

ANALYSE DES REIBUNGS- UND VERSCHLEISS- VERHALTENS DES MOTORÖLADDITIVS: AUTOGAR® ENGINE SHIELD / TMF-2000®

Abschlussbericht V1295/2025

16. Dezember 2025

ANALYSE DES REIBUNGS- UND VERSCHLEISS- VERHALTENS DES MOTORÖLADDITIVS: AUTOGAR® ENGINE SHIELD / TMF-2000®

Abschlussbericht V1295/2025

Prof. Dr. Matthias Scherge

André Blockhaus

Philipp Daum

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg

Projektnummer: 11-37340

**AUFTRAGGEBER: STEEL SEAL GERMANY GMBH
DORFSTRASSE 20
D 90617 PUSCHENDORF
GESCHÄFTSFÜHRER: OLIVER TASKIN (CEO)
HANDELSREGISTER: HRB 18186, AMTSGERICHT FÜRTH**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ziele	5
2	Versuchsaufbau und Proben	6
2.1	Stift-Scheibe-Tribometer	6
2.2	Radionuklidtechnik (RNT)	6
2.3	Weißlichtinterferometer (WLI)	7
2.4	Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)	7
2.5	Proben	7
2.5.1	Stift-Scheibe-Proben	7
2.5.2	Schmierstoff und Additiv	7
3	Ergebnisse	9
3.1	SST-Kennfelder ohne und mit Additiv (V1 und V2)	9
3.2	RNT-Messungen	11
3.3	Dynamische Additivzugabe während des Versuchs	13
3.4	Nachwirkung nach dem Ölwechsel	14
3.5	Viskositätsmessungen	15
3.6	XPS-Oberflächenanalyse	15
4	Diskussion	17
5	Zusammenfassung	20
6	Anhang	21

1

Einleitung

Dieser Bericht fasst eine systematische tribologische Untersuchung des Motoröladditivs AUTOGAR® Engine Shield, dessen reibungsmindernde Komponente die TMF-2000®-Formel ist, in Mischung mit dem handelsüblichen Motoröl Shell Helix HX7 10W-40 zusammen. Mit einem Stift-Scheibe-Tribometer mit Radionuklid-Verschleißmessung wurde eine Matrix aus Lasten und Gleitgeschwindigkeiten ohne und mit Additiv untersucht.

Die Verbesserung der Kraftstoffeffizienz und die Verlängerung der Lebensdauer von Verbrennungsmotoren erfordern Schmierstoffe, die nicht nur im hydrodynamischen Bereich, sondern auch unter Misch- und Grenzschmierung leistungsfähig sind, wo Kontakte zwischen Rauheitsspitzen dominieren. Nachträglich zugegebene Öladditive wie AUTOGAR® Engine Shield werden zur Verringerung von Reibung und Verschleiß unter anspruchsvollen Bedingungen vermarktet. Eine kontrollierte tribologische Untersuchung ist erforderlich, um messbare Effekte von reinen Werbeaussagen zu trennen.

Die vorliegende Arbeit, durchgeführt am Fraunhofer IWM in Karlsruhe, bewertet den Einfluss von AUTOGAR® Engine Shield auf Reibung und Verschleiß bei Zugabe zu Shell Helix HX7 10W-40. Das Additiv enthält die TMF-2000®-Formel als aktive reibungsmindernde Komponente. Eine Abfolge von Modellversuchen wurde festgelegt, um Reibung, Verschleiß und Oberflächenchemie bei vollständig gefluteter Schmierung bei 80 °C zu charakterisieren.

1.1 Ziele

Die Hauptziele der Untersuchung sind:

1. die Änderung des Reibungskoeffizienten (COF) über einen weiten Bereich von Normalkräften und Gleitgeschwindigkeiten zu quantifizieren,
2. quantitative Verschleißraten mithilfe der Radionuklidtechnik (RNT) zu bestimmen,
3. die Zeitabhängigkeit und Reproduzierbarkeit der Kennfelder zu untersuchen,
4. den In-situ-Effekt der Additivzugabe im laufenden Betrieb anhand von Stribeck-Kurven zu erfassen,
5. Nachwirkungen nach dem Ölwechsel zu untersuchen und
6. viskositätsbedingte Effekte mithilfe von Viskositätsmessungen und XPS-Oberflächenanalysen von der tribochemischen Schichtbildung zu unterscheiden.

2

Versuchsaufbau und Proben

2.1 Stift-Scheibe-Tribometer

Das Stift-Scheibe-Tribometer ist ein Prüfgerät zur Durchführung von Reibungsuntersuchungen. Der Grundaufbau besteht aus einer horizontal rotierenden Scheibe, auf deren Oberfläche ein zylindrischer Stift senkrecht aufgesetzt und mit einer definierten Kraft angedrückt wird. Während des Prüfbetriebs werden sowohl die Normalkraft als auch die resultierende Reibungskraft kontinuierlich über einen integrierten Sensor erfasst und gemessen. Das Tribometer arbeitet unter kontrollierten Schmierungsbedingungen mit Öl, wobei der Schmierstoff durch einen geschlossenen, temperierten Ölkreislauf zirkuliert.

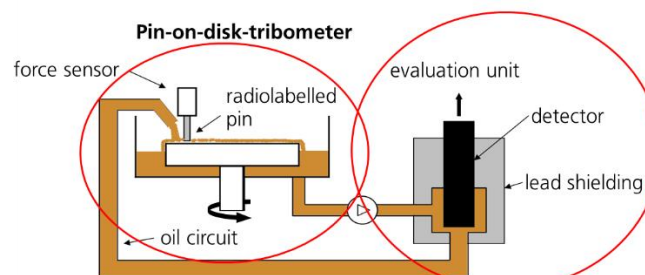
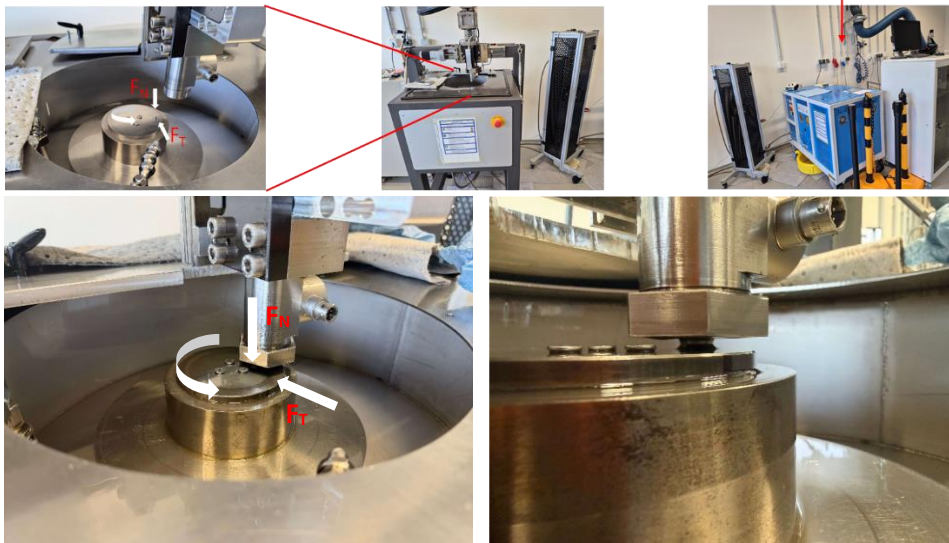


Abbildung 1
Schema und Aufnahmen
des Stift-Scheibe-
Tribometers mit integrierter
RNT-Einrichtung und
Ölkreislauf.



