

Dennis Fischer, Georg Jacobs, Gero Burghardt

Vergleich der Schmierfilmbildung im Kugel/Scheibe-Kontakt von öl- und fettgeschmierten EHD-Kontakten

Zusammenfassung:

Bei der Auslegung von fettgeschmierten Wälzlagern wird im Allgemeinen die Grundölviskosität genutzt, um damit die Ermüdungslebensdauer zu berechnen. Diese wird maßgeblich durch die Schmierfilmdicke im elastohydrodynamischen (EHD) Kontakt bestimmt. Neben Parametern wie Pressung und Temperatur wird der Schmierfilmaufbau wesentlich durch die Rollgeschwindigkeit beeinflusst. Bei fettgeschmierten EHD-Kontakten wird der Schmierfilmaufbau allerdings hauptsächlich durch das aus dem Fett ausgetretene, das sogenannte ausgeblutete Öl bestimmt, welches gegenüber reinem Grundöl veränderte Eigenschaften aufweisen kann. Im Betrieb können zusätzlich Teile des Verdickers in den Kontakt eindringen, durch welche der Schmierfilmaufbau beeinflusst wird. Dadurch stellt sich bei Fettschmierung eine andere Schmierfilmdicke bei gleicher Rollgeschwindigkeit als bei Grundöl ein. Abhängig von der Fettzusammensetzung wird ab einer charakteristischen Rollgeschwindigkeit eine Stagnation bzw. Abnahme der Schmierfilmdicke trotz weiterer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit beobachtet. Dieser Effekt wird als Starvation bezeichnet. Somit kann bei Annahme der Grundölviskosität für die Berechnung der Schmierfilmdicke fettgeschmierter Kontakte diese im Bereich von Starvation überschätzt werden.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung von Schmierfett, dem ausgebluteten Öl und dem korrespondierenden Grundöl gegenübergestellt und diskutiert. Die Versuche wurden an einem Kugel/Scheibe-Tribometer für unterschiedliche Schmierfette durchgeführt. Dabei konnten das Auftreten von Starvation abhängig von der Fettzusammensetzung identifiziert und die Unterschiede im Schmierfilmaufbau zwischen öl- und fettgeschmierten EHD-Kontakten ermittelt werden. Mit den Ergebnissen soll ein Systemverständnis aufgebaut werden, um eine Prognose des Schmierfilmaufbaus in fettgeschmierten EHD-Kontakten zu ermöglichen.

Abstract:

To calculate the service life time of grease lubricated rolling bearings, the base oil viscosity is generally assumed. The service life time of rolling bearings is significantly affected by the film formation in elastohydrodynamic (EHD) contacts which depends on operating conditions, like rotational speed. However, in grease lubricated EHD-contacts, the film formation is determined mainly by the bled oil, which is relieved by the grease during the operation. This bled oil might have different lubricating properties than the corresponding pure base oil. Moreover, parts of the thickener enter the contact zone, which additionally affect the film formation. Thus, the film thickness of grease lubricated contacts shows different values at same rotational speed, than contacts, which are lubricated with pure base oil. At a characteristic rotational speed, grease lubricated contacts show a stagnation or even reduction of film thickness with further increasing rotational speed. The effect of a decrease in film thickness although the rotational speed is increased, is called Starvation. Hence, by estimating the film thickness of grease lubricated contacts using the base oil viscosity leads to an overestimated film thickness for rotational speeds in the range of Starvation.

This report compares results of film thickness measurements of grease, bled oil and the corresponding pure base oil. The measurements were performed on a ball-on-disc tribometer for different grease compositions. Thereby, the characteristic rotational speed leading to the onset of Starvation could be identified in dependence of the grease composition. Furthermore, the differences in the film formation of oil and grease lubricated EHD-contacts could be emphasised. The investigations should help to establish an advanced understanding of the physical mechanisms to encourage future work with focus on a method to predict the film formation in grease lubricated EHD-contacts.

