor. *Tribol. Trans.* **2016**, doi:10.1080/10402004.2016.1179823.
9. Young, A. Kraftstoffverbrauch treibt Veränderungen bei Pkw-Ölformulierungen voran. *Lube-Tech* **2015**, *99*, 25–28.
10. Qu, J.; Blau, PJ; Dai, S.; Luo, H.; Meyer, HM Ionische Flüssigkeiten als neuartige Schmierstoffe und Additive für Dieselmotoranwendungen. *Tribol. Lette.* **2009**, *35*, 181–189.
11. Woydt, M. Polyalkylenglykole als Motorenöle der nächsten Generation. *J. ASTM Int.* **2012**, *8*, 1–15.
12. Igartua, A.; Fernández, X.; Areitioaurtena, O.; Luther, R.; Seyfert, C.; Rausch, J.; Illarramendi, I.; Berg, M.; Schultheiß, H.; Duffau, B.; et al. Bioschmierstoffe und triboreaktive Materialien für Automobilanwendungen. *Tribol. Int.* **2009**, *42*, 561–568.
13. Tormos, B.; Ramírez, L.; Johansson, J.; Björling, M.; Larsson, R. Kraftstoffverbrauch und Reibungsvorteile von Low Motorenöle mit hoher Viskosität für Hochleistungsanwendungen. *Tribol. Int.* **2017**, *110*, 23–34.
14. Knauder, C.; Allmaier, H.; Sander, DE; Salhofer, S.; Reich, FM; Sams, T. Analyse des Gleitlagers Reibungsverluste in einem Hochleistungsdieselmotor. *Schmierstoffe* **2015**, *3*, 142–154.
15. Skjoedt, M.; Butts, R.; Assanis, DN; Bohac, SV Auswirkungen der Öleigenschaften auf Ottomotoren mit Fremdzündung Reibung. *Tribol. Int.* **2008**, *41*, 556–563.
16. Cuthbert, J.; Gangopadhyay, A.; Elie, L.; Liu, Z.; Mcwatt, D.; Hock, ED; Erdemir, A. Motorreibungs- und Verschleißverhalten mit Polyalkylenglykol-Motorölen; SAE-Technisches Dokument 2016-01-2271; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2016.

17. Merryweather, S.; Zweifel, D.; Woydt, M. Motorenöle auf Polyglykolbasis – Muss sich die Industrie auf diese Schmierstoffklasse einstellen? In *Proceedings of the 5th World Tribology Conference*, Turin, Italien, 8.–13. September 2013.
18. Allmaier, H.; Knauder, C.; Sander, DE; Reich, F. Kombination von Messung und Simulation zur Analyse der Motorreibung. *MTZ Worldw.* **2016**, *77*, 66–71.
19. Allmaier, H.; Knauder, C.; Salhofer, S.; Reich, F.; Schalk, E.; Ofner, H.; Wagner, A. Eine experimentelle Untersuchung des Last- und Wärmeeinflusses der Verbrennung auf die Motorreibung. *Int. J. Engine Res.* **2016**, *17*, 347–353.
20. Sander, DE; Allmaier, H.; Reich, FM Bestimmung von Reibungsverlusten in Verbrennungsmotoren – Kombination aus Messung und validierter EHD-Gleitlagersimulation. In *Tagungsband der VDI-Berichte 2202*, Schweinfurt, Deutschland, 23.–24. April 2013; S. 165–175.

21. Allmaier, H.; Priestner, C.; Sander, DE; Reich, FM Reibung in Automobilmotoren. In *Tribologie im Ingenieurwesen*; Pihtili, H., Hrsg.; InTech: Rijeka, Kroatien, 2013; S. 149–184.
22. Allmaier, H.; Sander, DE; Priebisch, H.; Witt, M.; Füllenbach, T.; Skiadas, A. Nicht-Newton'sche und Einlaufverschleißeffekte bei Gleitlagern, die unter Mischschmierung betrieben werden. *Proz. Inst. Mech. Ing. J.* **2016**, *230*, 135–142.

23. Sander, DE; Allmaier, H.; Priebisch, H.; Reich, F.; Witt, M.; Füllenbach, T.; Skiadas, A.; Brouwer, L.; Schwarze, H. Einfluss von hohem Druck und Scherverdünnung auf die Gleitlagerreibung. *Tribol. Int.* **2015**, *81*, 29–37.

24. Sander, DE; Allmaier, H.; Priebisch, H. Reibung und Verschleiß in Kfz-Gleitlagern unter den heutigen schwierigen Bedingungen. In *Fortschritte in der Tribologie*; Darji, PPH, Hrsg.; InTech: Rijeka, Kroatien, 2016; S. 143–172.

25. De Carvalho, MJS; Seidl, PR; Belchior, CRP; Sodré, JR Schmierstoffviskosität und Viskositätsverbesserer additive Auswirkungen auf den Dieselmotorkraftstoffverbrauch. *Tribol. Int.* **2010**, *43*, 2298–2302.

26. Blanchard, E.; Visconti, J.; Coblenz, P.; Legrand, F.; Gautier, F.; Chevrot, M.; Clautet, M.; Trochu, F. The new Renault dCi 130 1.6 I Diesel engine. In Proceedings of the Aachener Kolloquium Fahrzeug-und Motortechnik 2010, Aachen, Germany, 4–6 October 2010.
27. Schreer, K.; Roth, I.; Schneider, S.; Ehnis, H. Analyse von Aluminium- und Stahlkolben – Vergleich von Reibung, Kolbentemperatur und Verbrennung. *J. Eng. Gasturbinenleistung* **2014**, 136, 101506.
28. Schneider, S.; Schreer, K.; Ehnis, H.; Spangenberg, S. Systemvergleich von Aluminium- und Stahlkolben für PC-Dieselmotoren. *MTZ Worldw.* **2013**, 74, 32–37.
29. Allmaier, H.; Priestner, C.; Reich, F.; Priebisch, H.; Novotny-Farkas, F. Zuverlässige und genaue Vorhersage der Reibung in Gleitlagern – Erweiterung des EHD-Simulationsmodells auf TEHD. *Tribol. Int.* **2013**, 58, 20–28.
30. Sander, DE; Allmaier, H.; Priebisch, H.; Witt, M.; Skiadas, A. Simulation der Gleitlagerreibung bei starker Mischschmierung – Validierung und Wirkung der Oberflächenglättung durch Einlaufen. *Tribol. Int.* **2016**, 96, 173–183.



© 2017 von den Autoren. Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz. Bei diesem Artikel handelt es sich um einen Open-Access- Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution veröffentlicht wird

(CC BY)-Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).