



Rezension

Chancen und Herausforderungen mit Polyalkylenglykol für die Motorölanwendung

Arup Gangopadhyay^{1,*} und John Cuthbertz ¹ Ford Motor Company, Dearborn, MI 48121, USA² The Dow Chemical Company, Midland, MI 48674, USA; jbcuthbert@dow.com

* Korrespondenz: agangopa@ford.com ; Tel.: +1-313-322-6986

Eingegangen: 17. Mai 2018; Angenommen: 17. August 2018; Veröffentlicht: 21. August 2018

Abstrakt: Neben Additiven spielt Grundöl bei der Formulierung von Motorölen eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung allgemeiner Leistungsmerkmale. Nicht-traditionelle Grundöle wie Polyalkylenglykol (PAG) fanden in der Vergangenheit bei der Formulierung von Motorölen für Kraftfahrzeuge keine große Beachtung. In dieser Untersuchung wurden PAGs zur Verbesserung der Motorölleistung untersucht, vor allem im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauchsvorteil gegenüber herkömmlichen Formulierungen auf Mineralölbasis. In diesem Papier werden die wichtigsten Ergebnisse einer umfangreichen Untersuchung hervorgehoben, von der Teile an anderer Stelle ausführlich veröffentlicht wurden, und es werden Chancen und Herausforderungen identifiziert. Abhängig von ihrem Ausgangsmaterial wurden mehrere PAG-Chemikalien untersucht. Die Reibungsleistung wurde mit verschiedenen Methoden bewertet, angefangen bei Labortests über Motorkomponenten bis hin zu Fahrgestell-Rollprüfstandtests. Die Haltbarkeit wurde auch anhand von Labortests über Motorkomponenten bis hin zu ASTM-Sequenztests bewertet. Die Untersuchung ergab, dass mit PAG-Öl eine erhebliche Reibungsreduzierung oder Kraftstoffeinsparung erzielt werden kann, die Verschleißschutzfähigkeit, die Kolbenablagerungen und die Lackierung jedoch erheblich verbessert werden müssen, was die Identifizierung/Entwicklung von Additivkomponenten erfordert. Es werden einige alternative Wege zur Leistungsverbesserung vorgeschlagen.

Schlüsselwörter: Polyalkylenglykol; Motoröl; Reibung; tragen; Oxidation; Schlamm und Lack

1. Einleitung

Motoröle spielen eine entscheidende Rolle bei der Reibungsreduzierung. In den letzten 20 Jahren haben Fortschritte in der Motoröltechnologie den Kraftstoffverbrauch stetig verbessert, da die Industrie von den GF-1- auf die GF-5-Spezifikationen umgestiegen ist. Diese Verbesserungen wurden in einem branchenweit anerkannten Motor unter Verwendung eines Standard-Dynamometerzyklus gemessen. Die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wurde durch Änderungen in der Grundölchemie, die Entwicklung neuer Reibungsmodifikatoren und deren Behandlungsniveaus sowie das gesamte Additivpaket bestehend aus verschiedenen anderen Komponenten beeinflusst, während andere Leistungsanforderungen beibehalten und/oder verbessert wurden. Eine zusätzliche Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs durch Motoröle mit derselben Viskositätsklasse wird immer schwieriger und erfordert daher möglicherweise die Konzentration auf nicht-traditionelle Grundöle.

Die Bedeutung des Grundöltyps für die Reibungsreduzierung wurde in der Vergangenheit gezeigt. Kiovsy et al. [1] hat anhand von Labortests gezeigt, dass hydrogecracktes Grundöl einen Reibungsvorteil gegenüber Polyalphaolefin und stark hydriertem Mineralöl bieten kann, während das gleiche Additivpaket und der gleiche Viskositätsgrad, SAE 5W-30, beibehalten werden. In ähnlicher Weise haben Igarashi et al. zeigte im FTP-Straßensimulatortest (Federal Test Procedure) mit SAE 5W-30-Motoröl eine Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs um 1,2 % mit stark hydrogecracktem Grundöl im Vergleich zu lösungsmittelraffiniertem Grundöl [2]. Polyalkylenglykole werden als synthetische Grundöle der API-Gruppe V eingestuft und werden derzeit für die Formulierung von Motorölen als Schritt nach vorn für eine deutliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs untersucht. Schmierstoffe auf der Basis von Polyalkylenglykol (PAG) werden als schwer entflammare Hydraulikflüssigkeiten, Kühlschmierstoffe, Kompressorschmierstoffe und Getriebeschmierstoffe verwendet. Sie wurden bereits in den 1950er Jahren auch zur Schmierung von Zweitaktmotoren erforscht [3]. Die Vorteile der Verwendung von Polyalkylenglykolen als Grundstoff für Motorölformulierungen sind unter anderem geringer

Grenzreibungskoeffizienten aufgrund ihrer polaren Natur, höherer Oxidationsstabilität, geringer Flüchtigkeit (5 %) für potenziell geringeren Ölverbrauch usw. [4]. Über den Einsatz in modernen Motoren liegen in der Literatur jedoch nur sehr wenige Informationen vor. Mithilfe eines Laborprüfstands haben Woydt und Kelling [5], zeigte eine signifikante Verringerung des Reibungskoeffizienten von Schmierstoffen auf PAG-Basis gegenüber Motorenölen auf Mineralölbasis im Temperaturbereich von 40–120 °C. Bei dieser Anlage wurde ein Abschnitt eines Rings gegen einen Abschnitt einer rotierenden Auskleidung (gegen eine vertikale Achse) gedrückt. Motorventiltriebtests zeigten eine deutliche Reibungsreduzierung bei 120 °C-Öltemperatur im Vergleich zur herkömmlichen Mineralölformulierung. Auch der Nockenverschleiß wurde um 42 % reduziert [6]. Es wurde auch berichtet, dass die Reibung des Motorlagers bei 100 °C über einer Formulierung auf Mineralölbasis. Eine ähnliche Reibungsreduzierung wurde bei Motortests beobachtet. Auch die thermooxidative Stabilität von PAG-Ölen hat sich gegenüber mineralischen Formulierungen als überlegen erwiesen. Greaves et al. [7] untersuchten die Tribofilmbildungseigenschaften von öllöslichem PAG (OSP) als Additiv in Polyalphaolefin (PAO)-Grundöl und in einem PAO-Grundöl mit 1 % Zinkdialkyldithiophosphat (ZDDP) als Anti-Verschleiß-Additiv. Die Zugabe von OSP zu PAO reduzierte Reibung und Verschleiß, es bildete sich jedoch kein nennenswerter Tribofilm. Bei der Zugabe von ZDDP bildete sich ein Tribofilm, die Geschwindigkeit der Filmbildung schien jedoch langsamer zu sein, was zu einem leichten Anstieg des Verschleißes führte.

Es liegt auf der Hand, dass PAGs in der Vergangenheit nicht im Detail untersucht wurden, obwohl nur begrenzte Studien zu ihren reibungsmindernden Eigenschaften vorliegen. Der Mechanismus zur Reibungsreduzierung wurde jedoch nicht im Detail untersucht. Ein Motoröl muss mehrere zusätzliche Leistungsmerkmale erfüllen – z. B. Verschleißschutzfähigkeit, Oxidations-, Schlamm- und Lackschutzfähigkeit usw. Auch diese wurden nicht im Detail untersucht.

Der Zweck dieses Papiers besteht darin, Chancen und zentrale Herausforderungen bei der Formulierung von Motorölen mit PAGs zu erfassen, die sich hauptsächlich aus einer umfangreichen Forschung ergeben. Dies verschaffte dem Team viele Einblicke in die Leistung von PAG verschiedener Chemikalien. Die Forschung begann mit verschiedenen PAG-Chemikalien und deren Bewertung in einfachen Labortests als Screening, um die Wirkung der Chemie auf die Reibungs- und Verschleißleistung zu verstehen und den Mechanismus zur Reibungsreduzierung zu identifizieren. Einige Formulierungen wurden ausgewählt und dann komplexeren Bewertungen auf Motorkomponentenebene sowie motorischen und befeuerten Motortests unterzogen, um Reibung, Verschleiß, Oxidation sowie Schlamm- und Lackbildungseigenschaften zu bewerten.

