

Dokument heruntergeladen von:

<http://hdl.handle.net/10251/81807>

Dieses Papier muss zitiert werden als:

Macian Martinez, V.; Tormos Martinez, BV.; Ruiz Rosales, S.; Miró Mezquita, G. (2016). Niedrigviskose Motorenöle: Untersuchung von Verschleißeffekten und Ölschlüsselparametern in einem Schwerlastmotoren-Flottentest. *Tribologie International*. 94:240-248. doi:10.1016/j.triboint.2015.08.028.



Die endgültige Veröffentlichung ist erhältlich unter

<http://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.028>

Urheberrechte ©Elsevier

Weitere Informationen

Niedrigviskose Motorenöle: Untersuchung von Verschleißeffekten und Ölschlüsselparametern in einem Heavy-Duty-Motoren-Flottentest

Vicente Macian¹, Bernardo Tormos¹, Santiago Ruiz¹, und Guillermo Miró¹(*)

¹CMT-Motores Termicos, UPV

(*)guimimez@mot.upv.es

Adresse: Universitat Politècnica de Valencia, Camí de Vera, s/n, 46022 Valencia (Spanien)

Abstrakt

Motoröle mit niedriger Viskosität (LVO) gelten als Schlüsselfaktoren zur Verbesserung der Kraftstoffeffizienz in Verbrennungsmotoren (ICE). In Anbetracht dessen, dass die Verwendung von LVO eine Variation der in Verbrennungsmotoren gefundenen tribologischen Zustände implizieren könnte, ist das Ziel dieser Arbeit, LVO in einer realen Flotte zu testen, mit Schwerpunkt auf Motorverschleiß und Schlüsselleistungsindikatoren des Öls.

Dieser Test umfasste 39 Busse, zwei Motortechnologien und vier verschiedene Schmierstoffe. Für jede Probe wurde neben anderen Eigenschaften die elementare Zusammensetzung des Abriebs durch ICP-AES und die HTHS-Viskosität des Öls gemessen.

Die Ergebnisse zeigten, dass es bei korrekter Ölformulierung keinen signifikanten Unterschied bei der Verwendung von LVO in Bezug auf Motorverschleiß, HTHS-Viskositätsschwankung und Ölverbrauch gibt.

Abkürzungsverzeichnis

LVO	Öl mit niedriger Viskosität
EIS	Verbrennungsmotor
CNG	Komprimiertes Erdgas
ICP-AES	Atomemissionsspektrometrie durch induktiv gekoppeltes Plasma
HTHS	Hohe Temperatur – Hohe Scherung
SIE	Funkengezündeter Motor
CIE	Motor mit Kompressionszündung
ACEA	Verband der europäischen Automobilhersteller
HDV	Schwerlastfahrzeuge
ODI	Ölwechselintervall
OHC	Obenliegende Nockenwelle
SAE	Gesellschaft der Automobilingenieure
Erstausrüster	Erstausrüster
Damhirschkuh	Versuchsplanung
AGR	Abgasrückführung
U/min	Revolutionen pro Minute
TBN	Gesamtbasiszahl
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
FT-IR	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie

1. Einleitung

Während der Entwicklung alternativer Verbrennungsmotoren (ICE) war eines der am meisten untersuchten Themen die Verbesserung der Motoreffizienz; in den frühen Anfängen, um seine Leistung zu verbessern, und in jüngerer Zeit, um den Kraftstoffverbrauch zu minimieren und die negativen Auswirkungen der Abgase auf die Umwelt zu reduzieren. Diese Entwicklungsarbeit wurde unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt[1]; erstens basierend auf der Optimierung der thermodynamischen und strömungsmechanischen Prozesse zur Erhöhung der indizierten Leistung (dh der Arbeitsübertragungsrate vom Gas im Zylinder zum Kolben[2]), und zweitens basierend auf der Erhöhung der Motormechanik Effizienz durch Reduzierung mechanischer Verluste.

Im Großen und Ganzen beträgt bei einem unter normalen Bedingungen arbeitenden Schwerlastfahrzeug der Prozentsatz der Energie, die vom Potenzial im Kraftstoff auf die Räder übertragen wird, nur etwa 15 % bis 20 % [3], wie in Abbildung 1 zu sehen ist.

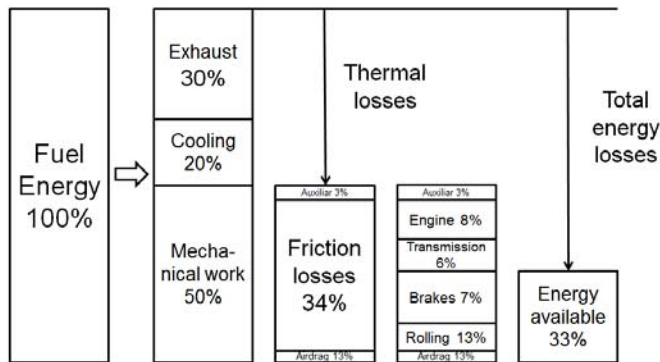


Abbildung 1. Diagramm einer typischen Energieverteilung in einem durchschnittlichen Schwerlastfahrzeug. Angepasst von [3].

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die innermotorische Reibung bis zu 50 % der mechanischen Verluste in Verbrennungsmotoren ausmachen kann [4], ist dies ein Zielbereich für einen potenziellen Beitrag zur Kraftstoffeinsparung. Es wurde eine breite Palette von Strategien definiert, die sich auf die Reduzierung der mechanischen Verluste von ICE konzentrieren, darunter: die Konstruktion und Herstellung leichterer Teile und die Verwendung nichtmetallischer Materialien [5], Verbesserungen bei Oberflächenbeschichtungen und verwandten Technologien [6], Motor-Downsizing [7] und die Verwendung von Leichtlaufölen u.a. [8], [9].

Die Verwendung von Ölen mit niedriger Viskosität begann vor mehr als 40 Jahren [10], um Reibungsverluste zu reduzieren, und seitdem wurden mehrere Studien sowohl bei Ottomotoren (SIE) als auch bei Selbstzündungsmotoren (CIE) durchgeführt. Die durchschnittliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs in Prüfstandsstudien lag zwischen 1 % und 4 %, abhängig von verschiedenen Faktoren wie Motorbetriebspunkten, verwendeten Ölformulierungen (insbesondere berücksichtigte Viskositätsklassen und Additivpakete) und Öltemperaturen usw. [11], [12]. All dieses Wissen führte zu einem beständigen Trend zur Verringerung der durchschnittlichen Viskosität von Schmiermitteln, wie bei Covitch et al. [13].

Da das Hauptziel dieser Untersuchungen darin bestand, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren und folglich das Emissionsniveau zu minimieren, um die strengen Anforderungen zu erfüllen, wurde der überwiegende Teil dieser Forschung auf Pkw-Motoren angewendet. Die Association of European Automobile Manufacturers (ACEA), die Organisation, die die Standards der europäischen Automobilindustrie definiert, hat bis heute noch keinen Nachweis der Kraftstoffersparnis für Diesellole für schwere Nutzfahrzeuge (HDV) definiert [14], obwohl dies der Fall ist voraussichtlich in naher Zukunft nach ähnlichen Trends in anderen Märkten weltweit ändern. Da sich Kraftstoffeinsparung als beständiger Trend erwiesen hat und zukünftige Beschränkungen des Kraftstoffverbrauchs für Fahrzeuge des mittleren und schweren Segments erwartet werden, Niedrigviskose Schmieröle stellen eine unwiderstehliche Chance dar, da das gute Verhältnis der Umsetzungskosten zu den geschätzten Einsparungen [10] führt, die zu einem erheblichen Teil der gesetzlich vorgeschriebenen endgültigen Prozentsätze beitragen können. Da es nur wenige Informationen über die Leistung von Ölen mit niedriger Viskosität in HDV [15] gibt und hauptsächlich in Prüfständen untersucht wurde [16], wurde ein umfassender Test in Angriff genommen, um alle in Prüfstandsexperimenten eingeführten Hypothesen sicherzustellen und zu validieren.

Auf der anderen Seite gibt es ein Gegenstück zur Verwendung von Ölen mit niedriger Viskosität in ICE. Eine direkte Folge der Viskositätsreduzierung im gesamten Temperaturbereich impliziert a

direkte Verringerung der Filmdicke [17], und dies kann an einigen Kontakten zu erhöhter Reibung und sogar lokal zu erhöhten Verschleißraten führen, wenn die Ölfilmdicke so dünn wird, dass lokale Unebenheitskontakte möglich sind. Diese Situation könnte auch zu einer Verkürzung der Triebwerkslebensdauer und damit zu einer Zunahme von Wartungsarbeiten und einer Verringerung der tribologischen Leistung und der potenziellen Kraftstoffeinsparung des Verbrennungsmotors führen. Aus all diesen Gründen wurde diese Studie auch durchgeführt, um die potenziellen Auswirkungen zu bewerten, die die Verwendung von Schmierölen mit niedriger Viskosität auf die Verschleißphänomene dieser Motoren haben kann, und um die Auswirkungen auf die Ölleistung entlang des Ölwechselintervalls (ODI) zu untersuchen.