2.2 Radionuklidtechnik (RNT)

Die Radionuklidtechnik (RNT) ermöglicht die Bestimmung des Verschleißes in Echtzeit während laufender tribologischer Versuche. Dazu werden einer oder beide Reibpartner schwach radioaktiv markiert. Die beim Reibversuch entstehenden Verschleißpartikel gelangen in einen geschlossenen Ölkreislauf mit integriertem Gammadetektor, der die Aktivität des Öls kontinuierlich misst. Der Detektor ist gegen die natürliche Hintergrundstrahlung abgeschirmt, wodurch selbst kleinste Verschleißmengen in Echtzeit messbar werden. Das System wird zur Messung des Masseverlusts der aktiven Probe in mg mit einer Kalibrierfolie kalibriert, die vom Aktivierer zusammen mit den aktivierten Proben bereitgestellt wird. Diese Kalibrierfolie dient

sowohl zur Erstkalibrierung des Systems als auch zur kontinuierlichen Halbwertszeitkorrektur während der laufenden Messung.

Für die tribologischen Versuche wurde das RNT-System in den Ölkreislauf des Stift-Scheibe-Tribometers integriert, siehe Abbildung 1.

2.3 Weißlichtinterferometer (WLI)

Das Weißlichtinterferometer (WLI) ist ein berührungsloses optisches Messverfahren, das die Interferenz von weißem Licht nutzt und so 3D-Profilmessungen von Strukturen mit Abmessungen zwischen mehreren Zentimetern und mehreren Mikrometern ermöglicht. Das Interferometer überlagert das optische Bild der Probe mit einem Interferenzstreifenmuster, wobei jeder Interferenzstreifen eine Linie konstanter Höhe darstellt. Während der Aufnahme wird das Objektiv schrittweise zur Probe hin bewegt. Dadurch wandern die Interferenzstreifen wie Höhenlinien von oben nach unten über die Probenoberfläche. Aus dem entstehenden Bildstapel wird anschließend die dreidimensionale Oberflächentopografie der Probe rekonstruiert.

2.4 Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)

Die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) dient zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Oberflächen. Sie ist ein hochgradig oberflächensensitives Messverfahren, das unter Ultrahochvakuumbedingungen durchgeführt wird. Die Informationstiefe beträgt etwa 3 nm, wodurch die obersten Atomlagen gezielt analysiert werden können. Das Verfahren ermöglicht die qualitative und quantitative Bestimmung der Elementzusammensetzung. Darüber hinaus kann die Oberfläche durch Sputtern schichtweise abgetragen werden, um ein Tiefenprofil von wenigen Mikrometern zu erstellen und so die chemische Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Tiefe zu untersuchen.

2.5 Proben

2.5.1 Stift-Scheibe-Proben

Die Stiftprobe hat einen Durchmesser von 5 mm und eine Höhe von 5 mm. Als Stiftwerkstoff wird der Wälzlagerstahl 100Cr6 verwendet, der mit einer etwa 30 µm dicken Hartchromschicht beschichtet ist. Die Stiftoberfläche wurde geschliffen und anschließend poliert, um eine hochwertige Oberflächengüte zu erzielen. Für RNT-Messungen wurde die Chromschicht des Stifts radioaktiv markiert. Die Aktivierung zu Mangan-52 (Mn-52) erfolgte mit einer spezifischen Aktivität von etwa 100 kBq/mg bis zu einer Tiefe von etwa 18 µm.

Die Gegenprobe ist eine Scheibe aus Grauguss GG25 mit einem Durchmesser von 80 mm und einer geschliffenen Oberfläche.

2.5.2 Schmierstoff und Additiv

Der Basisschmierstoff in allen Versuchen ist das Motoröl Shell Helix HX7 10W-40. Es handelt sich um ein handelsübliches, vollständig additiviertes Motoröl für Pkw. Die Versuche werden entweder mit diesem Öl allein oder mit 100 mL AUTOGAR® Engine Shield, die 2 L dieses Öls zugegeben werden, durchgeführt. Diese Dosierung von 5 % wurde von Alvarag Grupo als repräsentativ für den Pkw-Betrieb vorgegeben. Sowohl Schmierstoff als auch Additiv wurden vom Auftraggeber Steel Seal Germany GmbH bereitgestellt.



Abbildung 2
Basisschmierstoff (Shell
Helix HX7 10W-40) und
Motoröladditiv (Engine
Shield, AUTOGAR®).

3 Ergebnisse

3.1 SST-Kennfelder ohne und mit Additiv (V1 und V2)

Zur grundlegenden Charakterisierung des tribologischen Systems wird mit dem Stift-Scheibe-Tribometer ein Kennfeld mit 5 Normalkräften (250, 400, 550, 700 und 900 N, entsprechend Kontaktpressungen von etwa 10 bis 50 MPa) durchfahren. Jeder Betriebspunkt wird 4 Stunden lang gefahren und die Reibung gemessen. Zusätzlich wird an jedem Betriebspunkt die Gleitgeschwindigkeit in 4 Stufen variiert (0,1 m/s, 0,7 m/s, 1,4 m/s und 2,5 m/s).

Die Prüfpaarung aus einem verchromten Stahlstift (stellvertretend für den Kolbenringwerkstoff) und einer Grauguss-Scheibe (stellvertretend für den Zylinderlaufbuchsenwerkstoff) wurde gewählt, um die reale Anwendung anzunähern. Die geeignete Wahl von Kontaktpressung und Gleitgeschwindigkeit gewährleistet, dass dieses Modellsystem dem Originalsystem energetisch ähnlich ist. Nur unter dieser Voraussetzung können die Tribometerwerte auf die reale Anwendung, also den Verbrennungsmotor, übertragen werden.

In Versuch V1 wird das SST-Kennfeld mit Shell Helix HX7 ohne zusätzliches Additiv aufgenommen. Das resultierende Reibungskennfeld in Abbildung 3 zeigt die erwarteten Tendenzen: höhere Reibungskoeffizienten (COF) bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten und hohen Lasten, bei denen Grenzschmierung vorherrscht, sowie niedrigere COF bei höheren Geschwindigkeiten und mäßigen Lasten aufgrund hydrodynamischer Effekte.

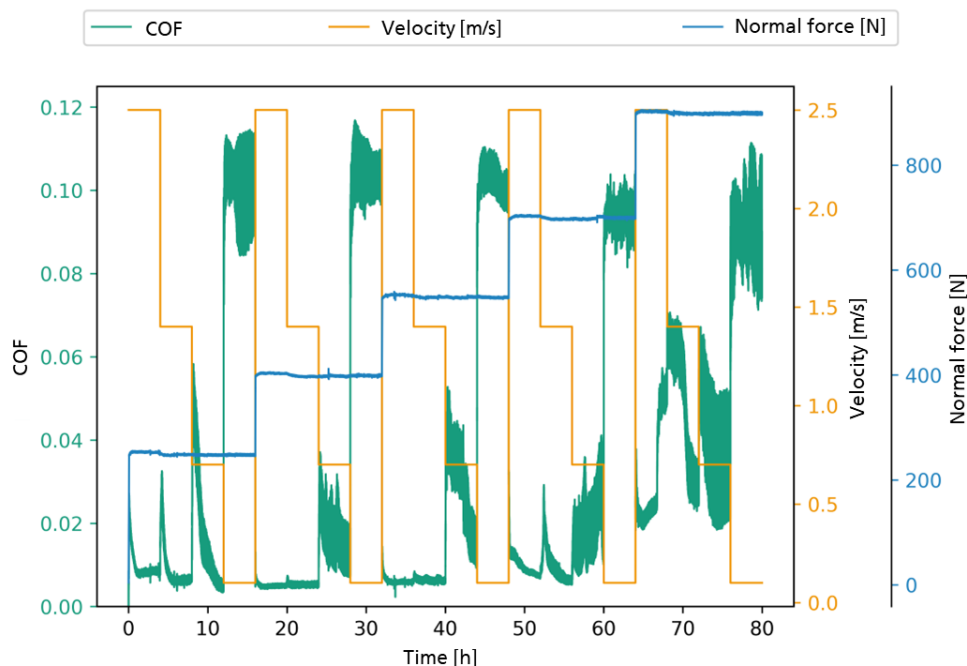


Abbildung 3
V1 SST-Kennfeld ohne
zusätzliche Additive; Öl: 2 L
Shell Helix HX7 10-W40 bei
80 °C.