2. Schmierstoffe

Die allgemeinen Strukturen der untersuchten PAGs sind in Abbildung 1 dargestellt. Durch Variation der Ausgangsalkohole, Oxide und Endgruppen wurden fünf verschiedene Chemien geschaffen. R1 ist der Alkoholinitiator. Die Oxidmonomere sind entweder Ethylenoxid (–R2 oder R3 sind H), Propylenoxid (R2 oder R3 sind CH₃) oder Butylenoxid (R2 oder R3 C₂H₅). Wenn das Polymer ein Homopolymer ist, sind –R2 und –R3 dasselbe Oxidmonomer; Wenn es sich um ein Copolymer handelt, sind –R2 und –R3 unterschiedlich. Die Endgruppe –R4 kann entweder –H oder eine Alkylgruppe sein, wenn R4 eine Alkylgruppe ist, das PAG „verkappt“ ist, oder alternativ ein Diether. Wenn R4 Wasserstoff ist, also die Endgruppe –OH ist, ist der PAG ein monofunktionaler PAG oder wird einfach als „PAG“ bezeichnet. Bei den fünf verschiedenen untersuchten Polymeren handelte es sich um gekappte statistische Copolymere aus Ethylenoxid und Propylenoxid mit Alkohol 1; verkapptes Homopolymer von Propylenoxid mit Alkohol 1; verkapptes Homopolymer aus Propylenoxid und Alkohol 2; Homopolymer von Propylenoxid mit Alkohol 1; und Copolymer aus Propylenoxid und Butylenoxid mit Alkohol 2. Die Viskositäten des Polymers werden durch ihr Molekulargewicht bestimmt, das wiederum durch die Anzahl der Mol Oxid bestimmt wird, die dem Ausgangsalkohol zugesetzt werden (M_n und M_w Abbildung 1). Durch Anpassen M_n und M_w kann eine Reihe chemisch ähnlicher Polymere mit unterschiedlichen Hochtemperatur-Hochscherviskositäten (HTHS) synthetisiert werden. Durch das Mischen chemisch ähnlicher Polymere mit unterschiedlichen Viskositäten entstehen Flüssigkeiten mit Viskositäten zwischen den beiden Polymeren. Ausgewählte PAG-Formulierungen sind in der Tabelle aufgeführt. Alle Flüssigkeiten außer UC-PO-A1-F2-2.6 wurden mit einem proprietären Additivpaket formuliert [8,9], das auf einen niedrigen SAPS- und Aschegehalt sowie einen inhärent hohen Viskositätsindex (VI) ausgelegt ist. Die ausgewählten PAGs haben einen hohen Viskositätsindex und daher bestand keine Notwendigkeit, einen Viskositätsindexverbesserer hinzuzufügen. Zusätzlich zum proprietären Additivpaket enthielt UC-PO-A1-F2-2.6 ZDDP für verbesserte Verschleißschutzigenschaften und eine Reibung auf Molybdänbasis

Modifikator. Figur 2 zeigt die Beziehung zwischen kinematischer Viskosität und Temperatur für verschiedene Formulierungen. Es ist ziemlich offensichtlich, dass einige der PAGs bei niedrigeren Temperaturen eine deutlich niedrigere Viskosität aufweisen als das Basislinien-GF-5 5W-20, während der Wert von 100 erhalten bleibt. C-Viskosität auf dem gleichen Niveau. Dies ist von Bedeutung, da eine niedrigere Viskosität zu einer verbesserten Reibungsreduzierung beim Aufwärmen des Motors und auch in den Anfangsphasen des Kraftstoffverbrauchstests führen kann, in denen die Motoröltemperatur niedrig bleibt.

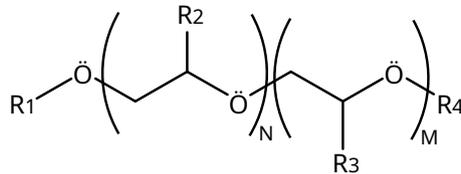
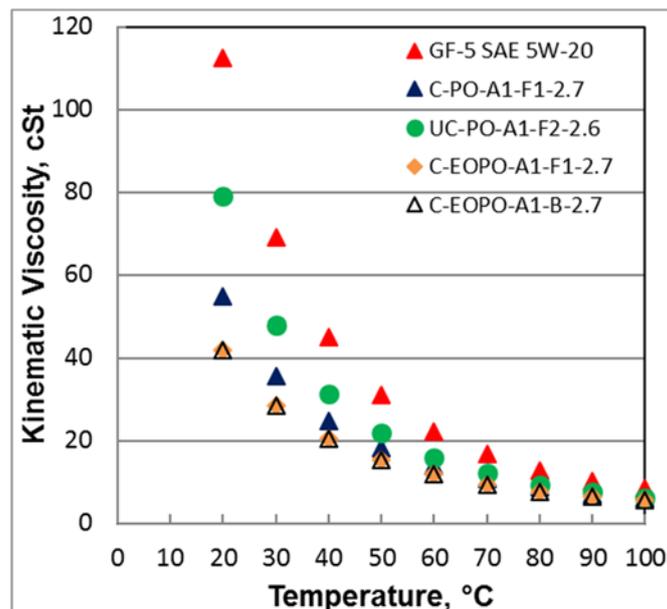


Abbildung 1. Allgemeine chemische Struktur von PAG. Nachdruck mit Genehmigung von [10].

Tabelle 1. Schmierstoffe zur Untersuchung in Betracht gezogen. Nachdruck mit Genehmigung von [10].

Beschreibung des Grundöls	CODE	HTHS@150 C	KV 100-C	KV 40-C	VI	Asche Gew.-%	Noack3 Gew.-%
		cP1	cSt	cSt			
Alkohol 1 eingeleitet Copolymer von Ethylen Oxid und Propylen oxidbedeckt (EO + PO)	C-EOPO- A1-F1-2.7	2.7	5.5	20.3	232		
Alkohol 1 eingeleitet Homopolymer von Propylenoxid (PO)-begrenzt	C-PO-A1- F1-2.7	2.7	6.1	25.01	204	<0,01	
Alkohol 1 eingeleitet Homopolymer von Propylenoxid (PO)-monol	UC-PO-A1- F2-2.6	2.6	6.3	31.3	156		
Mineralöl der Gruppe II	GF-5 SAE 5W-20	2.6	8.6	48	164	1,0	13



Figur 2. Viskositäts-Temperatur-Beziehung für verschiedene getestete Öle. Nachdruck mit Genehmigung von [10].

Eine der Herausforderungen bei der Formulierung mit PAG ist die Löslichkeit herkömmlicher Motoröladditivkomponenten. Im Allgemeinen sind der Verschleißschutzzusatz Zinkdialkyldithiophosphat (ZDDP), Antioxidantien, Dispergiermittel, Antischaummittel und Reibungsmodifikatoren lösliche, aber keine überbasischen Reinigungsmittel. Selbst diejenigen, die im Allgemeinen löslich sind, sind möglicherweise nicht alle chemischen Varianten löslich. Dies führt zu einer enormen Einschränkung des Formulierungsraums. Daher besteht die Möglichkeit der Forschung zur Entwicklung einer wirksamen Additivchemie, die mit PAGs kompatibel ist.

3. Möglichkeiten der Reibungsleistung

Die PAG-Schmierstoffe wurden mithilfe verschiedener Techniken bewertet, um ein besseres Verständnis der Reibungsleistung unter verschiedenen Schmierbedingungen und des Mechanismus der Reibungsreduzierung zu entwickeln. Dazu gehörten Labortests, die sehr nützlich sind, um den Mechanismus der Reibungsreduzierung durch die Analyse von auf Verschleißoberflächen gebildeten Tribofilmen zu verstehen. Darauf folgen Motorkomponententests, zum Beispiel Ventiltrieb-Reibungstests, Kurbeltrieb-Reibungstests und Vollmotor-Motortests. Der Ventiltriebtest ist wichtig, um die Reibungsleistung vor allem unter gemischten Schmierbedingungen zu verstehen, während der Kurbeltriebtest wichtig ist, um die Reibungsleistung vor allem im hydrodynamischen Schmierbereich zu verstehen. Der vollmotorige Motortest bietet einen umfassenden Überblick über die Reibungsleistung in allen Schmierbereichen.