Die in diesem Artikel vorgestellte Arbeit ist Teil einer umfassenderen Studie, deren Hauptziel darin bestand, den Kraftstoffverbrauch dieser niedrigviskosen Öle unter realen Bedingungen zu verifizieren und zu quantifizieren. Nach einer prägnanten und strukturierten Arbeit zeigten die Ergebnisse klare Vorteile in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch, wie in [18] festgestellt.

2. Tribologie und Verschleiß im Zusammenhang mit niedrigviskosen Ölen

Motortribologie ist seit jeher ein wichtiges Studienfach in der Automobilindustrie. Von Anfang an [19] war ein wichtiges Verständnis der Tribologie notwendig, um alle mechanischen Anforderungen in der ICE zu bewältigen. Die wichtigsten tribologischen Systeme, die in einem Verbrennungsmotor vorhanden sind, umfassen drei Hauptbereiche: Kolbenringpaketsystem, Gleitlager und Ventiltriebssystem [2]. Die 1902 entwickelte Stribeck-Kurve erklärt die Flüssigkeitsfilmschmierung und definiert die wichtigsten Schmierungsregime, die in den oben dargestellten tribologischen Systemen vorhanden sind. Die Stribeck-Kurve, definiert durch den Hersey-Parameter, der Schmiermittlviskosität, Geschwindigkeit und Kontaktnormaldruck berücksichtigt, ist in Abbildung 2 dargestellt und konzentriert sich auf die zuvor erwähnten motortribologischen Paare.

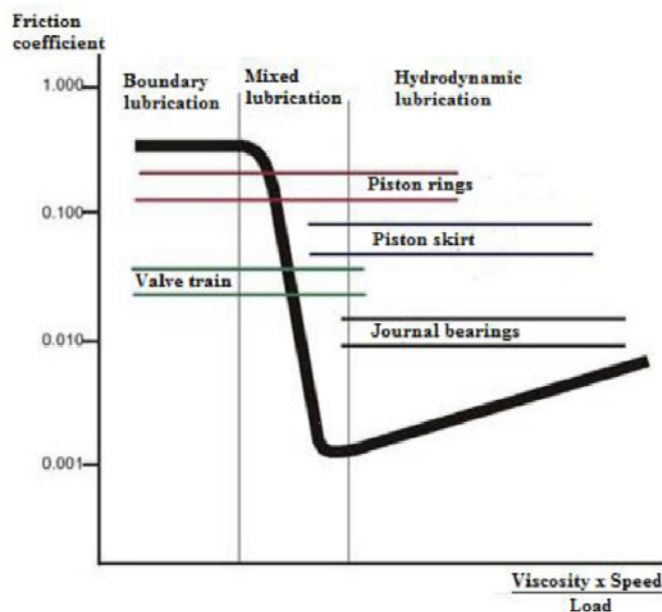


Abbildung 2. Stribeck-Kurve und typische Schmiersysteme an tribologischen Hauptmotorpaaren. Angepasst von [1].

Jedes der tribologischen ICE-Paare arbeitet in unterschiedlichen Bereichen, wie in der Abbildung oben gezeigt. Das tribologische Hauptsystem und das am besten untersuchte [20] umfasst die Reibung zwischen Laufbuchse und Ringpaket und weist die unterschiedlichsten und strengsten Randbedingungen auf; die unterschiedlichen Betriebsparameter während des gesamten Zyklus führen dazu, dass dieses System in jedem Zyklus die große Mehrheit der Stribeck-Kurve weitgehend abdeckt, wie unter anderem in der Arbeit von Ting [21] gezeigt. Auch der Schmierfilm wird in jedem Zyklus wiederhergestellt, somit dieser

könnte als ein offener Schmierkreislauf betrachtet werden, bei dem der Film vollständig erlischt und das Öl ständig erneuert wird [22]. Da andererseits der tribologische Betriebsbereich von Gleitlagern eingeschränkter ist, sind sie speziell für den hydrodynamischen Bereich mit reduziertem Reibungskoeffizienten und Verschleißverhalten ausgelegt [23], [24]. Da die Tribologie von Gleitlagern eines der fortschrittlichsten Forschungsthemen auf diesem Gebiet ist, liefert die Anwendung der elasto-hydrodynamischen Theorie genauere Ergebnisse zur Vorhersage von Lagerreibung und -verschleiß [25], [26].

Schließlich stellt das Ventiltriebssystem ein völlig entgegengesetztes tribologisches Verhalten zu den anderen Paaren dar, wobei die Misch- und Grenzschmierung vorherrschen [10], [27]. Die technischen Entwicklungen bei Ventiltrieben, z. B. der obenliegenden Nockenwelle (OHC), haben die Schmierung dieses tribologischen Kontakts zu einem schwierigen Thema gemacht [28]–[30]. Der relative Abstand und die Kontaktmorphologie weisen spezifische Eigenschaften auf, was zu einer weniger wichtigen Rolle der Schmiermittelviskosität führt [31]. Außerdem wurden jüngste Entwicklungen durchgeführt, um diese Phänomene zu reduzieren, mit der Anwendung eines Rollenfolgesystems [32] und mit der Entwicklung von Ölformulierungen mit speziell dafür vorgesehenen Additiven [33], [34].

Aber das Erscheinen von LVO änderte dieses ganze Szenario. Zusammen mit anderen oben erwähnten Lösungen hat die Philosophie und die Verwendung von LVO Motorhersteller und Öl- und Additivformulierer dazu veranlasst, ihre Produkte zu verbessern, um strenge Anforderungen an Emissionen und Kraftstoffverbrauch zu erfüllen.

Obwohl die Verwendung von LVO zur Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs von Motoren kein neuer Trend ist [35], wurde sie in den letzten Jahren als notwendiger und konsequenter Lösungsbeitrag akzeptiert. In den 90er Jahren wurden hauptsächlich Öle mit der Klassifizierung SAE 10W40 und 15W40 verwendet, die jedoch in den letzten Jahren nach und nach von SAE 10W30 und 5W30 verdrängt wurden. Heutzutage verlangen die meisten OEMs Service-Füllöle der Klasse SAE 5W30 im leichten Segment. Im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts tauchten Öle mit sehr niedriger Viskosität auf, und es ist auf dem japanischen Markt üblich, Autos zu finden, die SAE 5W20 verwenden. Demnach hat SAE seine Motoröl-Viskositätsklassifizierung neu definiert [36], um diesem Trend gerecht zu werden, einschließlich in den letzten zwei Jahren drei neue SAE-Klassen mit niedrigerer Viskosität, und es einigen Motorenherstellern, insbesondere asiatischen, ermöglicht,

Es wurden einige Untersuchungen durchgeführt, um die Konsequenzen der Verwendung von LVO vollständig zu definieren, insbesondere im Hinblick auf die Auswirkung der Viskositätsreduzierung auf die Filmdicke an Tribokontakten im Motor. Traditionell wurde die kinematische Viskosität von Motorölen bei Standardtemperaturen von 40 °C und 100 °C und atmosphärischem Druck gemessen, aber diese Messung ist nicht repräsentativ für das innere Verhalten des Schmiermittels im Motor. Da moderne Mehrbereichsschmierstoffe eine nicht Newtonsche Flüssigkeitsleistung aufweisen, bei der Scherspannung und lokale Temperaturen sich direkt auf die Viskosität auswirken, ist eine andere dynamische Viskositätsmessung bei 150 °C und 10^{-6} S-1 definiert, die als Hochtemperatur-Hochscherviskosität (HTHS) bezeichnet wird [39]. Dieser Parameter wurde als Schlüsselparameter angesprochen, um den Kraftstoffverbrauchseffekt durch LVO in Verbrennungsmotoren genauer zu korrelieren [15], [40], wurde aber auch verwendet, um Verschleißphänomene bei der Verwendung von LVO zu charakterisieren [16], [41]–[43].

Über die reale Leistung von LVO, insbesondere bei Hochleistungsmotoren, sind nur eingeschränkte Informationen verfügbar. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Verwendung von Ölen mit niedriger Viskosität hängt mit den Auswirkungen des Ölverbrauchs im Motor zusammen. Der Ölverbrauch hat zwei Hauptursachen, den Blow-by-Effekt [44] und die Zylinderlaufbuchsen-Kolbenring-Dynamik [45], da der Schmierstoff für die Abdichtung des Brennraums im Expansionszyklus verantwortlich ist. Eine Variation dieser Viskosität könnte zu einem Anstieg des Ölverbrauchs führen, wie von Carden et al. [16].

Da Hochleistungsmotoren ein differenziertes Motorsegment mit unterschiedlichen Verschleißmustern und Konfigurationen darstellen [46], war es notwendig, einen Flottentest unter realen Bedingungen zu entwickeln, um den tatsächlichen Beitrag der LVO-Nutzung zum Motorverschleiß und mögliche Auswirkungen auf abgeleitete Motoren zu bewerten. Haltbarkeit und helfen Formulierern und OEMs, die Auswirkungen dieser Lösung auf das eigene Motoröl und den Motor vollständig zu verstehen.