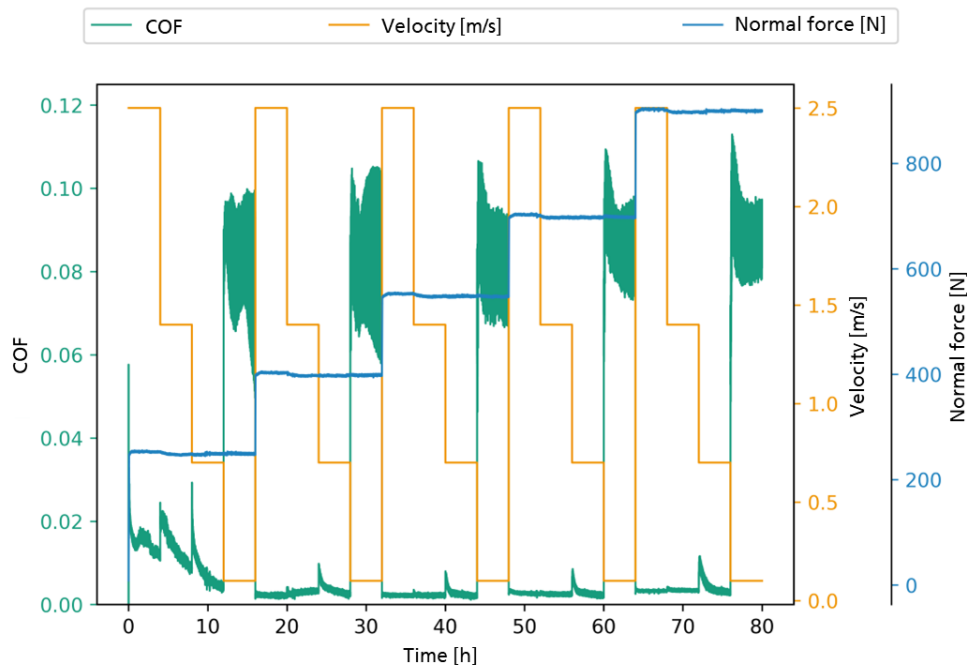


Abbildung 4
V2 SST-Kennfeld mit zusätzlichen Additiven; Öl: 2 L Shell Helix HX7 10-W40 mit 100 mL Engine Shield bei 80 °C.

In Versuch V2 wird dieselbe SST-Matrix mit 100 mL AUTOGAR® Engine Shield wiederholt, die dem Ölvolumen von 2 L zugegeben werden, siehe Abbildung 4. Die Gesamtstruktur des Reibungskennfelds bleibt ähnlich, der COF ist jedoch an den meisten Betriebspunkten deutlich reduziert. Einige wenig beanspruchende Betriebspunkte zeigen eine mit dem Basisschmierstoff vergleichbare Reibung, während viele von Misch- und Grenzschmierung dominierte Betriebspunkte eine deutliche COF-Reduktion aufweisen.

Abbildung 5 zeigt die WLI-Aufnahme der Scheibe nach dem Stift-Scheibe-Versuch V1. Eine ausgeprägte Verschleißspur mit einer Tiefe von etwa 20 µm ist erkennbar. Die Verschleißspur aus dem Stift-Scheibe-Versuch V2 weist dagegen nur eine geringe Tiefe von etwa 1 µm auf, wie die WLI-Aufnahme in Abbildung 6 zeigt.

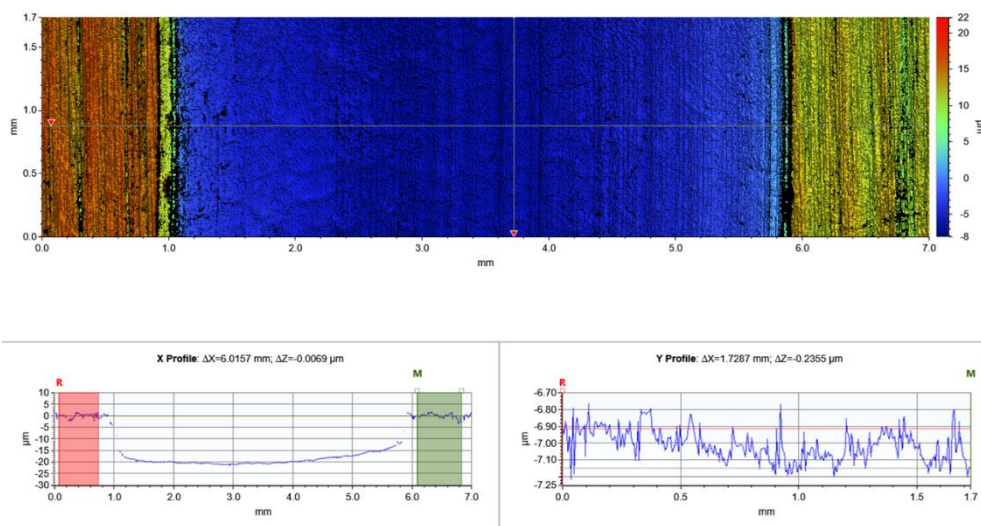


Abbildung 5
WLI-Aufnahme der SST-Scheibe nach Versuch V1.

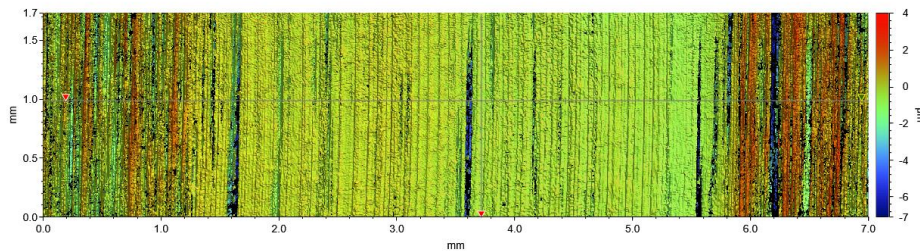
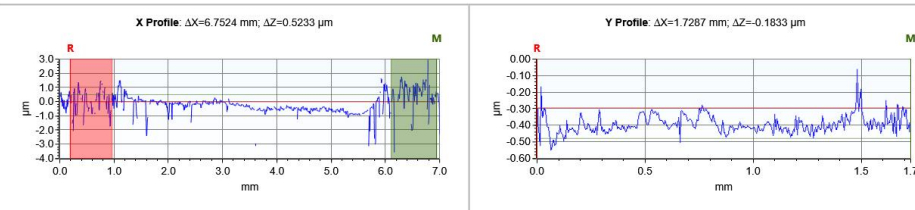


Abbildung 6
WLI-Aufnahme der SST-Scheibe nach Versuch V2.