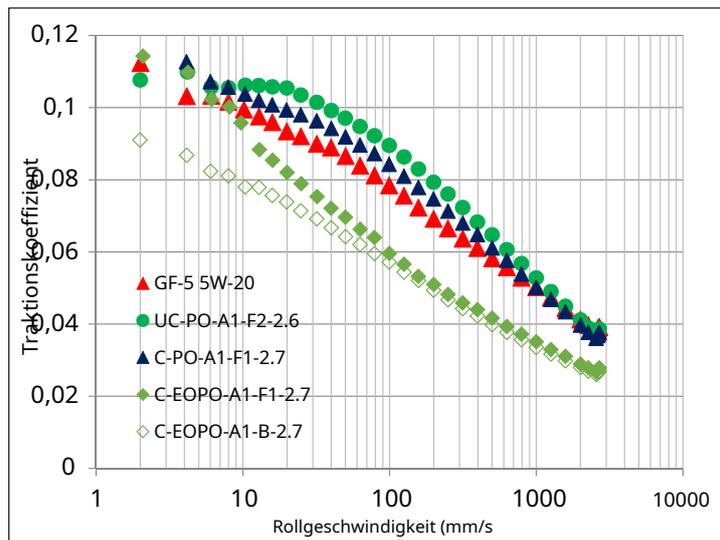
3.1. Auswertungen von Labortests

Die Reibungs- und Verschleißleistung wurde sowohl unter reinen Gleitbedingungen (Grenzschmierung) als auch unter Gleit-/Rollbedingungen (gemischte und hydrodynamische Bedingungen) bei verschiedenen Temperaturen bewertet. Der Einfluss der PAG-Chemie auf den Grenzreibungskoeffizienten und den Verschleiß war ziemlich offensichtlich [10]. Ähnliche Ergebnisse wurden unter gemischten und hydrodynamischen Schmierbedingungen beobachtet, wie in Abbildung dargestellt³. Bei einer niedrigen Temperatur von 40°C, das PAG-Grundöl C-EOPO-A1-B-2.7, zeigte den niedrigsten Traktionskoeffizienten im gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich, seine formulierte Version zeigte jedoch einen Anstieg des Traktionskoeffizienten im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich, wenn die Schmierbedingungen gemischer werden. Der Anstieg des Traktionskoeffizienten mit Additiven wurde schon früher beobachtet [11,12]. Es ist bekannt, dass der Verschleißschutzzusatz Zinkdialkyldithiophosphat, der Waschmittelzusatz und Calciumsulfonat sehr dünne Tribofilme von etwa 80–100 nm bilden. Solche Folien können als Beschichtung auf dem Substrat betrachtet werden. Berechnungen von Liu und Gangopadhyay [13] deuten darauf hin, dass die nachgiebige Beschichtung im Vergleich zur homogenen Halbebene einen schnelleren Anstieg der Unebenheitskontaktflächen aufweist, was zu höheren Traktionskoeffizienten führt. Es kann auch beobachtet werden, dass einige der PAGs im gemischten Schmiermodus höhere und einige niedrigere Traktionskoeffizienten als GF-5 5W-20-Öl aufwiesen. Vergleich dieses Ergebnisses mit denen in Abbildung² weist darauf hin, dass kein direkter Zusammenhang zwischen dem Traktionskoeffizienten (in einem gemischten Schmiermedium) und der kinematischen Viskosität besteht. Die Ergebnisse des Traktionskoeffizienten waren jedoch ganz anders, wenn die Temperatur auf 100°C erhöht wurde, wenn alle PAGs sowohl im gemischten als auch im hydrodynamischen Schmiermedium (bei der höchsten untersuchten Geschwindigkeit) einen niedrigeren Traktionskoeffizienten als GF-5 5W-20-Öl zeigten. Allerdings scheinen die Traktionskoeffizienten bei der Grenzschmierung (in einem niedrigen Geschwindigkeitsbereich) zu konvergieren. Auch hier konnte kein direkter Zusammenhang zwischen dem Traktionskoeffizienten im gemischten Schmiermedium und der kinematischen Viskosität bei dieser Temperatur beobachtet werden. Daher scheint der Unterschied in den Traktionskoeffizienten eher mit der PAG-Chemie zusammenzuhängen.

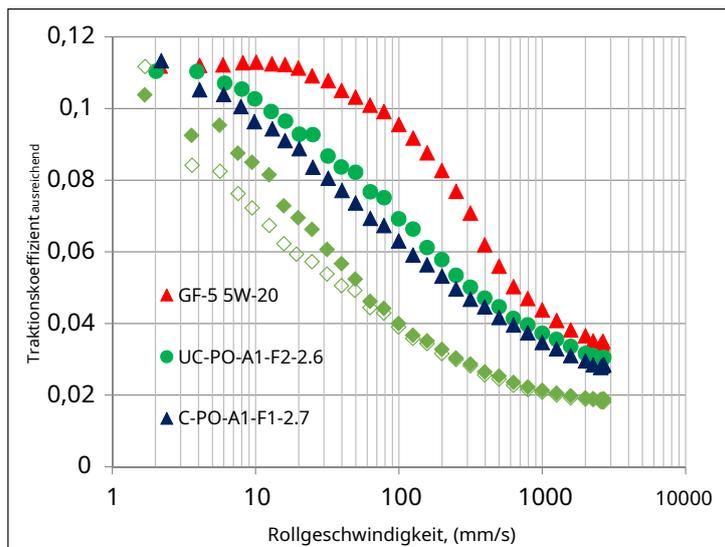
Tribofilmanalyse

Um dies weiter zu untersuchen, wurden die Scheiben nach der Traktionsbewertung mittels ToF-SIMS (Time-of-Flight-Sekundärionenmassenspektroskopie) analysiert. Untersucht wurden Scheiben nach Tests mit mineralischem Grundöl und PAG (beide ohne Zusätze). ToF-SIMS ist eine sehr oberflächenempfindliche Technik, die Informationen über molekulare Fragmente (Chemie) aus der obersten 1-nm-Schicht der Oberfläche ermöglicht. Bereiche innerhalb und außerhalb der Verschleißnarbe wurden untersucht und zur Analyse wurden sowohl positive als auch negative Ionenspektren aufgenommen. Eine Fläche von $100\mu\text{M} \times 100\mu\text{M}$ wurde für jede Akquisition analysiert. Um sicherzustellen, dass die Oberflächensammensetzung durch den Ionenbeschuss nicht verändert wurde (statische SIMS-Bedingungen),

Datenerfassung Die Zeiten waren auf fünf Minuten begrenzt. Die Abnutzungsoberfläche der Scheibe folgt dem **est mit Mineral**
Grundöl zeigte Vorhandensein eines 80 nm dicken Eisenoxidfilms, während die mit PAG-Grundöl t 5 nm aufweist **ed viel dünner**
Oxidfilm, ca (basierend auf Auger- und Röntgen-Photoelektronenspektroskopie-Daten, Ass-Spektren, die von **). Flugzeit**
Sekundärion m Verschleißoberflächen erhalten wurden, die mit mineralischem B A1-B-3.6 erzeugt wurden). in de**Aseöl und PAG**
Grundöl UC-PO- Abbildung dargestellt**4. Klassische Kohlenwasserstofffragmentierung des mineralischen Grundöls****Muster dominiert**
das Spektrum von (Abbildung**4a**) wie erwartet. Ein Muster von Peaks 14 ein Spektrum, das die Masse eines CH **Mu auseinander kann sein**
beobachtet auf der darstellt**z**Kohlenwasserstofffragment, die Basis **c Baustein**
eines Kohlenwasserstoffs Molekül. Im Gegensatz dazu ist das Spektrum (Abbildung**4b**) ist deutlich anders als das Muster von **für die PAG-Basis**
Öl, das zeigt Peaks, die 58 amu voneinander entfernt sind. Dies ist die Masse eines einzelnen XPS (hier nicht gezeigt) **Propylenoxid**
Monomer. Beide und die ToF-SIMS-Ergebnisse deuten darauf hin, dass es sich um einen dünnen Film handelt **des jeweiligen**
Grundöl hat Form mit ed auf der Reibfläche. Ähnliche Ergebnisse wurden erhalten, als scheibenförmiges **s folgende Tests**
vollständiger Formel GF-5 5W-20 und PAG-Öl untersucht wurden. Allerdings ist die **Oberfläche enthalten**
Nachteile von Tribofilmen Verschleißbeständigkeit von Sulfaten und Phosphaten [14].