3. Design und Einstellungen testen

Um einen vollständigen und wertvollen Test zu entwickeln, wurde ein vorheriges Full-Scale Design of Experiments (DoE) definiert, einschließlich der Auswahl von Fahrzeugen, Ölen und Betriebsbedingungen. Allerdings konnte die gesamte im DoE enthaltene Vielfalt aufgrund von Flottenbetreiberbeschränkungen und ICE-Herstellerspezifikationen nicht unter realen Bedingungen entwickelt werden. Trotz dieser Tatsache wurde der Test mit zwei sich ergänzenden Kriterien entwickelt: Es war zwingend erforderlich, so viele Daten wie möglich zu haben, da Tests in der realen Welt viele Variabilitätsphänomene beinhalten. Andererseits wurden unter Berücksichtigung der üblichen Motorenvielfalt einer typischen Schwerlastflotte drei verschiedene Fahrzeuge mit zwei unterschiedlichen Kraftstoffen ausgewählt: Diesel und CNG. In den nächsten Abschnitten werden die einzelnen Parameter detailliert beschrieben.

3.1 Busflotte

Für diesen Test wurde ein Teil einer städtischen Transportflotte benötigt. Um das Spektrum des Tests zu erweitern, wurden verschiedene Busmodelle mit zwei verschiedenen Antriebstechnologien ausgewählt: Diesel und Compressed Natural Gas (CNG). Außerdem wurden zwei verschiedene Dieselmotoren verwendet, die mit unterschiedlichen Abgasnormen (Euro IV und Euro V) zertifiziert sind, die den meisten modernen Fahrzeugen entsprechen. Die Liste der Hauptmerkmale in Bezug auf Fahrzeuge und Motoren ist in Tabelle 1 aufgeführt. Es ist wichtig festzuhalten, dass alle in diesem Test verwendeten Kraftstoffe im Handel erhältlich waren und die nationalen Kraftstoffanforderungen (UNE-EN 590 für Dieselmotoren und die Richtlinie der Kommission von 2001) erfüllen /27/EG für CNG). Um genauere Informationen bereitzustellen, werden auch einige Konfigurations- und Beschichtungsmaterialien jedes tribologischen Paares vorgestellt.

Tabelle 1. Im Test berücksichtigte Busmodelle und Hauptmerkmale.

	Diesel Euro IV	Diesel Euro V	CNG
Jahr	2008	2010	2007
Fahrzeuginnenlänge / Breite / Höhe [m]	17,94/2,55/3	11,95/2,55/3	12/2.5/3.3
Motor Verschiebung [Liter]	12	7.2	12
Emissionen Standard	EURO IV	EURO V	EEV
Zylinder Aufbau	6-in-line	6-in-line	6-in-line
max. Wirksam Leistung [kW]	220@2200 U/min	210@2200 U/min	180@2200 U/min
max. Wirksam Drehmoment [Nm]	1600 bei 1100 U/min	1100@1100 U/min	880@1000 U/min
Kurbelgehäuseöl Volumen [l]	31	29	33
bmep [Balken]	16,8 bei 1100 U/min	19,55 bei 1100 U/min	9,24 bei 1000 U/min
Thermische Belastung* [W/mm ²]	2,85	3,97	2.33

Turboaufladung	Turbo + Ladeluftkühler	Turbo + Ladeluftkühler	Turbo + Ladeluftkühler
AGR [-]	NEIN	NEIN	-
Ventiltrieb Aufbau	OHV Rollenfolger (gehärteter Stahl)	OHV Stößelfolger (Stahl)	OHV Stößelfolger (Stahl)
Kolbenzylinder Schnittstelle	Gehärteter Stahl Ärmel	Liner	Gehärteter Stahl Ärmel
Kolbenringe: Kompressionsring Abstreifring Ölkontrollring	Keramisches Chrom (3mm) Chrom (3 mm) Keramisches Chrom (4mm)	Keramisches Chrom (3,5 mm) Chrom (2,5 Millimeter) Chrom (4 mm)	Keramisches Chrom (3,5 mm) Phosphatiert (3 mm) Chrom (4 mm)
Pleuelstange Lager	-	Stahl+Aluminium Beschichtung Stahl+Bronze/Pb+C u 3% Beschichtung	Stahl+Bronze/Pb+C u 6 % Beschichtung
Hauptwelle Lager	Stahl+Bronze/Pb+C u 3% Beschichtung Stahl+Bronze/Pb+C du stotterst	Stahl+Aluminium Beschichtung Stahl+Bronze/Pb+C u 6 % Beschichtung	Stahl+Bronze/Pb+C u 3% Beschichtung
Nockenwellenlager	Bronze/Pb	Stahl+Bronze/Pb Beschichtung	Stahl+Aluminium Beschichtung Stahl+Bronze/Pb Beschichtung

* Bezogen auf effektive Leistung pro Kolbenfläche.

3.2 Motorenöle

Der Hauptzweck dieser Studie bestand darin, die Wirkung der Verwendung von LVO auf den Motorverschleiß unter realen Bedingungen zu bewerten. Aufgrund der OEM-Anforderungen wurden vier verschiedene kommerzielle Öle ausgewählt: zwei Öle mit niedriger Viskosität, die als Kandidaten betrachtet wurden, und zwei Öle mit höherer Viskosität, die als Referenzgrundlage betrachtet wurden. Die Hauptmerkmale der erhaltenen Öle finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2. Haupteigenschaften von Frischölen.

	ÖL A	ÖL B	ÖL C	ÖL D
Typ	Grundlinie EuroIV Motor Öl	Basis Euro V/CNG Motoröl	Niedrig Viskosität Kandidat EuroIV/Euro V-Motoröl	Niedrige Viskosität Kandidat CNG Motoröl
SAE-Klasse	15W40	10W40	5W30	5W30
Dichte bei 15 °C [g/cm ³]	0,887	0,859	0,861	0,855
Viskosität bei 40 °C [cSt]	108	96	71	68
Viskosität bei 100 °C [cSt]	14.5	14.4	11.75	11.7
Viskositätsindex [-]	> 141	> 145	> 158	<169
HTHS Viskosität bei 150 °C	4.082	3.853	3.594	3.577

[mPa·s]				
TBN [mgKOH/g]	10	10	16	10
API-Basisöl	API-GI	API G-III	API G-III+ G-IV	API G-III + G- IV
ACEA-Öl Reihenfolge	ACEA E7/E5	ACEA E6/E4	ACEA E7/E4	ACEA E6/E7/E9

Abschließend wurden Schmierstoffe und Busmodelle wie in Tabelle 3 gezeigt aufeinander abgestimmt.

Tabelle 3. Auswahl von Busmodellen und passende Schmiermittel.

Bus-Modell	Anzahl von Busse	Kandidaten-Engine Öl (Anz Busse beteiligt)	Grundlegendes Motoröl (Anzahl der Busse beteiligt)
Diesel Euro IV	9	C (4)	A (5)
Diesel Euro V	10	C (5)	B (4)
CNG	20	D (10)	B (10)

3.3 Ölanalyseprogramm und Probenahme

Die dynamische HTHS-Viskosität ist einer der Schlüsselparameter bezüglich der Verwendung von LVO. Die HTHS-Viskosität kann mit drei verschiedenen Methoden gemessen werden, die drei verschiedenen Standards entsprechen [47]–[49]. Der Hauptunterschied bei jeder Methode hängt mit dem Element zusammen, das die Schubspannung verursacht. Bei diesem Test wurde ein Hochdruck-Kapillarviskosimeter gemäß ASTM D 5481 [49] verwendet.

Obwohl mehrere unterschiedliche Analysen durchgeführt werden müssen, um den Motorverschleiß zu überwachen, ist die Elementarspektrometrie durch ICP-AES (Atomemissionsspektrometrie durch induktiv gekoppeltes Plasma) [50] eine der zuverlässigsten und wird heutzutage verwendet. In diesem Fall wurde eine Methodik zur Überwachung von Verschleiß und additiven Elementen gemäß der Norm ASTM D 5185 [51] verwendet.

Schließlich wurde der Motorölverbrauch unter Berücksichtigung der Ölnachfüllmenge berechnet, die während des gesamten Ölwechselintervalls über den Motor durchgeführt, durch einen in jedem Fahrzeug vorhandenen Zwischentank hinzugefügt und vom Computerized Maintenance Management System des Flottenbetreibers erhalten wurde.

Um die Repräsentativität des Tests zu verbessern, wurde entschieden, den Versuch in zwei Phasen zu unterteilen, die zwei Ölwechselintervallen von jeweils 30000 km entsprechen.

Die Ölprobenahme ist ein wichtiger Punkt bei dieser Art von Tests, da die Probe repräsentativ für das Schmiermittel in dem bewerteten Motor sein muss. Dies kann nicht nur durch die Sicherstellung eines korrekten und systematischen Stichprobenverfahrens erfolgen, sondern auch durch die Festlegung geeigneter Stichprobenfrequenzen, um die Studienziele zu erreichen. Die Abtastfrequenz in diesem Test wurde alle 3000 km eingestellt.

Das festgelegte Probenahmeverfahren umfasst den Probenahmeort, die Probenahmemethode und die Materialanforderungen. Wenn die Probenahme zusammen mit dem Ölablass durchgeführt wurde, wurde eine neue 125-ml-Plastikflasche mit dem aus dem Kurbelgehäuse abgelassenen Öl gefüllt. Zunächst wurde die Kurbelgehäuseschraube gelöst und das Öl 3 Sekunden lang abgelassen. Danach die

Flasche wurde ungefähr mit 100 ml gefüllt; so kann die Probe später vor der Analyse gut geschüttelt werden, um den Inhalt zu homogenisieren.