1 Einleitung

Die Lebensdauer und Reibung von Wälzlagern werden maßgeblich durch den verwendeten Schmierstoff sowie den Schmierfilmaufbau in elastohydrodynamischen (EHD) Kontakten beeinflusst. Gegenüber der Ölschmierung bietet die Fettschmierung einige Vorteile, wie geringe Wartungs- bzw. Wechselintervalle sowie Abdichtung gegen Feuchtigkeit und Schmutzpartikel [1]. Deswegen werden ca. 90 % aller Wälzlager, die sich im Einsatz befinden, fettgeschmiert [2]. Jedoch sind die physikalischen Zusammenhänge zur Beschreibung des Schmierfilmaufbaus in fettgeschmierten Wälzlagern nur ansatzweise geklärt. Daher wird in DIN ISO 281 [3] vorgeschlagen, zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer bei Fettschmierung die Grundölviskosität des Schmierfettes anzunehmen.

Arbeiten von Cousseau et al. [4] zeigen die Unterschiede im Schmierfilmaufbau zwischen fett- und ölgeschmierten Kontakten. Die Schmierfilmdicke wird neben Parametern wie

Pressung und Temperatur maßgeblich durch die Rollgeschwindigkeit beeinflusst. An einem Kugel/Scheibe-Tribometer wurden Schmierfilmdickenmessungen bei steigender Rollgeschwindigkeit mit Schmierfett und Grundöl durchgeführt und die Ergebnisse gegenübergestellt. Bei den Messungen mit Schmierfett wurde der Kontakt gezielt nachgeschmiert, so dass immer ein vollständiger Fettfilm für den Schmierfilmaufbau zur Verfügung stand. Bei gleicher Rollgeschwindigkeit stellte sich bei Fettschmierung eine höhere Schmierfilmdicke als bei Schmierung mit dem korrespondierenden Grundöl ein. Die Annahme der Grundölviskosität bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer, wie in DIN ISO 281 [3] vorgeschlagen, ist damit eine Abschätzung zur sicheren Seite. In der Praxis erfolgt jedoch in der Regel keine Nachschmierung der Wälzlager, sodass die Kontakte nicht immer vollständig mit Fett versorgt sind. Daher ist es notwendig auch Schmierfilmdickenmessungen ohne Nachschmierung zu betrachten.

Bei Messungen am Kugel/Scheibe-Tribometer ohne Nachschmierung wird vor der Messung ein Fettfilm einmalig auf der Scheibe aufgetragen. Da nicht nachgeschmiert wird, nimmt die Schmierfilmdicke ab einer bestimmten Rollgeschwindigkeit aufgrund mangelnder Schmierstoffversorgung ab. Dieser Effekt der Verarmung im Kontakt wird als Starvation bezeichnet. Nach Cann et al. [5] tritt Starvation auf, wenn die Schmierfilmdicke geringer ist als die des korrespondierenden Grundöls.

Im Allgemeinen wird angenommen, dass bei fettgeschmierten Kontakten die Schmierfilmbildung hauptsächlich durch das aus dem Fett ausgetretene, das sogenannte ausgeblutete Öl bestimmt wird [4]. Daher wurde in [4] auch dieses hinsichtlich der Schmierfilmbildung vermessen und den Ergebnissen der Schmierfett- und Grundölmessungen gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Schmierfilmdicke des ausgebluteten Öls in der Regel höher ist als die des Grundöls und teilweise dieselbe Schmierfilmdicke wie bei Fettschmierung aufweist. Dies wird mit der höheren Viskosität des ausgebluteten Öls begründet.