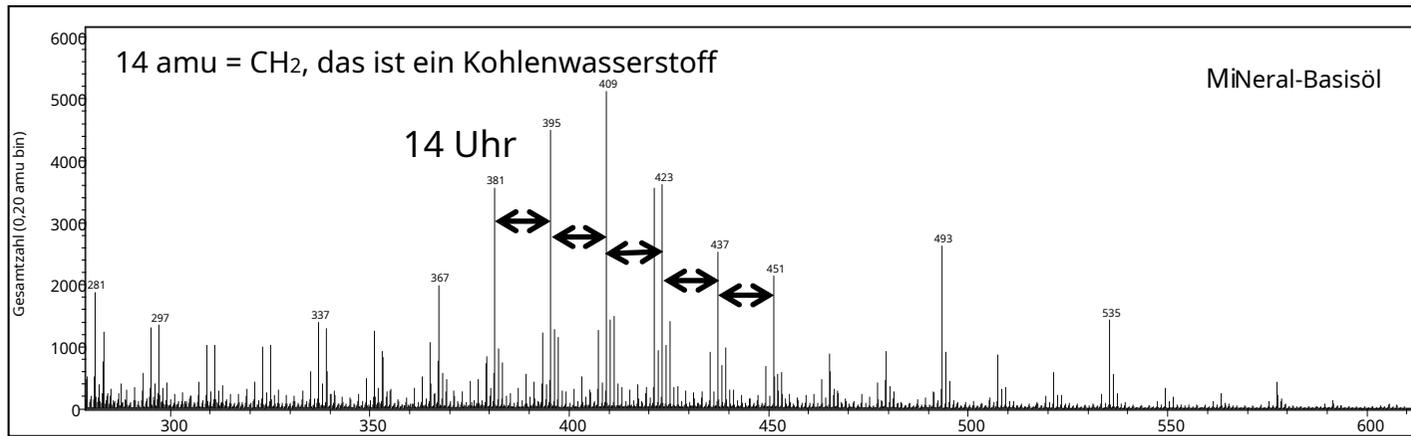


(A)

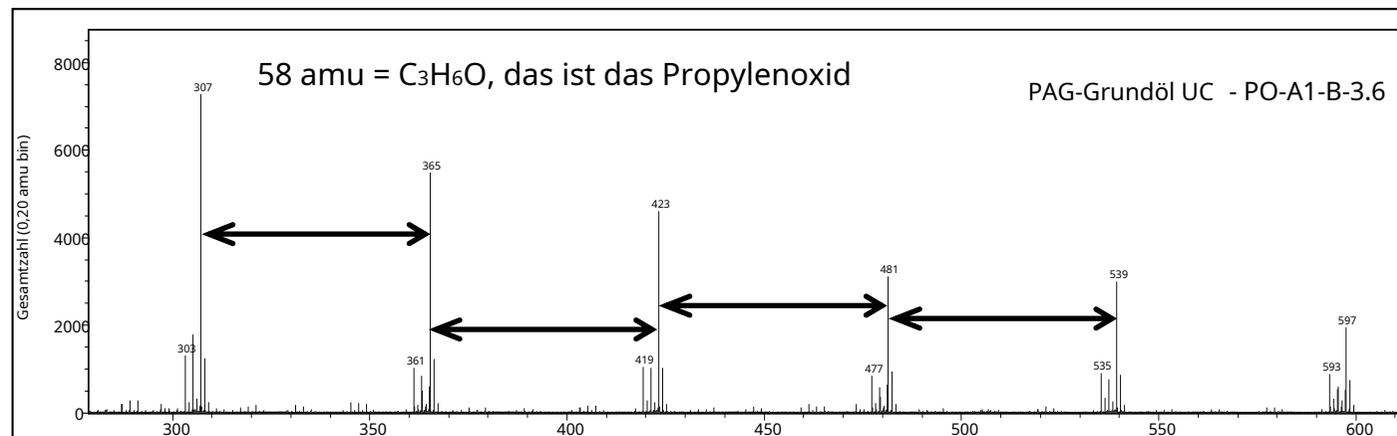


(B)

Figur 3. Traktionskoeffizient als Funktion der mittleren Geschwindigkeit bei (A) 40-C und (B) 100-C-Öl, Temperaturen (Last: 30 N 150 % SRR). Nachdruck mit Genehmigung von [14].



(A)



(B)

Figur 4. Flugzeit-negative (positive) Ionenmassenspektren von Verschleißoberflächen von (A) Mineral und (B) PAG-Öl UC-PO-A1-B-3.6 Grundöle. PAG in einem alkoholinitiierten Propylenoxid-Homopolymer mit einem durchschnittlichen Molekulargewicht von 650 Da. Nachdruck mit Genehmigung von [14].

Die Beobachtung, dass PAG-Moleküle an der Oberfläche adsorbiert werden, ist angesichts ihrer polaren Natur nicht überraschend. In früheren Untersuchungen wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Reibungskoeffizient abnimmt [15,16] aufgrund der Adsorption polarer Endgruppen wie Carboxyl, Ester, Amin usw. auf der Metalloberfläche. Doch kürzlich lieferte die ToF-SIMS-Analyse von auf Verschleißflächen gebildeten Tribofilmen direkte Beweise für die Adsorption einer polaren Esterstruktur in einem Polymethacrylat, einem Viskositätsindexverbesserer, was zu der Schlussfolgerung führte, dass die adsorbierte Spezies den Reibungskoeffizienten verringerte [17]. Einige andere Forscher zeigten mithilfe von ToF-SIMS ebenfalls ähnliche Hinweise auf die Adsorption von Glycerinmonoleat-Reibungsmodifikator auf einer Verschleißoberfläche [18,19]. In der vorliegenden Untersuchung wird davon ausgegangen, dass das Vorhandensein von PAG-Molekülen an der Kontaktfläche zur beobachteten Reibungsreduzierung beiträgt.

3.2. Bewertung der Reibung motorischer Ventiltriebe

Nach Labortests auf dem Prüfstand wurden die Bewertungen auf Motorkomponenten ausgeweitet, um zu untersuchen, ob ähnliche Reibungsreduzierungen nachgewiesen werden konnten. Bei diesem Test wurde eine Nockenwelle im Zylinderkopf (von einem Serienmotor) mit einem Elektromotor gedreht und das Drehmoment zum Drehen wurde von einem Inline-Drehmomentmesser aufgezeichnet. Es wurde eine direkt wirkende Ventiltriebarchitektur verwendet, bei der der Nocken gegen einen flachen Tassenstößel gleitet. Die Nockenwelle wurde von 350 auf 2000 U/min gedreht und der Kontakt arbeitete größtenteils im Mischschmiermodus. Die Einzelheiten des Tests finden Sie an anderer Stelle [10]. Ergebnisse in Abbildung 5 zeigte etwa 50 % fr

Wirkungsreduzierung durch PAG-Formulierungen im Vergleich zum Basisöl GF-5 5W-20 d eed. hängt davon ab
Nockenwelle sp Außerdem hing das Ausmaß der Reibungsreduzierung von den PAG-Formulierungen ab. mit denen Diese Ergebnisse
sind in Linie w ob ermittelt aus Gleit-/Rollversuchen (MTM2). Der Ventiltrieb fr Funktioniert auch bei anderen Auswertungen
wurden dirigiert Temperaturen. Wenn die Reibungsreaktion verschiedener PAG bei gleicher Viskosität gemessen wird Formulierungen
war vergleich (durch Betrachtung der Reibungsdaten bei unterschiedlichen Temperaturen). s), es wurde
Das ist offensichtlich Für die Reibungsreduzierung war vor allem die PAG-Chemie verantwortlich. Als das Bett Tassenstößel
wurden analysiert mithilfe der ToF-SIMS-Technik erstellt wurde, wurde erneut die Anwesenheit von PAG- beobachtet am
Stößeloberfläche Molekülen zusätzlich festgestelltn zu Tribofilmen bestehend aus Phosphaten und Sulfaten, ähnl Hut typischerweise
gefunden mit ar zu t konventionelles Additivpaket [10].