3.2 RNT-Messungen

Bei den RNT-Versuchen (V6 und V7) wird die Gammaaktivität der vom aktivierten Stift freigesetzten Verschleißpartikel kontinuierlich im zirkulierenden Öl gemessen. Das Signal wird in 5-Minuten-Intervallen aufsummiert und in Verschleißraten (nm/h) umgerechnet. Diese Verschleißraten in nm/h werden für jeden dargestellten Abschnitt durch lineare Anpassungen des Verschleißes über der Zeit bestimmt.

In V6 (verwendetes Öl: 2 L Shell Helix HX7 10-W40 bei 80 °C ohne zusätzliche Additive) wurde der Versuch nach 52 Stunden aufgrund einsetzenden starken abrasiven Verschleißes abrupt abgebrochen. Das resultierende Verschleißkennfeld in Abbildung 7 endet daher nach 52 Stunden. Das Diagramm zeigt zu Beginn relativ niedrige Verschleißraten (etwa 10 nm/h und weniger) und nach 20 Stunden höhere Werte. Ab 20 h steigt die Verschleißrate zunächst an und sinkt bei Gleitgeschwindigkeiten von 0,1 m/s wieder; dieses Muster wiederholt sich bei der nächsten Laststufe (550 N).

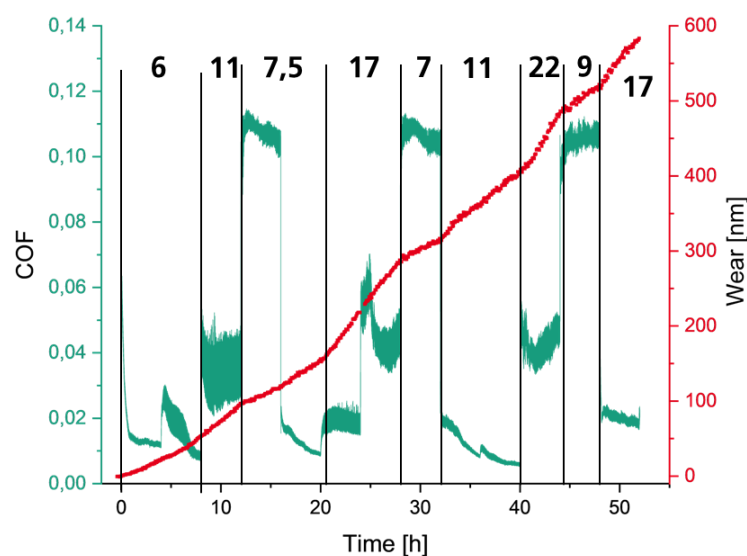


Abbildung 7
Versuch V6: COF und Stiftverschleißmessung ohne Engine Shield.

In Versuch V7 wird das SST-Kennfeld unter Zugabe von 100 mL Engine Shield zum Basis-schmierstoff Shell Helix HX7 wiederholt. Hier wurde das Kennfeld ohne Unterbrechung über die gesamte Laufzeit von 80 Stunden durchfahren. Das RNT-Verschleißkennfeld zeigt eine deutliche Verringerung der Verschleißraten über alle Betriebsbereiche, siehe Abbildung 8. Bereits ab Versuchsbeginn ist der Verschleiß mit Additiv deutlich geringer als in V6. Nur an den Lastpunkten 700 N bei 0,7 m/s sowie 900 N bei 0,7 und 0,1 m/s steigt die Verschleißrate auf höhere Werte von etwa 30 nm/h. Hier ist kein Vergleich mit V6 möglich, da dieser Versuch vorzeitig endete.

Die entsprechende WLI-Aufnahme der Scheibe ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Scheibenverschleiß liegt im Bereich von 4 μm und ist damit deutlich geringer als die 20 μm aus Versuch V1 (ohne Engine Shield) und vergleichbar mit Versuch V2 (mit Engine Shield) bei etwa 1 μm .

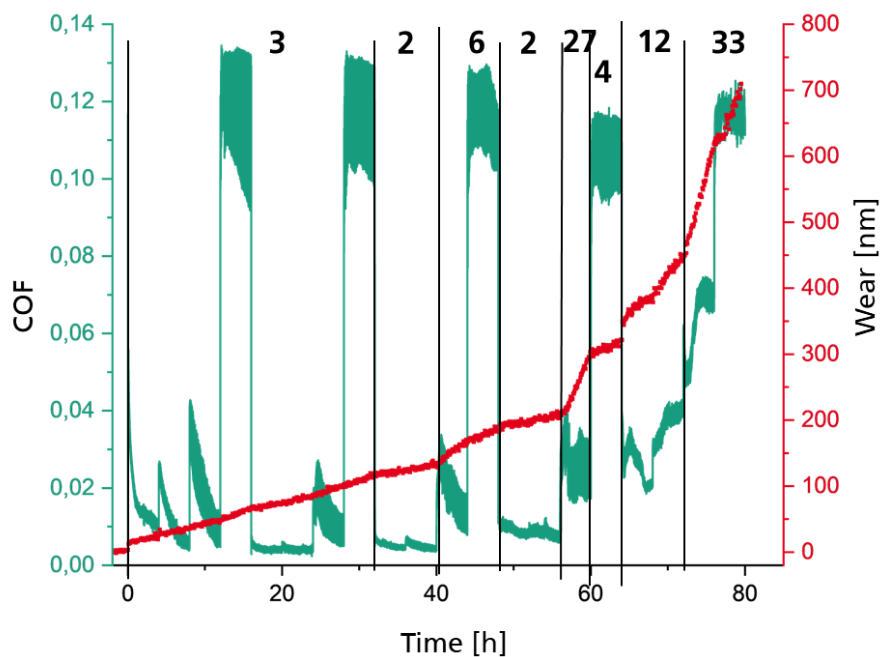


Abbildung 8
Versuch V7: COF und Stiftverschleißmessung mit Engine Shield.

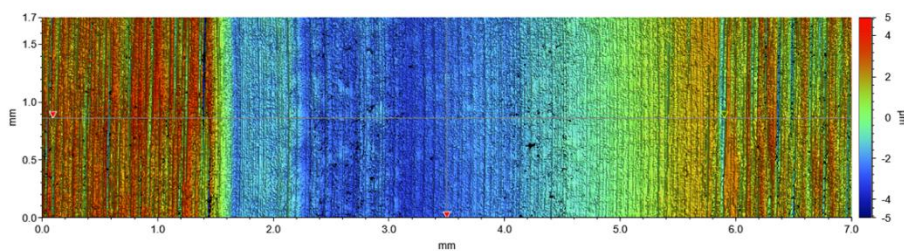
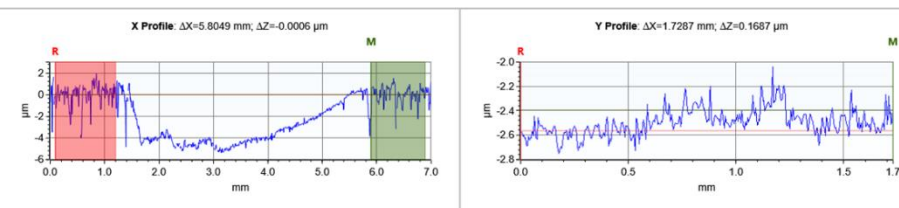


Abbildung 9
WLI-Aufnahme der SST-Scheibe nach Versuch V7.