Wenn die Probe während des Ölservicezeitraums entnommen wurde, wurde eine andere Methodik verwendet. Für jeden Bus wurden eine Handpumpe, neue Leitungen und eine neue Plastikflasche verwendet. Jeder Motor wurde für einige Minuten eingeschaltet, um das Kurbelgehäuseöl zu homogenisieren. Nach diesem Zeitraum wurde das Rohr durch den Ölpeilstabweg eingeführt, bis es das Kurbelgehäuse erreichte. Dann wurde die Ölprobe, etwa 100 ml, in die Plastikflasche gepumpt und dann etikettiert und zur Analyse gelagert.

4. Ergebnisse & Diskussion

4,1 HTHS-Viskosität

Ein wichtiger Punkt, den es bei diesem Test zu beachten gilt, war der anfängliche HTHS-Viskositätswert in frischen Kandidatenölen. Obwohl der SAE J300-Standard eine untere Grenze in der SAE 30-Klasse von 2,9 cP für die HTHS-Viskosität einführt, begrenzen die ACEA-Spezifikationen diesen Wert auf ein Minimum von 3,5 cP[14], was der in SAE J300 definierten unteren Grenze für SAE 40 entspricht, die die ist Hauptgrund für die Nähe zwischen den HTHS-Viskositätswerten bei frischen Kandidaten- und Ausgangsölen.

In diesem Abschnitt wird die HTHS-Viskositätsentwicklung jeder Kombination aus Motortyp und verwendeten Ölen dargestellt. In Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die HTHS-Viskositätsmessungen für den gesamten Test (60000 km) nach Motortyp dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist das Basisöl dargestellt und im unteren Teil das Kandidatenöl.

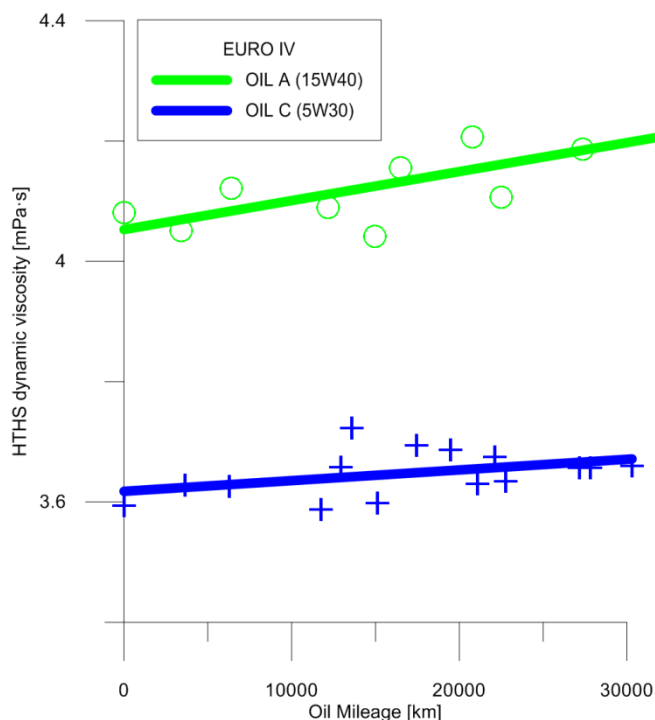


Abbildung 3. HTHS-Viskosität für EURO IV-Motor mit Öl A (15W40) als Referenz und Öl C (5W30) als Kandidat.

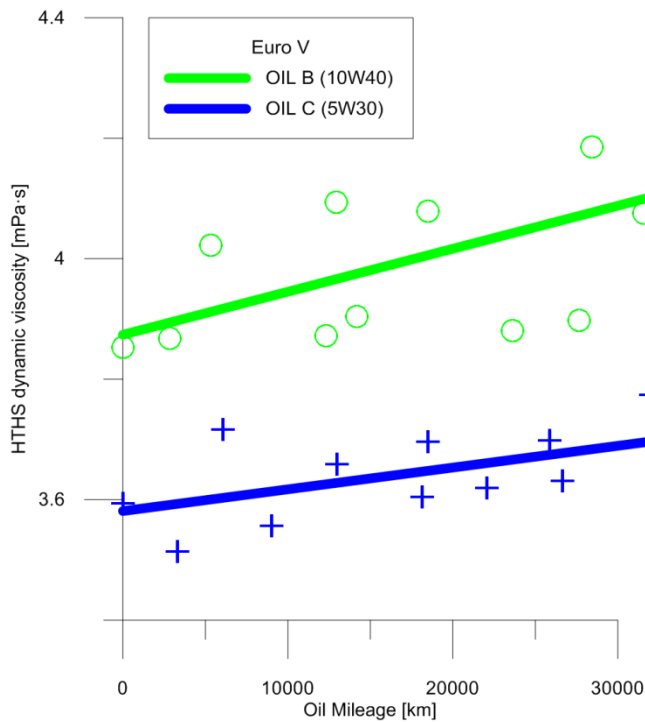


Abbildung 4. HTHS-Viskosität für EURO-V-Motor mit Öl B (10W40) als Referenz und Öl C (5W30) als Kandidat.

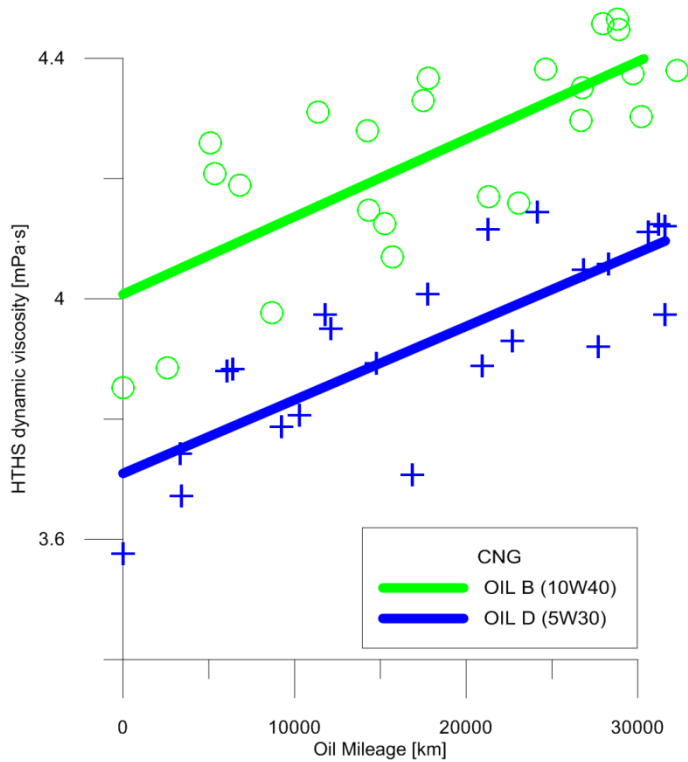


Abbildung 5. HTHS-Viskosität für einen CNG-Motor mit Öl B (10W40) als Referenz und Öl D (5W30) als Kandidat.

Beim Betrachten der vorherigen Grafiken können einige wichtige Aspekte hervorgehoben werden:

Die HTHS-Viskosität weist während des Tests in der Dieselsechnologie nicht signifikante Schwankungen auf, mit zwei klar erkennbaren Trends. Während das Basisöl (hohe Viskosität) ein leichtes darstellt

Anstieg während des ODI zeigten Kandidatenöle eine vernachlässigbare Variation. Diese Situation kann mit den Bemühungen der Ölformulierer in Verbindung gebracht werden, eine gute Kraftstoffökonomieleistung in LVO-Produkten zu gewährleisten, bei denen HTHS entlang des ODI streng kontrolliert werden soll.

In der CNG-Technologie wird ein leichter Anstieg des HTHS-Viskositätswerts beobachtet, aber der Viskositätsabstand zwischen den Ölen (Basislinie vs. Kandidat) wird entlang des ODI beibehalten. Wahrscheinlich tritt dieser leichte Anstieg als Folge der höheren thermischen Belastung dieser Öle und der daraus resultierenden Oxidation auf. Auf der anderen Seite stellt die gleiche Lücke während aller ODI sicher, dass die Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch in vergleichender Weise zwischen beiden Öltypen unabhängig von dem im ODI berücksichtigten Zeitpunkt gleich sind.

4.2 Motorverschleiß

In Bezug auf den Motorverschleiß wurden verschiedene Metalleigenschaften und Trends beobachtet. Zum besseren Verständnis und zur Erläuterung wurden die Verschleißergebnisse nach verschiedenen Phänomenen gruppiert und auch ein Bruchteil der Punkte zur übersichtlicheren Darstellung in Zahlen ausgeblendet.

4.2.1 Eisenkonzentrationsmuster

Die Eisenkonzentration als direkter Indikator für den Motorverschleiß hat einige interessante Trends aufgezeigt. Erstens gibt es in jeder Technologie differenzierte Konzentrationsmuster unter Verwendung der als Referenzöle konzipierten Öle, wie in Abbildung 6 dargestellt.