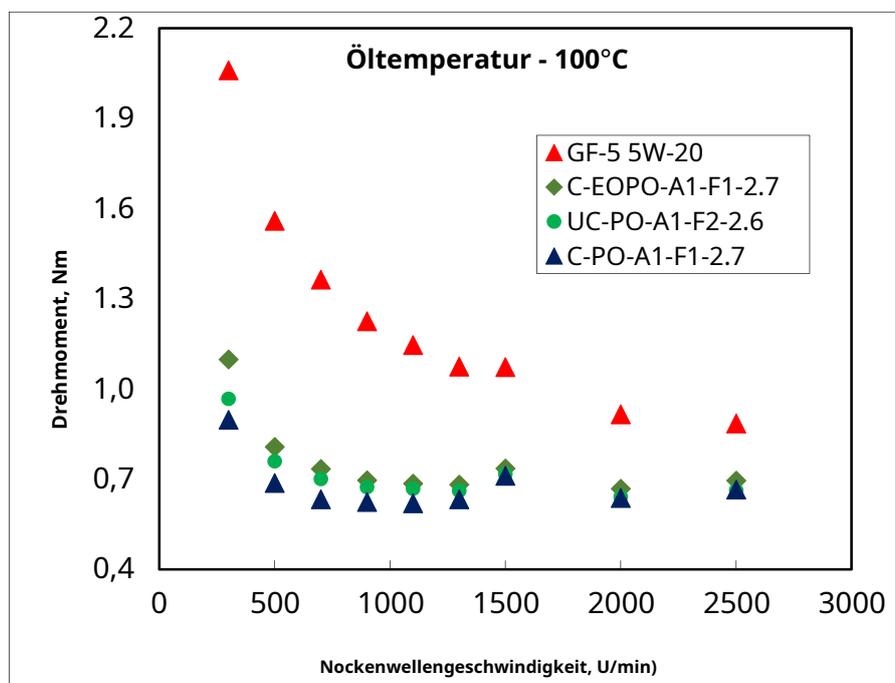


Abbildung 5. Reibungsmoment als Funktion der Nockenwellendrehzahl für verschiedene PAG-Formulierungen bei 100°C Öltemperaturen. Nachdruck mit Genehmigung von [10].

Sander et al. [20] bewertete die Reibung in einem Dieselmotor, der unter Motor- und Druckmotorbedingungen betrieben wurde, und verglich die Ergebnisse zwischen einem vollsynthetischen 0W-20- und einem PAG-Öl (auf Ethylenoxid-Propylenoxid-Basis) bei derselben Hochtemperatur-Hochscherviskosität (HTHS) von 2,6 mPa·s. Mit 90-Bei einer Öltemperatur von C bot PAG-Öl unter Fahrbedingungen eine Reibungsverbesserung von etwa 2–10 %. Unter angetriebenen Druckbedingungen wurde jedoch eine noch höhere Reibungsreduzierung (bis zu 25 % je nach Druckniveau) beobachtet. Darüber hinaus wurde auch die Temperatur des Hauptlagers um mehrere Grad gesenkt.

3.3. Bewertung der Reibung eines motorisierten Kurbeltriebs

Eine der PAG-Formulierungen, C-EOPO-A1-F1-2.7, wurde in einer angetriebenen Kurbeltrieb-Reibanlage bewertet, bei der die Kurbelwelle von einem Motor mit am Kolben befestigter Pleuelstange gedreht wurde. Bei der Hardware handelt es sich um einen aktuellen Serien-Vierzylinder-Motorblock. Daher betrifft dieser Test den Großteil der Reibungselemente in einem Motor, also Haupt- und Pleuellager, Kolbenhemd und Kolbenringe. Figur 6 zeigt den Versuchsaufbau. Die Kurbelwelle wird von einem Elektromotor mit einem eingebauten Drehmomentmesser gedreht. Die Zirkulation des Motoröls im Block erfolgt über eine externe Elektropumpe und einen externen Ölsumpf, der elektrisch beheizt wird. Das Wasser-Glykol-Gemisch wurde im Block auch über eine externe Pumpe und einen externen Sumpf zirkuliert, der elektrisch beheizt ist, um die Temperatur schneller ins Gleichgewicht zu bringen. Der Block wurde eingefahren, indem das Gerät unterschiedlich lange mit 600–4000 U/min betrieben wurde, bis sich die Reibungswerte stabilisiert hatten. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigt eine erhebliche Reibungsreduzierung (6–30 % je nach Geschwindigkeit) bei 100-°C Öltemperatur im Vergleich zu GF-5 SAE 5W-20 Öl. Ähnliche Ergebnisse wurden bei anderen Temperaturen beobachtet.

3.4. Bewertung der Reibung von Motormotoren

Für die Reibungsbewertung wurde ein Reihenvierzylindermotor mit direkt wirkender mechanischer Tassenstößel-Ventiltriebsarchitektur verwendet. Vor den Reibungsmessungen war der Motor eingefahren. Reibungsdaten wurde bei einer Motordrehzahl von 800 bis 5000 U/min gesammelt und Öl zugeführt o der Motor mit einem Ölsumpf. Bei jeder Öltemperatur wurden drei Tests durchgeführt und der Durchschnitt er drei Tests wird berichtet h ermittelt. Die Tests wurden bei Motoröltemperaturen von 39, 79 und 99 °C durchgeführt. Einll drei PAG Öle gezeigt geringeres Reibungsmoment als GF-5 5W-20 Öl bei 99-°C. Die Öltemperatur bei C zeigte, dass dien in Abbildung 8. Die Reibung i Verbesserung bei niedrigeren Geschwindigkeiten in der Nähe des Mischschmierungsregimes hinter Unebenheit Interaktionen höher war. Der Bereich der Reibungsverbesserung lag im Bereich von 0,4 % bis 8 % d hängt davon ab PAG-Öl und Motordrehzahl.



Abbildung 6. Versuchsaufbau für Kurbeltrieb-Reibungsmessungen.

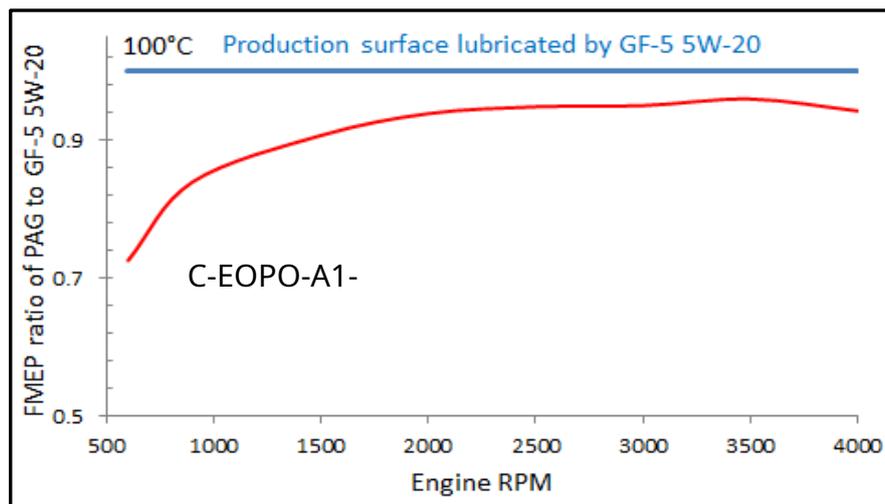
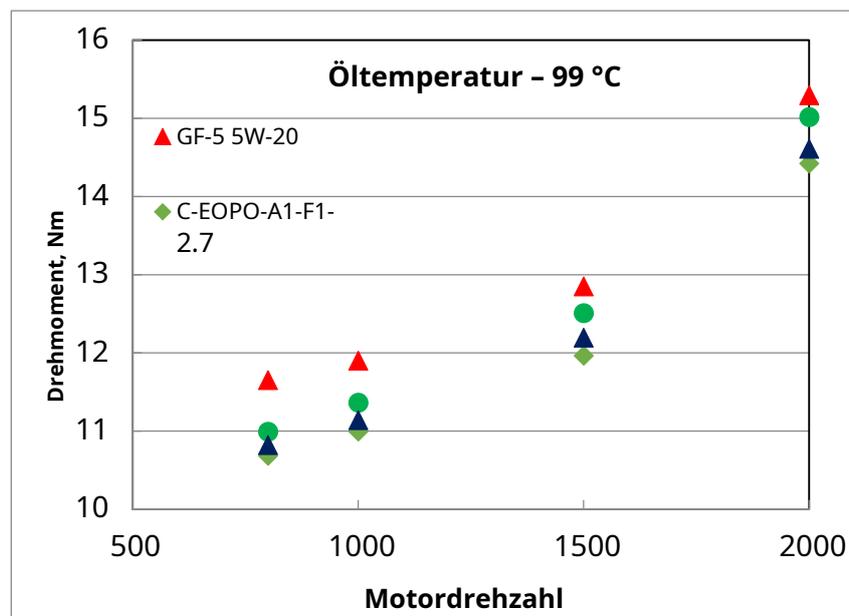


Abbildung 7.F Reibungsdrehmoment als Funktion der Kurbelwellendrehzahl für PAG-Formulierung, C-EOPO-A1-F1-2,7 bei 100°C-Öl Temperatur.