3.3 Dynamische Additivzugabe während des Versuchs

In diesem Versuch wird die Wirkung der Zugabe von Engine Shield zu einem laufenden System mit Basisschmierstoff untersucht. Dazu wurde ein Lastpunkt von 700 N bei 0,7 m/s gewählt, an dem deutliche Änderungen von Reibung und Verschleiß erkennbar sind. Außerdem wurden Stribeck-Kurven durchfahren, um den Einlaufvorgang zu charakterisieren. Die Stribeck-Kurven bestehen aus 18 Gleitgeschwindigkeiten (von 2,5 m/s bis 0,1 m/s) bei einer Normalkraft von 300 N. Jede Geschwindigkeit wurde nur eine Minute lang gefahren.

Das Versuchsprogramm war wie folgt: Beginn mit 3 Stribeck-Kurven, gefolgt von Lastpunkt 1 (LP 1 bei 700 N und 0,7 m/s) für 2 Stunden. Danach folgten eine Stribeck-Kurve und anschließend Lastpunkt 2 (erneut 700 N und 0,7 m/s) für 2 Stunden. Während dieses Lastpunkts (LP 2) wurden 100 mL Engine Shield zugegeben: Übergang zwischen orangefarbener und blauer Kurve. Anschließend folgte eine weitere Stribeck-Kurve. Während des ersten Lastpunkts (LP 1) war die Einlaufphase noch nicht abgeschlossen, was zu einem instabilen COF führte, siehe Abbildung 10. Nach Durchfahren der Stribeck-Kurve entspricht der COF am zweiten Lastpunkt (LP 2) etwa den Endwerten des ersten. In der Mitte von LP2 werden 100 mL Engine Shield in den Ölkreislauf eingespritzt. Danach nimmt der COF im Zeitverlauf kontinuierlich ab.

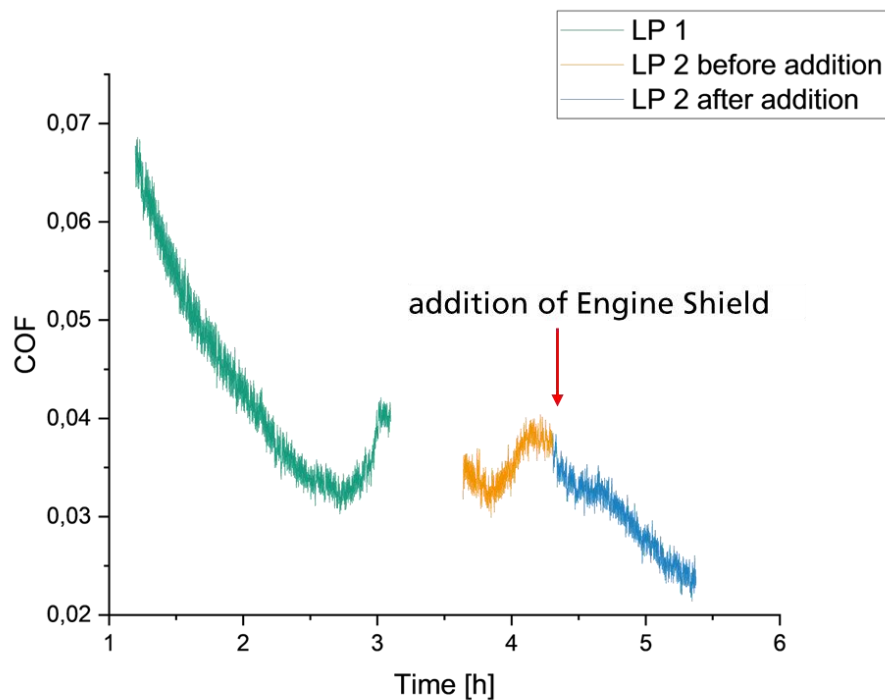


Abbildung 10
COF der Lastpunkte LP1 und LP2 sowie Zugabe von 100 mL Engine Shield während LP2.

Die in Abbildung 11 gezeigte Stribeck-Kurve zwischen LP 1 und LP 2 liegt deutlich unter den drei Kurven vor LP 1. Nach LP 2 unterscheidet sich die Stribeck-Kurve bei Geschwindigkeiten unter 1,3 m/s nur geringfügig von der Kurve zwischen den beiden LP.

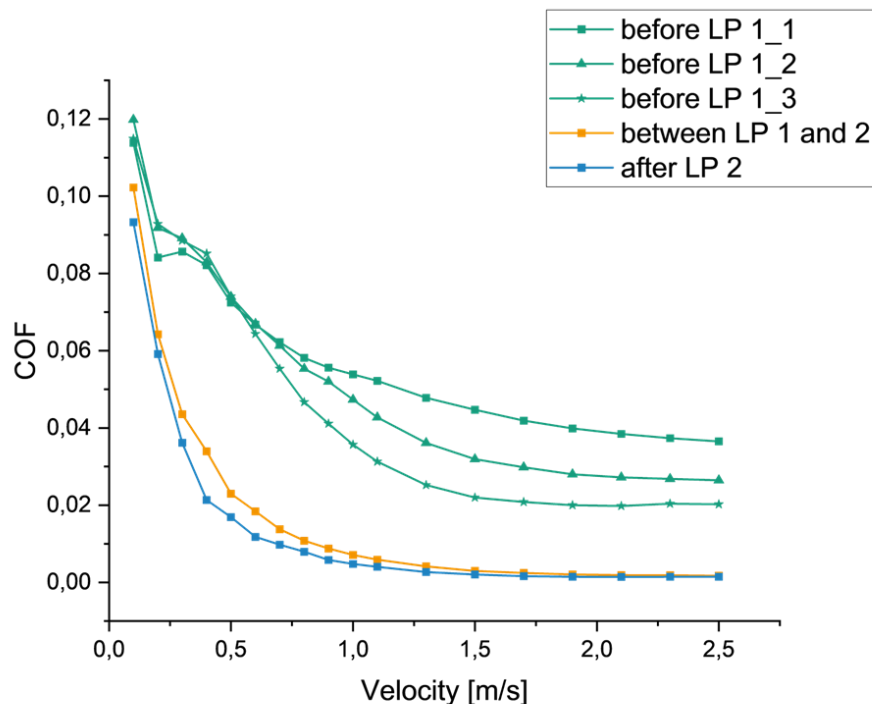


Abbildung 11
Stribeck-Kurven aus Versuch V8; vor, zwischen und nach den LP.

3.4 Nachwirkung nach dem Ölwechsel

Um zu untersuchen, ob die Zugabe von Engine Shield Nachwirkungen hat, wurde das Öl nach LP 2 gewechselt (Versuch V8). Das Öl mit Additiv wurde abgelassen und frisches Shell Helix HX7 eingefüllt. Anschließend wurde der Versuch mit denselben Proben wie zuvor an derselben Position und unter denselben Bedingungen fortgesetzt (700 N und 0,7 m/s für 2 h → LP 3 nach Ölwechsel), gefolgt von einer abschließenden Stribeck-Kurve bei 300 N.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Bei LP 3 ist auch ohne Engine Shield im Öl eine weitere kontinuierliche Abnahme des COF erkennbar. Die nach LP 3 gemessene Stribeck-Kurve zeigt bei Geschwindigkeiten unter 1,3 m/s erneut eine geringere Reibung als die vorherigen Stribeck-Kurven.