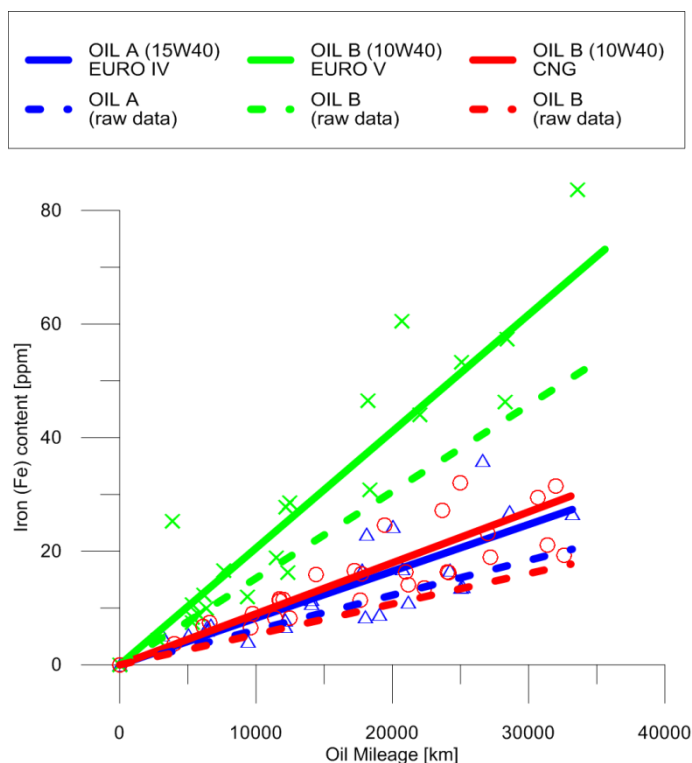


Abbildung 6. Eisengehaltsraten von Referenzölen.

Ein wichtiger Punkt ist das Verhältnis zwischen Verschleißrate und Ölverbrauch. Es gibt Studien, die darauf hinweisen, dass aufgrund des Verdünnungseffekts eine Korrektur von Verschleißtrends notwendig ist

aus der infolge von Ölleckagen und -verbrauch erforderlichen Frischölzugabe (Nachfüllen) [52], so dass in dieser Studie ein Massenerhaltungsansatz verfolgt wurde. Unter Berücksichtigung dieser Situation sind die Ergebnisse für beide Fälle in den Abbildungen 6, 8, 9 und 10 dargestellt, einerseits unter Berücksichtigung der Rohdaten (unter Verwendung einer gepunkteten Linie) und andererseits der erhaltene Trend unter Anwendung eines Korrekturfaktors zur Berücksichtigung des Verdünnungseffekts von Öl nachfüllen.

Wie zu sehen ist, sind die Eisenraten für Motoren mit geringerer mechanischer Belastung, die durch bmep oder durch thermische Belastung dargestellt werden können, ziemlich ähnlich. Bmep ist ein relatives Motorleistungsmaß, das man erhält, indem man die Arbeit pro Zyklus durch das pro Zyklus verdrängte Zylindervolumen dividiert [2]. Der Euro-V-Dieselmotor mit dem höchsten bmep-Wert zeigt folglich die während des Ölwechselintervalls beobachtete höhere Eisenrate. Offensichtlich könnte in Betracht gezogen werden, dass ein Teil dieses Unterschieds auch mit den Unterschieden in der eigenen Ölformulierung in Verbindung gebracht werden kann, aber nicht der gesamte Wert. Später kann mit den Ergebnissen, die bei der Verwendung von LVO erhalten wurden, eine tiefere Analyse durchgeführt werden.

In Abbildung 7 ist die Beziehung zwischen der Eisenverschleißrate und der thermomechanischen Belastung des Motors dargestellt, dargestellt als mittlerer effektiver Bremsdruck (bmep) und thermische Belastung. Thermomechanische Spannungen können mit der Stribeckzahl verknüpft werden, da ein Zusammenhang mit Belastung und Temperatur des Tribokontakts besteht.

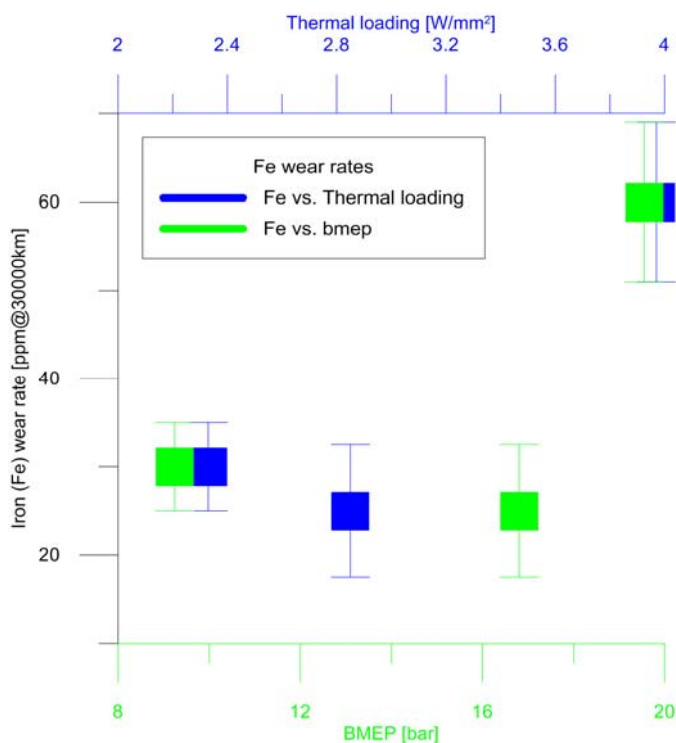


Abbildung 7. Eisenraten und thermomechanische Spannungen.

Wie zu sehen ist, stellt Abbildung 7 eine Beziehung zwischen Eisenraten und thermischen Belastungswerten für jeden Motor dar, die als thermomechanischer Belastungsindikator verwendet wird, und stellt somit eine Abhängigkeit der Schmierleistung und der mechanischen und thermischen Belastungen des Motors dar, die von Änderungen in der Schmierregime und folglich in der tribologischen Leistung.

Die Auswirkungen in Bezug auf den Eisengehalt als Folge der Verwendung von LVO sind in Abbildung 8 dargestellt.

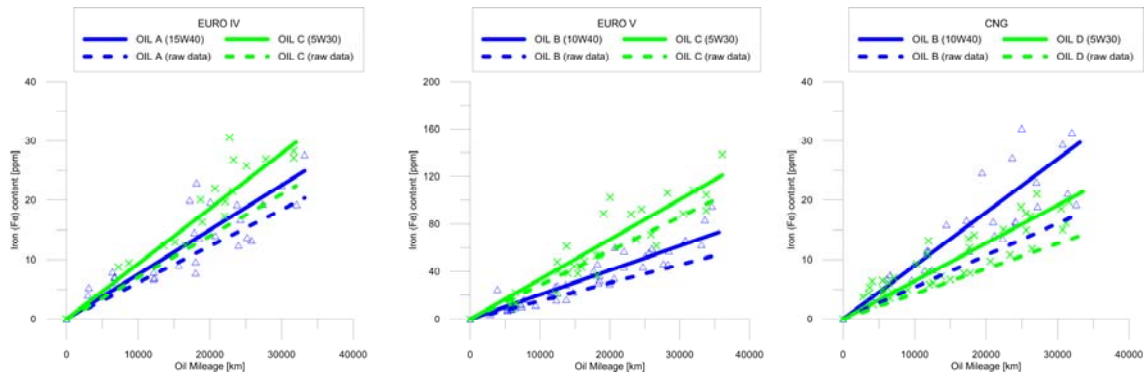


Abbildung 8. Eisenwerte dargestellt für jede Motortechnologie: EURO IV (links), EURO V (Mitte) und CNG-Motor (rechts).

Wie in den vorherigen Diagrammen zu sehen ist, weisen die weniger belasteten Motoren: EURO IV und CNG, keinen signifikanten Unterschied in der Eisenrate auf, wenn LVO verwendet wird. Darüber hinaus wurde im Fall von CNG-Motoren eine reduzierte Eisenrate erhalten, die mit der höheren Ölqualität mit niedriger Viskosität in Verbindung gebracht werden kann. Andererseits hat der spezielle Fall von EURO-V-Motoren wesentlich höhere Eisenraten gezeigt.

Die wahrscheinlichste Hypothese für dieses Phänomen ist die Kombination zweier Ursprünge. Erstens ist dieser EURO-V-Motor der am stärksten belastete der Studie, da er den höchsten bmep und die höchste thermische Belastung aufweist, was zu einem erhöhten mechanischen Aufwand im System führt. Der Hauptunterschied zu anderen Motortypen ist außerdem das Ventilverteilungssystem, basierend auf OHV (Over Head Valve) mit Nockenfolgerstahl ohne Wärmebehandlung, bei dem die Nockenwelle direkt auf den Ventilstößel drückt. Wie oben gezeigt, kann diese tribologische Konfiguration zu einer erhöhten Verschleißrate in diesem System führen, da es im ungünstigsten Schmierungsregime arbeitet.

4.2.2 Bleiabnutzungsmuster

Es wurde auch ein exponentieller Anstieg des Bleigehalts über 20.000 km in Öl B (10W40) in beiden Motortypen beobachtet: EURO V und CNG, aber diese Situation ist bei Kandidatenölen nicht vorhanden. Trends sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 für jede Motortechnologie dargestellt.