Feige 8. Motorreibung mit verschiedenen PAG-Formulierungen bei 99°C Öltemperatur

3.5. Fahrgestell R Gesamtbewertung des Kraftstoffverbrauchs

Chassis Der Rollkraftstoffverbrauch wurde in einem Fahrzeug mit einem Reihenvierzylinder gemessen und manuelles Getriebe im U-Bahn-Autobahn-Zyklus. Um den Test zu reduzieren, wurde ein Roboterfahrer eingesetzt. Variationen testen. Figur 9 zeigt Kraftstoffverbrauchsdaten innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 %, und das PAG-Öl C-EOPO-A1-F1-2.7 zeigte eine Verbesserung von etwa 1 % gegenüber GF-5 5W-20-Öl. Die Verbesserung könnte mit einer niedrigeren Öltemperatur während dieser Testzyklen zusammenhängen. Die niedrige Öltemperatur zwingt kritische tribologische Kontakte im Motor dazu, in eher gemischten bis hydrodynamischen Schmierbedingungen zu arbeiten, in denen eine niedrigere Viskosität des PAG-Öls Reibungsverluste reduziert. Die Adsorption von PAG-Molekülen kann auch zu geringeren Reibungsverlusten beitragen, da die Kontakte (Nocken und Stößel, Kolbenringe und Laufbuchse usw.) unter Übergangsbedingungen Grenzschmierbedingungen unterliegen. Außerdem weist das PAG-Öl C-EOPO-A1-F1-2.7 bei niedrigeren Temperaturen eine geringere Viskosität auf (siehe Abbildung). 2) aufgrund seines höheren VI-Index im Vergleich zum Öl GF-5 5W-20.

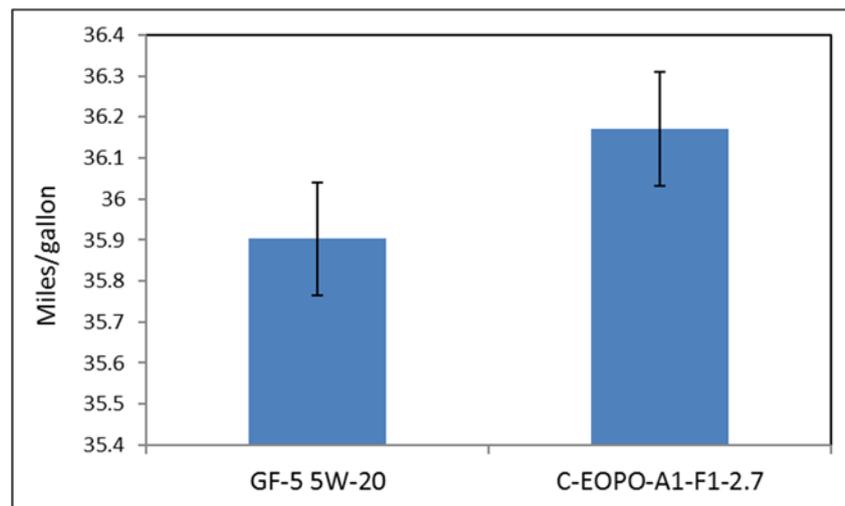


Abbildung 9. Ergebnisse zum Fahrgestell-Rollkraftstoffverbrauch im FTP-Stadtfahrzyklus.

Das Ergebnis Die oben dargelegten Ergebnisse haben deutlich gezeigt, dass PAG-Öle Schmierbedingungen geringere Reibung unter gemischt bieten können und unter Grenzschmierbedingungen liegen können Bedingungen ebenfalls. Dies wurde übersetzt zu geringeren Reibungsverlusten in Nocken- und Stößelkontakten im Ventiltrieb, Cranktrain, Motor, und auch bei der Bewertung der Fahrwerksneigung.

4. Überlegungen zur Haltbarkeit

Die Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs ist sicherlich eines der Hauptziele von Motorölen der nächsten Generation, aber Motoröle müssen auch mehrere andere Leistungsanforderungen erfüllen, z. B. Verschleiß, Schlamm- und Lackbildung, Oxidation usw. Diese werden alle durch Tests auf dem Motorprüfstand über einen längeren Zeitraum bewertet für eine ausreichende Leistung sorgen. Die Leistung von PAG-Öl wurde in diesen Tests wie unten beschrieben bewertet.

4.1. Sequenz IVA-Ventiltriebtest

Dieser Test soll längere Leerlaufbedingungen und die Verschleißschutzfähigkeit bei niedrigen Temperaturen darstellen. Die Öltemperaturen werden bei 50 und 60 °C gehalten und spiegeln typische Fahrbedingungen im Taxi wider [21]. Die Testdauer beträgt 100 Stunden und ist eine Kombination aus zwei Fahrzyklen, die 100 Mal wiederholt werden: Der erste besteht darin, den Motor mit 800 U/min bei 50 U/min laufen zu lassen 50 Minuten bei C, gefolgt von der zweiten bei 1500 U/min bei 60°C für 10 Min. Der Verschleiß der Nockennase wird am Ende des Tests gemeldet. Bewertet wurde das PAG-Öl UC-PO-A1-F2-2.6. Der durchschnittliche Nockenwellenverschleiß wurde mit 1037,36 angegeben μm , was weit über den 90 μm maximal zulässig in der GF-5-Spezifikation. Der Verschleiß war sowohl an den Nocken der Einlass- als auch der Auslassnockenwelle gleichermaßen stark. Alle 25 Stunden entnommene Ölproben zeigten, dass die Zink- und Molybdänkonzentration <50 % ihrer Ausgangswerte betrug, was mit steigenden Eisengehalten in der Flüssigkeit korrespondiert. Dies weist darauf hin, dass die Anti-Verschleiß-Additive nach ca. 50 Stunden erschöpft oder unter eine wirksame Konzentration gesunken waren, was zu einem erhöhten Verschleiß der Nockenwelle führte.

4.2. Sequenz-VG-Test

Die Sequenz VG wurde durchgeführt, um die Fähigkeit von PAG-Ölen zur Kontrolle der Ablagerungsbildung zu bewerten. Hierbei handelt es sich um einen 216-Stunden-Test zur Simulation von Taxi- und Lieferdiensten bei moderaten Temperaturen. Der Test wird in drei Phasen durchgeführt; wobei Stufe 1 120 Minuten lang bei 68 U/min mit 1200 U/min läuft - Öltemperatur, Stufe 2 läuft mit 2900 U/min bei 100°C Öltemperatur beträgt 75 Minuten und Stufe 3 läuft mit 700 U/min bei 45 Minuten - Öltemperatur für 45 Min. Am Ende des Tests werden die Schlammablagerungen auf Kipphebelabdeckungen, Nockenleitblechen, Steuerkettenabdeckung, Ölwanenleitblech, Ölwanne und Ventildecks bewertet. Auch Lackablagerungen werden bewertet

an Kolbenhemden (Schub) und Nockenleitblechen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle aufgeführt². Das PAG-Öl UC-PO-A1-F2-2.6 zeigte gute Ergebnisse bei der Schlamm- und Lackbildung, jedoch nicht bei der Lackbildung. Keines der untersuchten PAG-Öle enthielt ein herkömmliches überbasisches Detergens. Überalkalisierte Reinigungsmittel mit hohem TBN waren in PAG-Flüssigkeiten unlöslich. Ein proprietärer Säurefänger wurde verwendet, um saure Materialien zu neutralisieren, die sich während des Gebrauchs in der Flüssigkeit bildeten [8,9]. Prüfstandstests und einige Motortestdaten legten nahe, dass die nicht verlackenden Eigenschaften von PAG-Ölen ausreichen würden, um die Motorsauberkeit sicherzustellen [22,23].