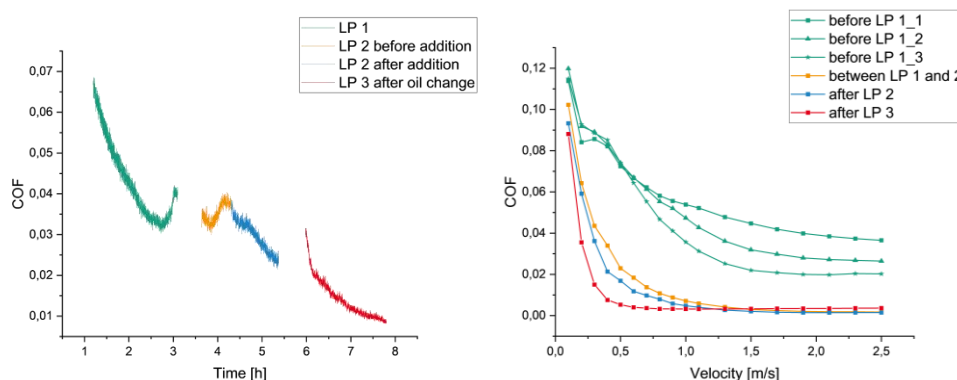


Abbildung 12
links: COF der Lastpunkte LP 1, LP 2 und LP 3
rechts: zugehörige Stribeck-Kurven.

3.5 Viskositätsmessungen

Zur Trennung hydrodynamischer Effekte von Grenzschichteffekten wird die Viskosität von Shell Helix HX7 bei 80 °C in vier Zuständen gemessen: frisches Öl vor dem Versuch, Öl nach dem Versuch, Öl mit Engine Shield vor dem Versuch sowie dasselbe nach dem Versuch.

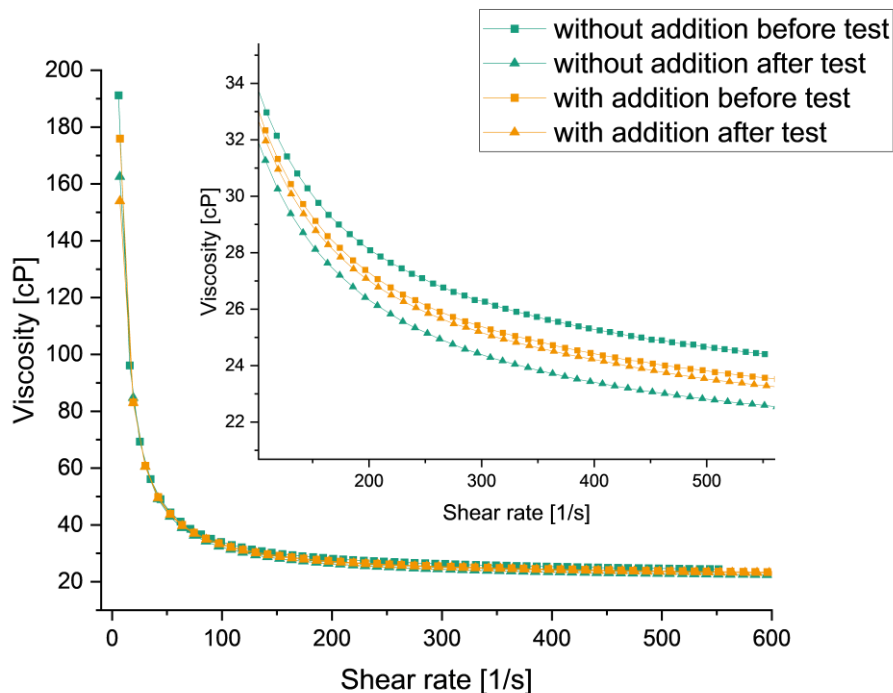
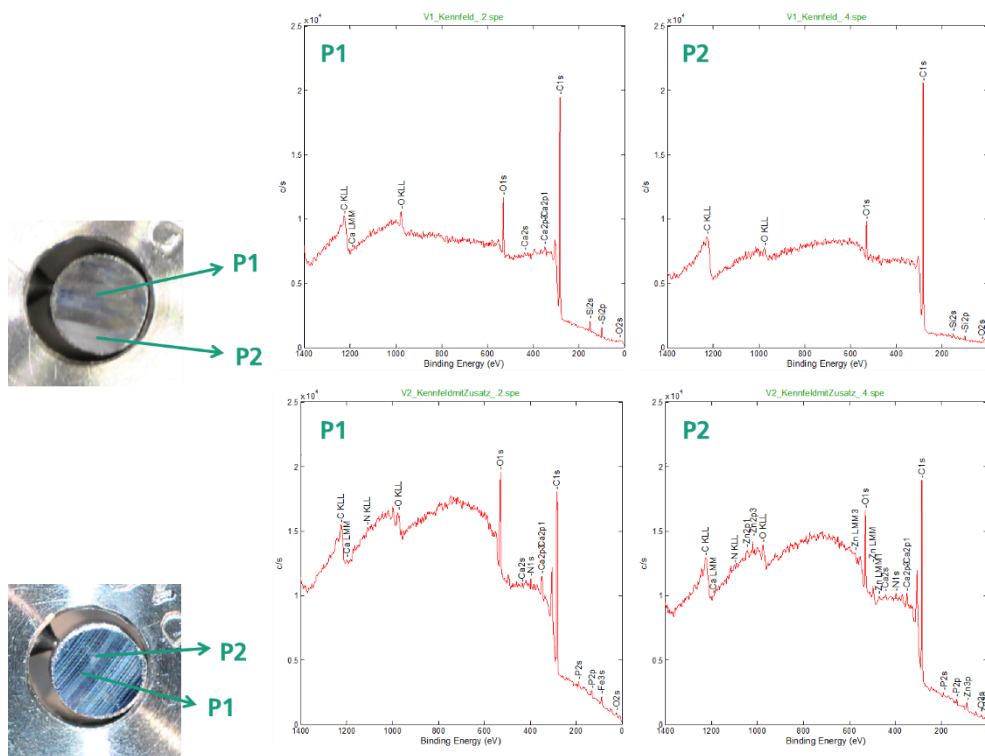


Abbildung 13
Viskositätsmessungen bei 80 °C für Shell Helix HX7 ohne und mit Engine Shield vor und nach dem Versuch.

Die vier gemessenen Viskositäten in Abbildung 13 unterscheiden sich kaum voneinander. Mit Additiv liegt die Viskosität zwischen den Viskositäten des Öls ohne Additiv vor und nach dem Versuch. Die Additivzugabe verändert die Viskosität des Öls nicht.

3.6 XPS-Oberflächenanalyse

Nach ausgewählten Versuchen werden die Stiftoberflächen mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) analysiert. Die Proben werden vor der Messung mit Isopropanol gereinigt; untersucht wird nur die äußerste Oberfläche (keine Sputterreinigung). Der Analysebereich hat einen Durchmesser von etwa 200 µm. Stifte aus V1 (Basisschmierstoff) und V2 (Basisschmierstoff mit Engine Shield) werden an mehreren Positionen untersucht, um die elementare Oberflächenzusammensetzung zu vergleichen und aus dem Additiv hervorgegangene Tribofilme nachzuweisen.



Im Gegensatz dazu zeigen Stifte aus V2 (mit Engine Shield) eine deutlich vielfältigere Elementzusammensetzung. Neben Kohlenstoff und Sauerstoff weisen die XPS-Spektren Phosphor, Schwefel, Zink, Stickstoff, Natrium und Magnesium nach, häufig in oxidischer Form oder als Sulfide/Sulfate. Der Kohlenstoffanteil an der Oberfläche ist gegenüber V1 verringert, während Sauerstoff und aus dem Additiv stammende Elemente deutlich angereichert sind. Die Elementzusammensetzung jedes Stifts ist in Tabelle 1 im Anhang aufgeführt.