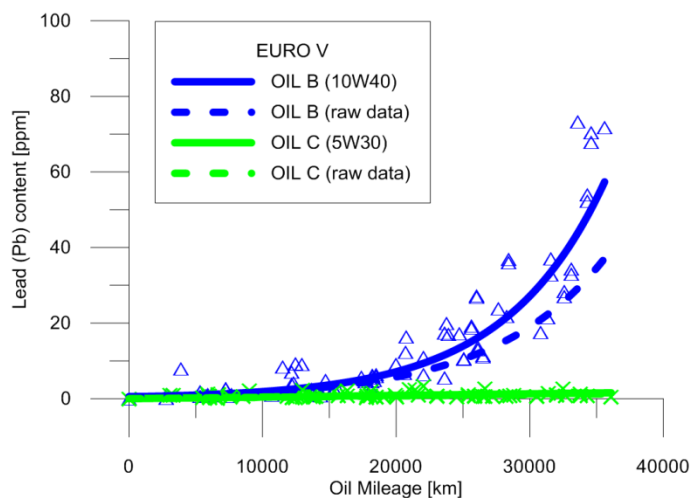


Abbildung 9. Bleigehalt in einem EURO-V-Motor für Öl B (10W40) und Öl C (5W30).

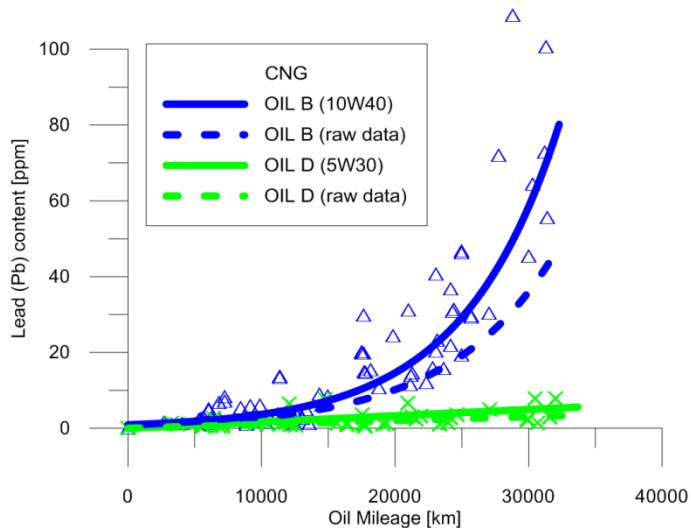


Abbildung 10. Bleigehalt in CNG-Motoren für Öl B (10W40) und Öl D (5W30).

Die plausibelste Erklärung könnte mit der Additiververarmung zusammenhängen. Bei Öl B sind die Verschleißschutzadditive nach 20.000 km fast vollständig aufgebraucht (zur Beurteilung dieser Situation wurden FT-IR-Messungen durchgeführt) und ein Säureangriff auf Babbitt-Metalle scheint zu der zuvor erwähnten Situation zu führen. Im Fall von LVO ermöglicht der höhere Gehalt an Verschleißschutzadditiven eine längere Nutzungsdauer, bei der dieser korrosive Verschleiß unter Kontrolle ist, wodurch sehr niedrige Bleiverschleißraten erzielt werden.

4.2.3 Vorhandensein von Silizium in Öl

Während des Tests führte eine Fehlfunktion des Luftfiltersystems in einigen bestimmten CNG-Fahrzeugen zu einem starken Eindringen von Staub, was zu einigen interessanten Trends im Zusammenhang mit abrasivem Verschleiß an drei Körpern führte. In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind allgemeine Ergebnisse dargestellt, in denen der direkte Zusammenhang zwischen Siliziumgehalt und Abriebkonzentration deutlich zu erkennen ist.

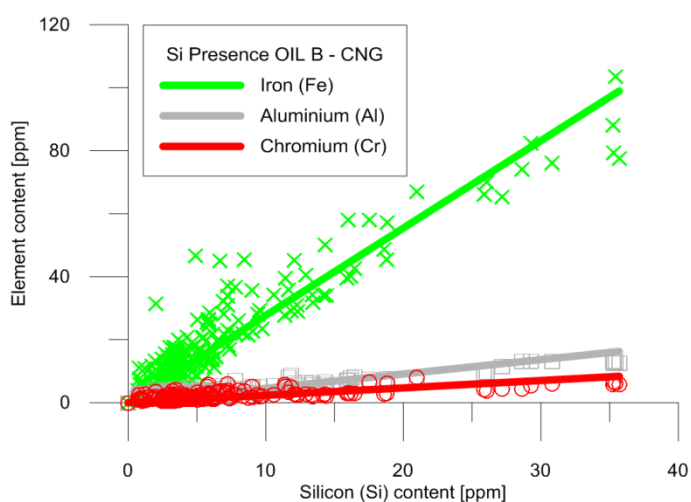


Abbildung 11. Verschleißmetalle in CNG-Motoren mit Öl B (10W40) im Vergleich zum Siliziumgehalt.

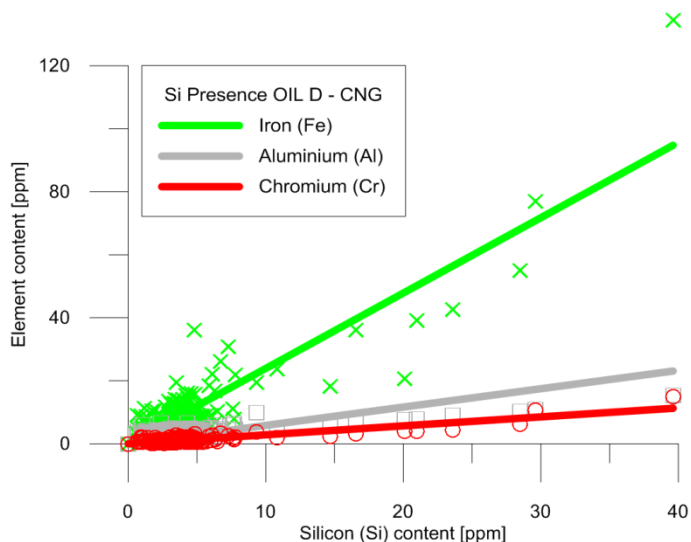


Abbildung 12. Verschleißmetalle in CNG-Motoren mit Öl D (5W30) im Vergleich zum Siliziumgehalt.

Als Folge dieser Situation wurden unterschiedliche Verschleißtrends zwischen Fahrzeugen festgestellt, die dasselbe Motoröl verwenden, insbesondere bei Eisen (Fe), Aluminium (Al) und Chrom (Cr), im Zusammenhang mit dem Eindringen von Silizium im Vergleich zu Fahrzeugen, die dieses Problem nicht hatten mit Luftfiltern, daher wurden diese Ergebnisse nicht in die Hauptstudie der Eisentrends aufgenommen.

4.2.4 Andere Verschleißmetalle

Tabelle 4 fasst die bei anderen Metallen beobachteten Ergebnisse zusammen, bei denen einige der oben erwähnten Muster ebenfalls festgestellt werden. Die für Kupfer und Aluminium erhaltenen Ergebnisse zeigen die gleichen Trends, die für Bleimuster beobachtet wurden. Andererseits wurden Chromanteile auf der Lauffläche von Kolbenringen in ähnlicher Weise wie Eisenmuster beeinflusst, jedoch in geringerem Maße, wie beobachtet werden kann.

Tabelle 4. Verschleißmetalle und Rate für jede Kategorie.

Öl	Motor Technologie	Al-Ebene [ppm@30000 km]		Cu-Niveau [ppm@30000 km]		Cr-Level [ppm@30000 km]	
		3	4	20	20	1	1
ÖL A (15W-40)	EURO IV	3	4	20	20	1	1
ÖL C (5W-30)	EURO IV	4	4	7	5	1	1
ÖL B (10W-40)	EURO V	7	7	4	5	3	3
ÖL C (5W-30)	EURO V	4	5	2	2	4	4
ÖL B (10W-40)	GNC	5	6	4	6	4	5
ÖL D (5W-30)	GNC	4	4	2	2	2	2

4.3 Ölverbrauchseffekte

Der letzte Teil dieser Studie umfasste die Messung des Ölverbrauchs, der als weiterer wichtiger Aspekt bei der Verwendung von LVO hervorgehoben wurde. Dazu waren historische Daten von jedem Motortyp erforderlich, und auch das Nachfüllen von Öl für jedes Fahrzeug in der Testflotte wurde kontinuierlich überwacht. Die für jede Motortechnologie erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