Tabelle 2. Sequenzieren Sie die VG-Testergebnisse.

Parameter	UC-PO-A1-F2-2.6	GF-5-Grenzwerte
Durchschnittlicher Motorschlamm, Vorzüge	8,76	8,0 Min
Schlamm am Ventildeckel, Vorzüge	9,32	8,3 Min
Durchschnittlicher Motorlack, Vorzüge	8,19	8,9 Min
Durchschnittlicher Lack des Kolbenschafts, Vorzüge	5,17	7,5 Min
Ölsiebschlamm, % Fläche	4,96	15 max
Anzahl der heißgeklebten Ringe	0	Keiner

4.3. Oxidationstest der Sequenz IIIIG

Der Test misst die Motoröxidation (durch Viskositätsanstieg), Kolbenablagerungen und den Verschleiß des Ventiltriebs (Nocken und Stößel). Der Motor läuft bei einer Öltemperatur von 150 °C-C, Last von 94 kW bei 3600 U/min. Sobald der Motor den endgültigen stationären Zustand erreicht hat, wird er 100 Stunden lang betrieben. Alle 25 Stunden werden Ölproben entnommen, um den Viskositätsanstieg zu überwachen. Bei keinem der in der Studie des Energieministeriums bewerteten PAG-basierten Öle wurde ein Sequence-IIIIG-Test durchgeführt. Im Rahmen einer anderen Studie wurde jedoch eine Formulierung unter Verwendung der gleichen PAG-Grundstoffe wie UC-PO-A1-F2-2.6 mit einem modifizierten Antioxidantienpaket bewertet, Ergebnisse in Tabelle 3. Der Anstieg um 33 % im Jahr 40-Die C-Viskosität des Öls lag deutlich unter dem in der GF-5-Spezifikation zulässigen Höchstwert von 150 %. Der Ölverbrauch bei 100 Stunden war mit 1,1 l ebenfalls relativ niedrig. Der Verschleiß an Nocken und Nocken war übermäßig und Kolbenablagerungen waren inakzeptabel, obwohl es keine heiß steckenden Ringe gab. Die Verschleiß- und Ablagerungsergebnisse dieses Tests stimmen mit den Verschleiß- und Ablagerungsergebnissen der Sequenz IVA und VG überein, was darauf hindeutet, dass ein überalkalisiertes Reinigungsmittel und ein verbessertes Anti-Verschleiß-Paket erforderlich sind.

Tisch 3. Ergebnisse des Sequenz-IIIIG-Tests.

Parameter	GF-5-Grenzwerte	
Anstieg der kinematischen Viskosität um 40 °C-C, %	33.5	150 max
Durchschn. gewichtete Kolbeneinlagen, Vorzüge	1,48	4,0 Min
Heiße, festsitzende Ringe	keiner	keiner
Durchschn. Nocken- und Stößelverschleiß,	240.2	60 max
µm Ölverbrauch @ 100 h, L	1.13	Bericht

5. Herausforderungen

Die verschiedenen mit PAG-Ölen durchgeführten Motorprüfstandstests ergaben folgende Herausforderungen.

A. Verschleiß – umfangreiche Labortests zeigten, dass einige der PAG-Öle unter Gleitbedingungen eine gleichwertige oder bessere Leistung als GF-5 5W-20-Öl zeigten [13]. Bei Motorprüfstandstests lag der Verschleißwert jedoch weit über der Bestehensgrenze. Offensichtlich stellte der Prüfstandstest keine Motorbetriebsbedingungen dar. Neben vielen Unterschieden zwischen Prüfstand- und Motortestbedingungen – wie Probenmetallurgie, Last, Geschwindigkeit usw. – wurde der Effekt der Ölalterung während des Motortests in Prüfstandstests nicht erfasst. Daher sollten sich die Bemühungen bei der Entwicklung von Prüfstandstests darauf konzentrieren. Diese Tests verdeutlichten auch die Notwendigkeit, ein geeignetes Anti-Verschleiß-Additiv für PAG-Öl zu entwickeln. Ein aktuelles Papier [24] ging dieses Problem an und entwickelte ein Anti-Verschleiß-Additiv mit

- verbesserte Verschleißleistung basierend auf Pin-on-Ve-Tests. Es bleibt abzuwarten, wie sich dieses Additiv im Motorprüfstandtest schlägt.
- B. Oxidation – Antioxidationspakete für PAG-basierte Öle können optimiert werden, um die Oxidationsleistung in Motorprüfstandtests zu verbessern, wie im Sequence IIIG-Test gezeigt. Der Einfluss von Antioxidantien auf andere Additive, wie z. B. Anti-Verschleiß-Additive und Ablagerungen, sollte in jeden Versuchsaufbau einbezogen werden.
- C. Schlamm und Lack: Die bewerteten Flüssigkeiten auf PAG-Basis enthielten keine Dispergiermittel oder überalkalisierten Detergenzien. Ein optimiertes Antioxidantienpaket wird wahrscheinlich die Lackbildung reduzieren. Dispergiermittel auf Basis von Polyisobutylen succinimiden (PIBSA) sind nicht mit Ölen auf PAG-Basis kompatibel. Andere Dispergiermittelchemien, beispielsweise solche auf Basis von Epoxidaminalkoxylaten [25] oder andere Chemikalien sollten evaluiert werden, um die Schlamm- und Rußverteilung zu verbessern.
- D. Löslichkeit/Kompatibilität von Additiven – Die Unlöslichkeit überalkalisierter Detergenzien in Ölen auf PAG-Basis bleibt eine Herausforderung bei der Formulierung dieser Flüssigkeiten. Überbasische Reinigungsmittel sorgen für Alkalität zur Neutralisierung saurer Zersetzungs- und Verbrennungsverbindungen und verhindern die Bildung von Ablagerungen, indem sie neutralisierte Salze und andere polare Einheiten im Öl suspendieren. Die Kontrolle von sauren Abbauprodukten in Flüssigkeiten auf PAG-Basis kann durch andere Mittel erreicht werden, beispielsweise durch den proprietären Säurefänger, der in den in diesem Bericht untersuchten Flüssigkeiten zu finden ist. Der Säurefänger trägt jedoch kaum dazu bei, die Bildung von Ablagerungen, insbesondere im Ring- und Stegbereich von Kolben, zu verhindern. Es ist nicht offensichtlich, dass herkömmliche Reinigungsmittel, die dazu dienen, polare Verbindungen in relativ unpolaren Ölen zu suspendieren, überhaupt für Öle auf PAG-Basis geeignet sind.
- E. Mischbarkeit mit Mineralölen – PAG-Öle sind bei Raumtemperatur nicht vollständig (ca. 80 %) mit Mineralöl mischbar, was zur Bildung von zwei Schichten führt; Die schwerere PAG-Schicht liegt unter der Mineralölschicht. Dies könnte beim Ölwechsel ein Problem darstellen, wenn eine vorhandene mineralölbasierte Formulierung durch eine PAG-basierte Formulierung ersetzt wird, da das vorhandene Öl auch bei einem Filterwechsel nicht vollständig abgelassen werden kann. Die Additivkomponenten im im Motor verbleibenden Öl könnten sich negativ auf die PAG-Formulierung auswirken.

6. Alternative Lösungen

Eine alternative Lösung könnte die Verwendung von öllöslichem PAG (OSP) in der Formulierung sein, allerdings würden viele der gleichen Probleme mit der Löslichkeit von Additiven bestehen bleiben. Die Reibungsleistung von OSP wurde untersucht, jedoch nicht im Detail. Die Reibungsergebnisse bei Tests mit motorisierten Ventiltrieben und motorisierten Motoren waren ermutigend, lagen jedoch unter denen, die bei anderen PAG-Chemikalien beobachtet wurden. Weitere Arbeiten sind erforderlich. Eine weitere mögliche Lösung ist die gleichzeitige Basierung von OSP mit Mineralöl. Diese Strategie könnte möglicherweise viele Herausforderungen angehen, einschließlich der Löslichkeit von Additiven, der Mischbarkeit und der Dichtungskompatibilität. Vorarbeiten [23] weist darauf hin, dass herkömmliche Additivpakete mit Gruppe III + OSP-Mischungen kompatibel sind und gleichzeitig die Reibungsleistung gegenüber Ölen nur der Gruppe III verbessern. Offensichtlich besteht die Notwendigkeit, die optimale OSP-Konzentration zu definieren und die Additivpakete zu optimieren, um die potenziellen Vorteile von OSP nutzen zu können.