4 Diskussion

Die SST-Versuche zeigen einen deutlichen Einfluss des Additivs Engine Shield auf Reibung und Verschleiß. Abbildung 15 stellt die ersten beiden SST-Versuche als 3D-Säulendiagramm mit den Mittelwerten der einzelnen Betriebspunkte dar, wobei statt der Normalkraft die Kontaktpressung verwendet wird. In diesem Kennfeld sind beim Versuch mit Additiv gegenüber dem Versuch ohne Additiv niedrigere Reibungskoeffizienten über alle Betriebspunkte bzw. annähernd gleiche Werte an 3 Betriebspunkten zu beobachten. Insbesondere bei hohen Pressungen zeigt sich eine stärkere Reibungsreduktion, was auf eine durch das Additiv gebildete reibungsmindernde Oberfläche hinweist. Das Additiv kann sich im oberflächennahen Bereich chemisch und/oder mechanisch durchmischen. Dies führt folglich zu einer Verringerung der Schubspannung in diesem Bereich und damit auch zu einer Verringerung der Reibung.

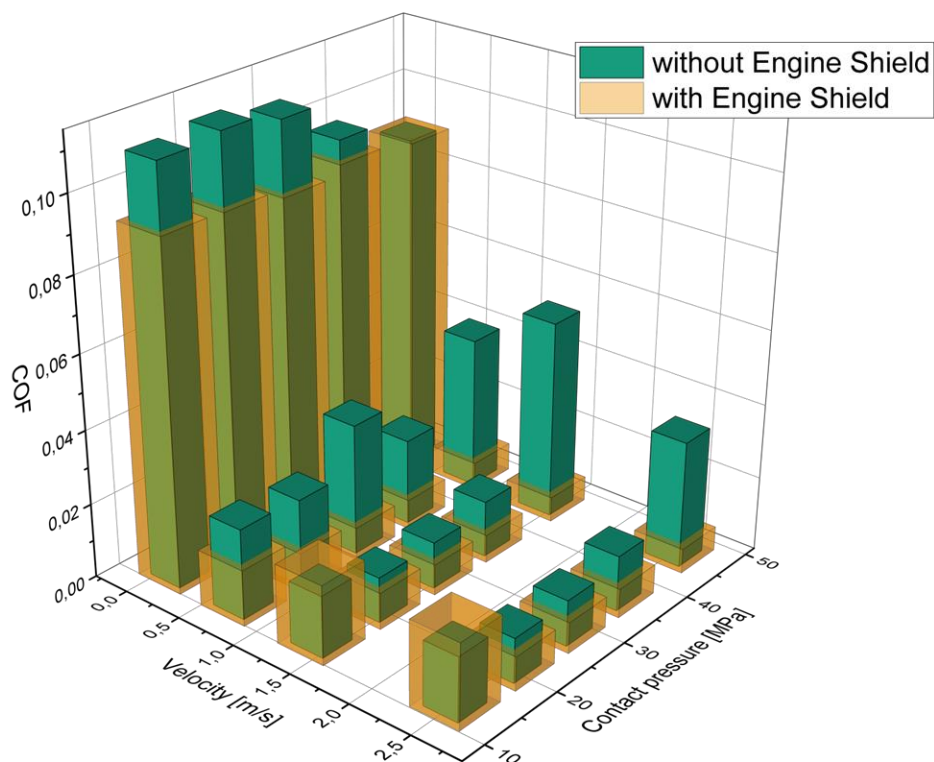


Abbildung 15
Mittelwert für jeden der 20 Punkte des Kennfelds; Versuche V1 und V2.

Die dynamische Additivzugabe während des Versuchs (Kapitel 3.3, Abbildung 10) und die Nachwirkung nach dem Ölwechsel (Kapitel 3.4) stützen diese Interpretation. Durch die Additivzugabe während LP2 nimmt die Reibung kontinuierlich ab. Beim Wechsel vom mit Additiv versetzten Öl zurück zum Basisschmierstoff bleiben Nachwirkungen bestehen, was die oberflächenaktive Natur des Additivs bestätigt. Das Additiv scheint eine chemisorptive Bindung mit der Oberfläche einzugehen, wodurch seine Entfernung beim Ölwechsel verhindert wird.

Für die Verschleißuntersuchungen wurde die RNT-Technik eingesetzt, um den Stiftverschleiß in Echtzeit zu messen. Die beiden Abbildungen, Abbildung 16 und Abbildung 17, zeigen die RNT-Versuche mit identischer Skalierung, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Das additivhaltige System weist von Beginn an minimale Verschleißraten auf, die im dargestellten Bereich 6 nm/h nicht überschreiten. Dies weist auf ein ausgezeichnetes Einlaufverhalten des Systems hin. Ohne Additiv variieren die Verschleißraten je nach Betriebspunkt erheblich und liegen zwischen 6 und 22

nm/h. Der absolute Scheibenverschleiß nach den Versuchen zeigt denselben Zusammenhang. Mit Additiv ist die Verschleißspur von 1 bis 4 μm deutlich geringer als die 15 bis 20 μm , die mit dem Basisschmierstoff allein beobachtet wurden. Insgesamt belegen diese Verschleißmessungen, dass das Additiv mit dem Reibpartner eine verschleißmindernde Oberfläche bildet.

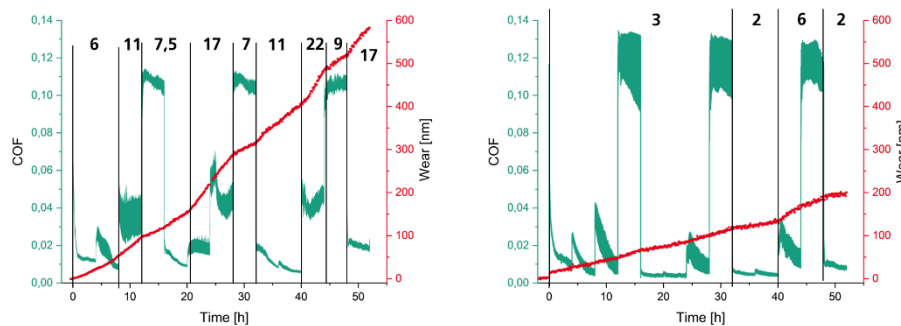


Abbildung 16
Vergleich beider Verschleißmessungen; gleiche Skalierung.