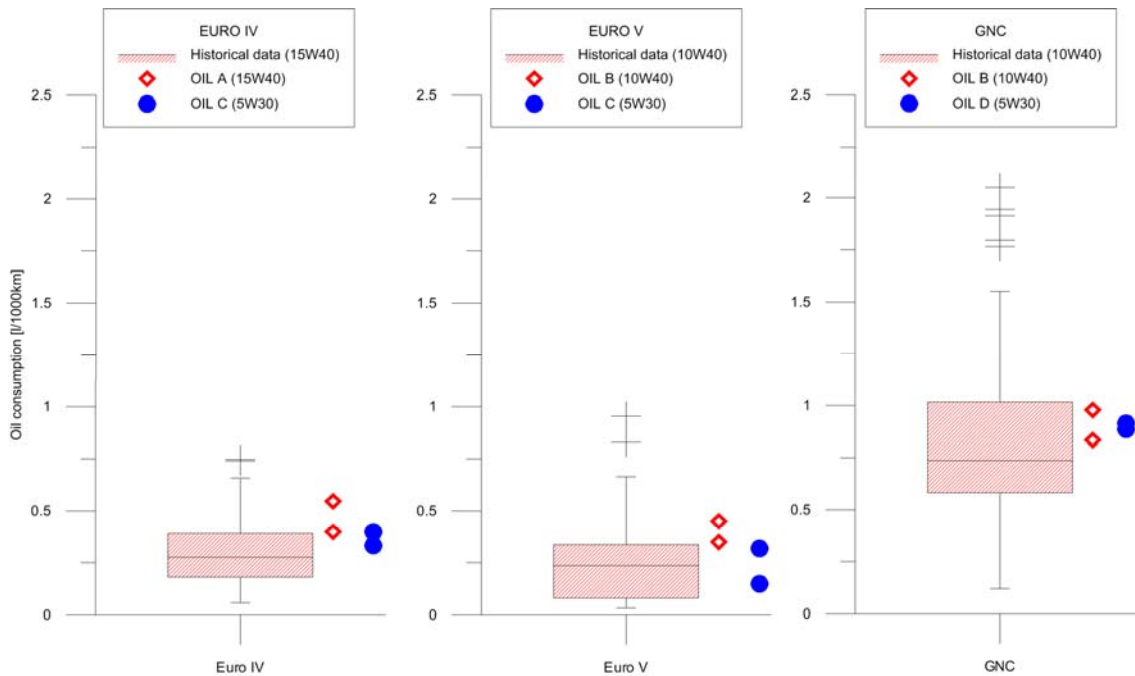


Abbildung 13. Ölverbrauchsmessung für jede Motortechnologie: EURO IV (links), EURO V (Mitte) und CNG (rechts).

Die erhaltenen Ergebnisse weisen darauf hin, dass es keine signifikanten Hinweise auf einen Anstieg des Ölverbrauchs als Folge der Verwendung von LVO gibt; aber wie deutlich zu beobachten ist, gibt es sehr wichtige Unterschiede zwischen den Motortechnologien oder dem Design, mit einem deutlich höheren Verbrauch bei CNG-Motoren im Vergleich zu Dieselmotoren.

5. Schlussfolgerungen

Diese Studie in einer realen Flotte, die unter realen Bedingungen arbeitet, hat es ermöglicht, viele interessante Schlussfolgerungen zu ziehen, die Flottenbetreibern und Ölformulierern helfen können, diese Phänomene besser zu verstehen und kritische Probleme in Bezug auf LVO anzugehen. Die wichtigsten Schlussfolgerungen dieser Studie sind die folgenden:

Die Verwendung von LVO führt nicht unbedingt zu einem unterschiedlichen Verschleißverhalten, da die Kandidatenöle mit niedriger Viskosität, die in Motoren EURO IV und CNG verwendet werden, im Vergleich zum Ausgangswert keinen erhöhten Verschleiß gezeigt haben, wahrscheinlich weil beide Öle in der Lage sind, thermomechanischen Belastungen von zu widerstehen diese Motoren.

Allerdings haben sich bei einigen Motorölformulierungen Kombinationsunterschiede ergeben, die auf eine stärkere mechanische und thermische Belastung des Motors oder eine Additivverarmung unabhängig von der Verwendung von LVO zurückzuführen sind.

In der Zwischenzeit wurden bei CNG-Motoren abweichende Werte mit dem Rest der Flottenkategorie beobachtet, aufgrund eines erheblichen Vorhandenseins von Silizium, das den dreiteiligen abrasiven Verschleiß begünstigt hat.

Andererseits scheinen die in diesem Test untersuchten Formulierungskandidaten optimiert zu sein, um Kraftstoffeinsparung zu bieten und somit eine konstante HTHS-Viskosität während ihrer Verwendung beizubehalten, mit Ausnahme einer leichten Erhöhung der CNG-Technologie. Diese Leistung weist auf eine gute Synergie zwischen Grundöl und Additiven hin, um die Schmierung in tribologischen Motorpaaren sicherzustellen.

Wahrscheinlich hat dies zu einem begrenzten Ölverbrauch geführt. Die Daten zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen der Verwendung von LVO und Basisölen in Bezug auf den Ölverbrauch und zeigten auch, dass die Werte innerhalb des normalen Betriebsbereichs jeder Technologie liegen, wobei der Motortyp viel wichtiger ist als die Ölviskosität.

6. Bibliographie

- [1] F. Payri und JM Desantes, *Motores de Combustion Interna Alternatives*. Barcelona: Reverté, 2011.
- [2] JB Heywood, *Grundlagen des Verbrennungsmotors*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [3] K. Holmberg, P. Andersson, NO Nylund, K. Mäkelä und A. Erdemir, „Globaler Energieverbrauch durch Reibung in Lkw und Bussen“, *Tribol. Int.*, Bd. 78, S. 94–114, 2014. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.004.
- [4] A. Comfort, „Eine Einführung in die Reibungsverluste und Schmierstoffeigenschaften von Hochleistungsdieselmotoren, die den Kraftstoffverbrauch beeinflussen – Teil 1“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2003-01-3225, 2004.
- [5] A. Posmyk, „Einfluss von Materialeigenschaften auf den Verschleiß von Verbundbeschichtungen“, *Tragen*, Bd. 254, S. 399–407, 2003. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00130-3.
- [6] I. Etsion und E. Sher, „Verbesserung der Kraftstoffeffizienz mit Kolbenringen mit Laseroberflächenstrukturierung“, *Tribol. Int.*, Bd. 42, Nr. 4, S. 542–547, Apr. 2009. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.02.015.
- [7] C. Silva, M. Ross und T. Farias, „Analyse und Simulation von „Low-Cost“-Strategien zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen in konventionellen leichten Nutzfahrzeugen mit Benzinmotor“, *Energieumwandlung. Verwalt.*, Bd. 50, S. 215–222, 2009. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.046.
- [8] G. Fontaras, E. Vouitsis und Z. Samaras, „Experimentelle Bewertung des Potenzials zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen von Schmiermitteln mit niedriger Viskosität“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2009-01-1803, 2013. DOI: 10.4271/2009-01-1803.
- [9] V. Macián, B. Tormos, V. Bermúdez und L. Ramírez, „Bewertung der Auswirkung der Verwendung von Ölen mit niedriger Viskosität auf den Kraftstoffverbrauch eines leichten Dieselmotors unter stationären und vorübergehenden Bedingungen“, *Tribol. Int.*, Bd. 79, S. 132–139, 2014. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.06.003.
- [10] RI Taylor und RC Coy, „Verbesserte Kraftstoffeffizienz durch Schmiermitteldesign: Eine Übersicht“, *Proz. Inst. Mech. Eng. Teil J. J. Eng. Tribol.*, Bd. 214, Nr. 1, S. 1–15, Jan. 2000. DOI: 10.1177/135065010021400101.

- [11] M. Manni, C. Gommellini und G. Sabbioni, „Auswirkung der physikalischen Eigenschaften von Schmierölen auf Emissionen, Kraftstoffverbrauch und Ölverbrauch in einem leichten Dieselmotor“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 952552, 1995.
- [12] JG Hawley, CD Bannister, CJ Brace, S. Akehurst, I. Pegg und MR Avery, „Die Auswirkung der Motor- und Getriebeölviskosität auf den Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen“, *Proz. Inst. Mech. Eng. Teil D J. Automob. Eng.*, Bd. 224, Nr. 9, S. 1213–1228, Sept. 2010. DOI: 10.1243/09544070jauto1534.
- [13] M. Covitch, M. Brown, C. May und T. Selby, „Extending SAE J300 to Viscosity Grades below SAE 20“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2010-01-2286, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-2286.
- [14] ACEA, „ACEA 2012 Oil Sequences“, vol. 10, nein. 32, S. 1–15, 2012.
- [15] W. van Dam, P. Kleijwegt, M. Torreman und G. Parsons, „The Lubricant Contribution to Improved Fuel Economy in Heavy Duty Diesel Engines“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2009-01-2856, 2009.
- [16] P. Carden, C. Pisani, J. Andersson, I. Field, E. Lainé, J. Bansal und M. Devine, „The Effect of Low Viscosity Oil on the Wear, Friction and Fuel Consumption of a Heavy Lkw-Motor“, *Technisches SAE-Dokument*, Bd. 6, Nr. 2013-01-0331, S. 311–319, Apr. 2013. DOI: 10.4271/2013-01-0331.
- [17] C. M. Taylor, *Motorentribologie*. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1993.
- [18] V. Macián, B. Tormos, S. Ruiz und L. Ramírez, „Potenzial von Ölen mit niedriger Viskosität zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Stadtbusflotten“, *Transp. Auflösung Teil D Transp. Umgebung*, Bd. 39, S. 76–88, 2015. DOI: 10.1016/j.trd.2015.06.006.
- [19] M. Priest und C. Taylor, „Tribologie von Automobilmotoren – Annäherung an die Oberfläche“, *Tragen*, Bd. 241, Nr. 2, S. 193–203, 2000. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00375-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00375-6).
- [20] P. Andersson und J. Tamminen, „Piston Ring Tribology. Eine Literaturübersicht“, 2002.
- [21] LL Ting, „Entwicklung eines hin- und hergehenden Prüfstands für tribologische Untersuchungen von beweglichen Komponenten von Kolbenmotoren – Teil 1: Aufbau des Prüfstands und Messmethode für Kolbenring-Reibungskoeffizienten“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 930685, 1993. DOI: 10.4271/930685.
- [22] M. Bulsara, D. Bhatt und K. Mistry, „Messung der Ölfilmstärke zwischen Kolbenring und Laufbuchse mit Dehnungsmessstreifen“, *Ind. Lubr. Tribol.*, 2012.
- [23] N. Nikolic, T. Torovic und Z. Antonic, „Ein Verfahren zur Erstellung eines theoretischen Verschleißdiagramms von Kurbelwellenhauptlagern von Verbrennungsmotoren“, *Mech. Mach. Theorie*, Bd. 58, S. 120–136, Dez. 2012. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2012.07.009.