Diese Untersuchung ergab, dass Motoröle auf PAG-Basis ermutigende Vorteile beim Kraftstoffverbrauch bieten können, wie verschiedene Bewertungsmethoden belegen. Diese Untersuchung ergab auch erhebliche Herausforderungen im Zusammenhang mit Verschleiß, Oxidation und Lackbildung, die weitere Untersuchungen erfordern, um geeignete Additivkomponenten zu identifizieren oder neue zu entwickeln.

Finanzierung: Diese Forschung wurde mehrheitlich vom Energieministerium unter der Fördernummer (DE-EE0005388) finanziert.

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

Verweise

1. Kiovsky, TE; Yates, NC; Bales, JR Kraftstoffeffiziente Schmierstoffe und die Wirkung spezieller Grundöle. *Lubr. Ing.* **1994**, *4*, 307–312.
2. Igarashi, J.; Kagaya, M.; Satoh, T.; Nagashima, T. Erdölgrundstoffe mit hohem Viskositätsindex – Die Grundstoffe mit hohem Potenzial für kraftstoffsparende Automobilschmierstoffe. SAE-Papiernummer 920659. *J. Fuels Lubr.* **1992**. [[CrossRef](#)]
3. Sweatt, CH; Langer, TW Einige Industrieerfahrungen mit synthetischen Schmierstoffen. *Mech. Ing.* **1951**, *73*, 469–476.
4. Fitamen, E.; Tiquet, L.; Woydt, M. Validierung der oxidativen Stabilität von Werksfüll- und alternativen Motorölen unter Verwendung der eisenkatalysierten Oxidation. *J. ASTM Int.* **2007**, *4*, 1–6. [[CrossRef](#)]
5. Woydt, M.; Kelling, N.; Hannemann, F.; Berberich, N.; Ziegele, H. Stribeck-Kurven alternativer Motorenöle, Teil I: Grauguss-Laufbuchsen. *Mater. Ausführen. Charakter.* **2014**, *3*, 204–215. [[CrossRef](#)]
6. Woydt, M. Polyalkylenglykole als Motorenöle der nächsten Generation. *J. ASTM Int.* **2011**, *8*, 1–15. [[CrossRef](#)]
7. Greaves, M.; Topolovec Miklozic, K. Filmbildungsverhalten öllöslicher Polyalkylenglykole. *Ind. Lubr. Tribol.* **2015**, *67*, 133–138. [[CrossRef](#)]
8. Meertens, M.; Van Voorst, R.; Zweifel, D. Schmiermittelzusammensetzungen aus Polyalkylenglykoldiether mit geringer Noack-Flüchtigkeit. 2012. Zapfwelle WO2012US28760A. Online verfügbar: <https://patents.google.com/patent/CN103842488A/en> (abgerufen am 12. März 2012).
9. Thoen, JA; Woydt, M.; Zweifel, D.; Zweifel, DF Polyalkylenglykol-Schmiermittelzusammensetzung. US-Patent US8592357B2, 26. November 2013.
10. Gangopadhyay, AK; McWatt, DG; Zdrodowski, RJ; Simko, SJ; Peczonczyk, SL Ventiltrieb-Reibung und Verschleißverhalten von Polyalkylenglykol-Motorölen. *Tribol. Trans.* **2018**, *61*, 133–143. [[CrossRef](#)]
11. Taylor, L.; Dratva, A.; Spikes, HA-Reibung und Verschleißverhalten des Zinkdialkyldithiophosphat-Additivs. *STLE Tribol. Trans.* **2000**, *43*, 469–479. [[CrossRef](#)]
12. Taylor, LJ; Spikes, HA Reibungsverbessernde Eigenschaften des ZDDP-Verschleißschutzadditivs: Teil I – Reibung und Morphologie von ZDDP-Reaktionsfilmen. *STLE Tribol. Trans.* **2003**, *46*, 303–309. [[CrossRef](#)]
13. Liu, Z.; Gangopadhyay, A. Reibungsreduzierung bei geschmierten rauen Kontakten: Numerische und experimentelle Studien. *ASME J. Tribol.* **2016**, *138*, 021506. [[CrossRef](#)]
14. Gangopadhyay, A.; Liu, Z.; Simko, SJ; Peczonczyk, SL; Cuthbert, JB; Hock, ED; Erdemir, A.; Ramirez, G. Reibungs- und Verschleißminderungsmechanismus von Motorölen auf Polyalkylenglykolbasis. *Tribol. Trans.* **2018**, *61*, 621–631. [[CrossRef](#)]
15. Hardy, WB; Doubleday, I. Grenzschmierung – Die Paraffinreihe. *Proz. R. Soc. A* **1921**, *100*, 35–374. [[CrossRef](#)]
16. Levine, O.; Zisman, WA Physikalische Eigenschaften von an der Feststoff-Luft-Grenzfläche adsorbierten Monoschichten I. Mechanische Haltbarkeit aliphatischer polarer Verbindungen und Wirkung der Halogenierung. *J. Phys. Chem.* **1957**, *61*, 1188–1195. [[CrossRef](#)]
17. Tohyama, M.; Ohmuri, T.; Murase, A.; Masuko, M. Reibungsreduzierende Wirkung eines mehrfach adsorbierenden organischen Polymers. *Tribol. Int.* **2009**, *42*, 926–933. [[CrossRef](#)]
18. Murase, A.; Ohmuri, T. ToF-SIMS-Studie zum Adsorptionsverhalten einer Mischung aus Phosphit und einem Reibungsmodifikator auf Eisenmaterial. *Appl. Surfen. Wissenschaft.* **2003**, *203–204*, 586–589. [[CrossRef](#)]
19. Kano, M.; Yasuda, Y.; Okamoto, Y.; Mabuchi, Y.; Hamada, T.; Ueno, T.; Ye, J.; Konishi, S.; Takeshima, S.; Martin, JM; et al. Extrem niedrige Reibung von DLC in Gegenwart von Glycerinmonooleat (GMO). *Tribol. Lett.* **2005**, *18*, 245–251. [[CrossRef](#)]
20. Sander, DE; Knauder, C.; Allmaier, H.; Baleur, SD; Mallet, P. Reibungsreduzierung für einen verkleinerten Dieselmotor mit niedrigviskosen Schmiermitteln, darunter ein neuartiges Polyalkylenglykol, getestet. *Schmierstoffe* **2017**, *5*, 9. [[CrossRef](#)]
21. Sagawa, T.; Nakamura, K.; Buscher, W.; Bendele, LM Entwicklung des Sequenz-IVA-Ventiltrieb-Schmiermitteltests: Teil 1, SAE-Papier Nr. 2000-01-1820. *SAGE Trans. J. Fuels Lubr.* **2000**. [[CrossRef](#)]
22. Woydt, M. No/Low SAP und alternative Motoröle-Entwicklung und -tests. *J. ASTM Int.* **2007**, *4*. [[CrossRef](#)]
23. Merryweather, S.; Zweifel, D.; Woydt, M. Kraftstoffverbrauch durch Motorenöle auf Basis von Polyalkylenglykolen. In Proceedings of the 18th International Colloquium Tribology, TAE Esslingen, Ostfildern, Deutschland, 10.–12. Januar 2012.

24. Obrecht, N.; Champaign, N.; Gangopadhyay, A.; Zdrodowski, RJ; Liu, Z. Verbesserte Verschleißschutzleistung durch innovatives Grundöl in Motoröl mit niedriger Viskosität. SAE-Papiernummer 2017-01-2343. *SAGE Trans. J. Fuels Lubr.* **2017**. [[CrossRef](#)]
25. Pierre, C.; König, SW; Aguilar, DA; Jazdzewski, BA; Cuthbert, JB; Elowe, PR; Bharadwaj, AR Aminalkoxylat-Zusammensetzungen und ihre Verwendung als Schmierstoffadditive. US-Patent US9822324B2, 21. November 2017.



© 2018 bei 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 (CC BY)-Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) verbreitet wird.