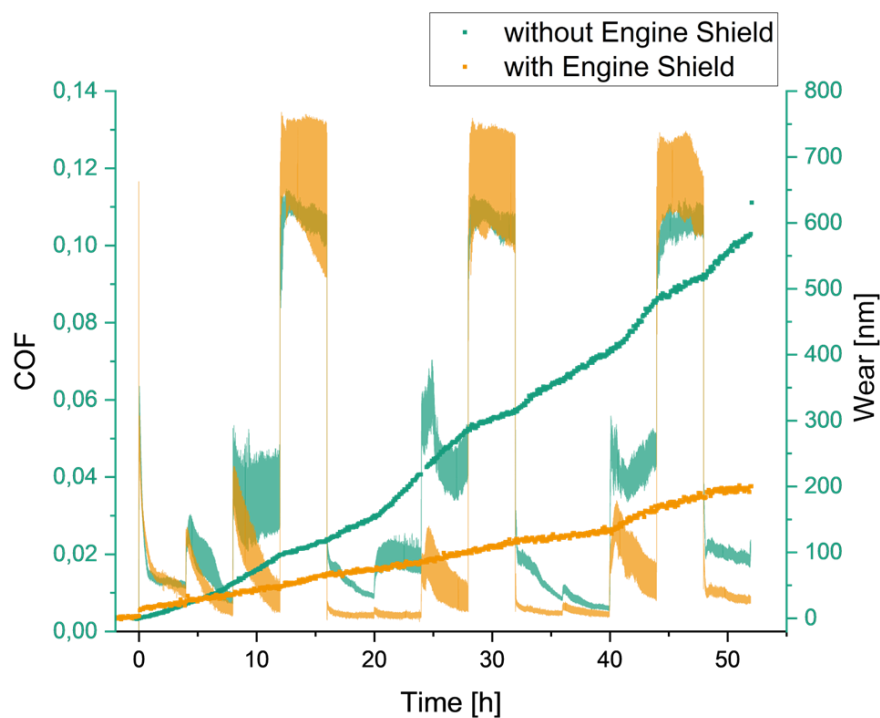


Abbildung 17
Vergleich beider Verschleißmessungen.

Im vollständigen RNT-Versuch (Abbildung 8) tritt nach 56 Stunden bei den höchsten Laststufen erhöhter Verschleiß auf. Das additivhaltige Öl kann den Verschleiß unter diesen extremen Bedingungen somit nicht vollständig unterdrücken. Um dem entgegenzuwirken, könnte die Konzentration des Additivs oder seiner Hauptkomponente TMF 2000® erhöht werden.

Nach unserem Kenntnisstand wurde Engine Shield bewusst in einer Konzentration formuliert, die für den typischen Pkw-Motorbetrieb geeignet ist. Je nach Schwere der Einsatzbedingungen (z. B. höheren Kontaktpressungen) kann die TMF 2000®-Konzentration angepasst werden.

XPS-Analysen weisen auf den mit Engine Shield geprüften Stiften verschleißmindernde Elemente wie Phosphor und Zink an der Oberfläche nach, die auf dem anderen, mit

Basisschmierstoff betriebenen Stift nicht zu finden sind. Die nachgewiesenen Konzentrationen sind gering, die Verschleißschutzwirkung ist jedoch stark. Dies zeigt erneut, dass durch Anpassung der Additivdosierung wahrscheinlich auch tribologische Kontakte unter höherer mechanischer Beanspruchung erfolgreich geschützt werden können.

Zusammenfassend wirkt Engine Shield als Reibungs- und Verschleißmodifikator und geht sowohl eine mechanische als auch eine chemische Durchmischung mit den Oberflächen der tribologischen Kontaktpartner ein.

5 Zusammenfassung

Die Zusammenfassung hebt die Ergebnisse in vier wesentlichen tribologischen Kategorien hervor: Reibung, Verschleiß, Systemstabilität und Empfindlichkeit. Die Diskussion konzentriert sich auf das additivhaltige Öl, das durchgängig unter allen Betriebsbedingungen deutlich niedrigere Reibungskoeffizienten erzielt. Geringere Schwankungen verringern die Systemempfindlichkeit zusätzlich, insbesondere bei Lastwechseln. Bemerkenswert ist, dass auf dem Weg zu den höchsten mechanischen Beanspruchungen - Bedingungen mit hoher Last bei niedriger Gleitgeschwindigkeit - kein Reibungsanstieg beobachtet wird.

Das untersuchte Stift-Scheibe-System (verchromter Stahl gegen Grauguss) wurde gewählt, um die Kolbenring-/Zylinderlaufbuchsenkontakte in Verbrennungsmotoren anzunähern. Bei den höchsten Geschwindigkeiten wird ein verbessertes hydrodynamisches Verhalten beobachtet, was auf verringerte schädliche Oberflächenwechselwirkungen hindeutet. Die Profilometrie bestätigt ein deutlich reduziertes Verschleißniveau: Der Scheibenverschleiß sinkt von etwa 15-20 µm (Basisschmierstoff) auf etwa 1-4 µm (mit AUTOGAR® Engine Shield / TMF 2000®), wobei vor allem eine Glättung der Oberflächenrauheit erkennbar ist. RNT-Versuche zeigen ein gutes Einlaufvermögen des Systems, d. h., die Verschleißkurve erreicht im Bereich der Betriebspunkte bis zu 60 Stunden eine Sättigung. Dass ein vollständiges Einlaufen nicht erreicht wurde, ist auf die gewählten Betriebspunkte zurückzuführen. Durch Optimierung des Einlaufverfahrens ist eine vollständige Sättigung der Verschleißkurve möglich. Es ist zu erwarten, dass das System bei einem Einlaufvorgang unter hoher Last schnell in einen stabilen Zustand mit geringer Reibung, niedriger Verschleißrate, hoher Stabilität und geringer Empfindlichkeit übergehen würde.

Bei den höchsten Laststufen tritt zwar erhöhter Verschleiß auf, dieser bleibt jedoch deutlich unterhalb der Fressgrenzen. Dem könnte durch Zugabe eines EP-Additivs oder durch Änderung der Additivkonzentration begegnet werden.

Die Zugabe des Additivs während des Einlaufens beschleunigt diesen Vorgang und führt zu einer weiteren Reibungsreduktion. Da LP1 und LP2 keine hydrodynamischen Schmierungsbereiche darstellen, deutet die Reibungsreduktion darauf hin, dass das Additiv vorteilhafte tribochemische Reaktionen an den Oberflächen auslöst. Beim Wechsel vom additivierten Öl zurück zum Basisschmierstoff sind Nachwirkungen erkennbar, die den oberflächenaktiven Charakter des Additivs bestätigen. Das Additiv scheint an der Oberfläche chemisorbiert zu sein, sodass es beim Ölwechsel nicht abgewaschen wird.

Die XPS-Analyse bestätigt, dass das System auch ohne typische EP- oder AW-Additivkomponenten einen sehr guten Verschleißschutz aufweist. Obwohl die Konzentrationen verschleißmindernder Elemente wie Phosphor und Zink an der Oberfläche gering sind, ist die AW-Wirkung stark. Durch Anpassung der Additivkonzentration können auch stärker belastete tribologische Kontakte wirksam geschützt werden.

6

Anhang

Elemente	V1 Stift	V2 Stift_1	V2 Stift_2
C1s	89.1	74.4	84.0
O1s	8.7	18.6	10.7
Si2p	1.8	0.4	<.1
Ca2p	0.4	2.1	1.1
Mg1s	<.1	0.5	0.4
Cr2p3	<.1	<.1	<.1
Zn2p3	<.1	0.4	0.1
Mn2p3	<.1	<.1	0.5
Cu2p3	<.1	<.1	<.1
Mo3p3	<.1	<.1	<.1
Na1s	<.1	0.3	<.1
S2p	<.1	0.8	0.4
P2p	<.1	1.3	0.7
N1s	<.1	1.2	2.0
Fe2p3	<.1	<.1	<.1

Tabelle 1
Elementzusammensetzung aus der XPS-Analyse in At.-%.

Hinweis zur deutschen Fassung

Der Originalbericht des Fraunhofer IWM liegt in englischer Sprache vor. Diese deutsche Fassung ist eine KI-Übersetzung und kann daher fachliche oder sprachliche Fehler enthalten. Maßgeblich ist der englische Originalbericht.

Die Abbildungen wurden unverändert aus dem Original übernommen; darin enthaltene englische Beschriftungen wurden beibehalten.