- [24] RA Demmin, F. Girshick und AM Schilowitz, „Engine Oil Viscosity and Bearing Wear: Field Test Results“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 922342, 1992. DOI: 10.4271/922342.
- [25] H. Xu, GJ Jones, D. Glacier und V. Bearings, „Simulation von Lagerverschleiß und dessen Einfluss auf die Lagerleistung basierend auf elastohydrodynamischer Analyse“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 1999-01-1522, 1999. DOI: 10.4271/1999-01-1522.
- [26] J. Sun, X. Cai und L. Liu, „Zur elastohydrodynamischen Schmierleistung von Kurbelwellenlagern basierend auf dem Effekt der gesamten Motorblockverformung“, *Ind. Lubr. Tribol.*, Bd. 64, Nr. 1, S. 60–65, 2012. DOI: 10.1108/00368791211196907.
- [27] M. Teodorescu, D. Taraza und N. Henein, „Experimental Analysis of Dynamics and Friction in Valve Train Systems“, No. 2002-01-0484, 2002.
- [28] N. Nayak, P. a. Lakshminarayanan, MKG Babu und a. D. Dani, „Vorhersagen zum Nockenfolgerverschleiß bei Dieselmotoren“, *Tragen*, Bd. 260, Nr. 1–2, S. 181–192, Jan. 2006. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.022.
- [29] CM Taylor, „Flüssigkeitsfilmschmierung in Automobilventiltrieben“, *ARCHIV: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 1994–1996 (Bände 208–210)*, Bd. 208. S. 221–234, 2006. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1994_208_377_02.
- [30] D. Vela, E. Ciulli, B. Piccigallo und F. Fazzolari, „Untersuchung von geschmierten Nockenstößelkontakten“, *Proz. Inst. Mech. Eng. Teil J J. Eng. Tribol.*, Bd. 225, S. 379–392, 2011. DOI: 10.1177/1350650111400157.
- [31] JT Staron und PA Willermet, „An Analysis of Valve Train Friction in Terms of Lubrication Principles“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 830165, 1983. DOI: 10.4271/830165.
- [32] J. Lee, D. Patterson, K. Morrison und G. Schwartz, „Reibungsmessung im Ventiltrieb mit Rollenfolger“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 940589, 1994.
- [33] R. Roshan, M. Priest, A. Neville, A. Morina, X. Xia, JH Green, CP Warrens und MJ Payne, „Reibungsmodellierung in einem Motorventiltrieb unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit gegenüber Schmiermittelformulierung“ *Proz. Inst. Mech. Eng. Teil J J. Eng. Tribol.*, Bd. 223, S. 413–424, 2009. DOI: 10.1243/13506501JET540.
- [34] A. Neville, A. Morina, T. Haque und M. Voong, „Kompatibilität zwischen tribologischen Oberflächen und Schmiermitteladditiven – Wie Reibung und Verschleißminderung durch Oberflächen-Schmiermittel-Synergien gesteuert werden können“, *Tribol. Int.*, Bd. 40, Nr. 10–12, S. 1680–1695, Okt. 2007. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.01.019.
- [35] E. Younghouse, W. Waddey und R. Schmidt, „Fuel Economy Lubricants in Heavy Duty Road Service“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 801349, 1980.

- [36] S. Swedberg, „SAE fügt Kategorien für leichte Motorenöle hinzu“, *Schmierbericht*, 2015. [Online]. Verfügbar: http://www.lubesngreases.com/lubereport/15_7/specs/-8306-1.html. [Zugriff: 15. Februar 2015].
- [37] M. Manni und S. Florio, „An Experimental Evaluation of the Impact of Ultra Low Viscosity Engine Oils on Fuel Economy and CO2 Emissions“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2013-01-2566, 2013. DOI: 10.4271/2013-01-2566.
- [38] K. Fukuo, A. Fujimura, M. Saito, K. Tsunoda und S. Takiguchi, „Development of the ultra-low-fuel-consumption hybrid car – INSIGHT“, *JSAE Rev.*, Bd. 22, S. 95–103, 2001.
- [39] DS Viswanath, T. Ghosh, DHL Prasad, NVK Dutt und KY Rani, *Viskosität von Flüssigkeiten: Theorie, Schätzung, Experiment und Daten*. 2007.
- [40] W. van Dam, T. Miller und G. Parsons, „Optimierung von Schmiermitteln mit niedriger Viskosität für eine verbesserte Kraftstoffökonomie in Hochleistungsdieselmotoren“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2011-01-1206, Apr. 2011. DOI: 10.4271/2011-01-1206.
- [41] W. Van Dam, MW Cooper, K. Oxorn und S. Richards, „Beobachtungen aus Untersuchungen zum Verschleiß von Zylinderlaufbuchsen in Hochleistungsdieselmotoren und die Entwicklung hin zu Schmiermitteln für Hochleistungsmotoren mit niedrigerer Viskosität“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2011-01-1207, Apr. 2011. DOI: 10.4271/2011-01-1207.
- [42] V. Macian, B. Tormos, S. Ruiz, G. Miró und T. Pérez, „Evaluation of Low Viscosity Engine Wear Effects and Oil Performance in Heavy Duty Engines Fleet Test“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2014-01-2797, 2014. DOI: 10.4271/2014-01-2797.
- [43] M] Plumley, V. Wong, M. Molewyk und S. Park, „Optimierung der Temperaturabhängigkeit der Basisölviskosität zur Reduzierung der Reibung von Antriebszylindern“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 2014-01-1658, 2014. DOI: 10.4271/2014-01-1658.
- [44] W. Van Dam und W. Kleiser, „Schmiermittelbezogene Faktoren, die den Ölverbrauch in Dieselmotoren steuern“, *Technisches SAE-Dokument*, NEIN. 952547, 1995.
- [45] SM Chun, „Simulation der Motorlebensdauer im Zusammenhang mit abnormalem Ölverbrauch“, *Tribol. Int.*, Bd. 44, Nr. 4, S. 426–436, Apr. 2011. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.11.020.
- [46] P. a. Lakshminarayanan und NS Nayak, *Verschleiß kritischer Komponenten in Hochleistungsmotoren*. Singapur: John Wiley & Sons, 2011. DOI: 10.1002/9780470828847.
- [47] ASTM, „Standard Test Method for Measurement Viscosity at High Shear Rate and High Temperature by Tapered Bearing Simulator“, No. D4683.
- [48] ASTM, „Standard Test Method for Measuring Viscosity at High Temperature and High Shear Rate by Tapered-Plug Viscometer“, No. D4741.
- [49] ASTM, „Standard Test Method for Measuring Apparent Viscosity at High-Temperature and High-Shear Rate by Multicell Capillary Viscometer“, No. D5481.

- [50] VA Fassel, CA Peterson, FN Abercrombie und RN Kniseley, „Simultane Bestimmung von Verschleißmetallen in Schmierölen durch Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma“, *Anal. Chem.*, Bd. 48, Nr. 12, S. 516–519, 1976. DOI: 10.1021/ac60367a014.
- [51] ASTM, „Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)“ mit induktiv gekoppeltem Plasma, No. D 5185. DOI: 10.1520/D5185.
- [52] V. Macián, B. Tormos, P. Olmeda und L. Montoro, „Analytischer Ansatz zur Bestimmung der Verschleißrate für die Zustandsüberwachung von Verbrennungsmotoren auf der Grundlage von Ölanalysen“, *Tribol. Int.*, Bd. 36, Nr. 10, S. 771–776, 2003. DOI: 10.1016/S0301-679X(03)00060-4.

Danksagungen

Die Autoren danken dem spanischen Ministerio de Ciencia e Innovación für die Finanzierung dieses Projekts (Projekt Nr. TRA2012-30907) und danken Repsol und EMT de Valencia für ihre Zusammenarbeit. Darüber hinaus danken die Autoren Ruth Calatayud, Lorena Garzón, Leonardo Ramírez und Santiago Ballester für ihre Hilfe bei dieser Arbeit.