In diesem Beitrag sollen die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung von Schmierfett mit und ohne Nachschmierung, dem ausgebluteten Öl sowie dem korrespondierenden Grundöl gegenübergestellt und diskutiert werden. Dabei wird das Auftreten von Starvation abhängig von der Fettzusammensetzung identifiziert und die Unterschiede im Schmierfilmaufbau zwischen öl- und fettgeschmierten EHD-Kontakten herausgestellt. Mit den Ergebnissen soll ein Systemverständnis aufgebaut werden, um eine Prognose des Schmierfilmaufbaus in fettgeschmierten EHD-Kontakten zu ermöglichen.

2 Methode und Schmierstoffe

Im Folgenden wird zunächst das Messprinzip der Schmierfilmdickenmessung am Kugel/Scheibe-Tribometer, dem EHD2-Tribometer der Firma PCS-Instruments, erläutert. In diesem Beitrag werden zwei unterschiedliche Schmierfette, deren ausgebluteten Öle sowie die korrespondierenden Grundöle untersucht. Außerdem wird das Verfahren vorgestellt, mit dem das ausgeblutete Öl aus dem Schmierfett extrahiert wurde.

2.1 Schmierfilmdickenmessung

Mit dem Kugel/Scheibe-Tribometer kann die Schmierfilmdicke an einem Punkt im Zentrum des EHD-Kontaktes gemessen werden. Dabei können Kontaktpressung (ca. 400 MPa bis 700 MPa) und Umgebungs- bzw. Schmierstofftemperatur (bis ca. 150 °C)

variiert werden. Bei dem EHD2-Tribometer wird eine polierte Stahlkugel mit einem Durchmesser von 19,05 mm von unten gegen eine Glasscheibe gepresst. Beide Körper haben eine Rauheit von $R_a = 0,02 \mu\text{m}$, sodass eine vollständige Trennung der Oberflächen für alle Versuche vorliegt. Insbesondere relevant für den Schmierfilmaufbau in EHD-Kontakten ist die Rollgeschwindigkeit der Kontaktpartner, die sogenannte hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit. Diese ist definiert als das Mittel der Umfangsgeschwindigkeiten im Kontaktpunkt von Kugel und Scheibe (Gl. 2.1). Rotieren beide Körper mit unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeit im Kontaktpunkt oder in entgegengesetzter Richtung, so tritt zusätzlich Gleiten auf (Gl. 2.2). Das Verhältnis von Gleit- zu Rollgeschwindigkeit wird als Slide-Roll-Ratio (SRR, Gl. 2.3) bezeichnet. Bei den im Rahmen dieses Beitrags durchgeführten Messungen wird ideales Abrollen, d.h. ein SRR von 0% eingestellt. Die Messungen erfolgen bei stufenweiser Erhöhung der Rollgeschwindigkeit.

$$u_{\text{Roll}} = \frac{(u_{\text{Scheibe}} + u_{\text{Kugel}})}{2} \quad \text{Gl. 2.1}$$

$$u_{\text{Gleit}} = u_{\text{Scheibe}} - u_{\text{Kugel}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

$$\text{SRR} = \frac{u_{\text{Gleit}}}{u_{\text{Roll}}} \quad \text{Gl. 2.3}$$

In Abbildung 1 ist das Kugel/Scheibe-Tribometer mit der optischen Messapparatur zur Bestimmung der Schmierfilmdicke skizziert. Über der Glasscheibe sind ein Objektiv und eine Lichtquelle positioniert. Die Lichtstrahlen werden durch das Objektiv geleitet und teilweise an der Glasscheibe und teilweise an der Oberfläche der Stahlkugel reflektiert. Dadurch ergibt sich eine Phasenverschiebung und es können im Spektrometer Interferenzen der reflektierten Lichtstrahlen gemessen werden. Über die Phasenverschiebung und die Interferenzen kann die Schmierfilmdicke mit einer Genauigkeit von bis zu 1 nm bestimmt werden. Verfahrensbedingt kann nur an einem Punkt im Zentrum des EHD-Kontaktes, d.h. die zentrale Schmierfilmdicke gemessen werden. Eine ausführliche Erläuterung der Messmethode ist in [6] beschrieben.

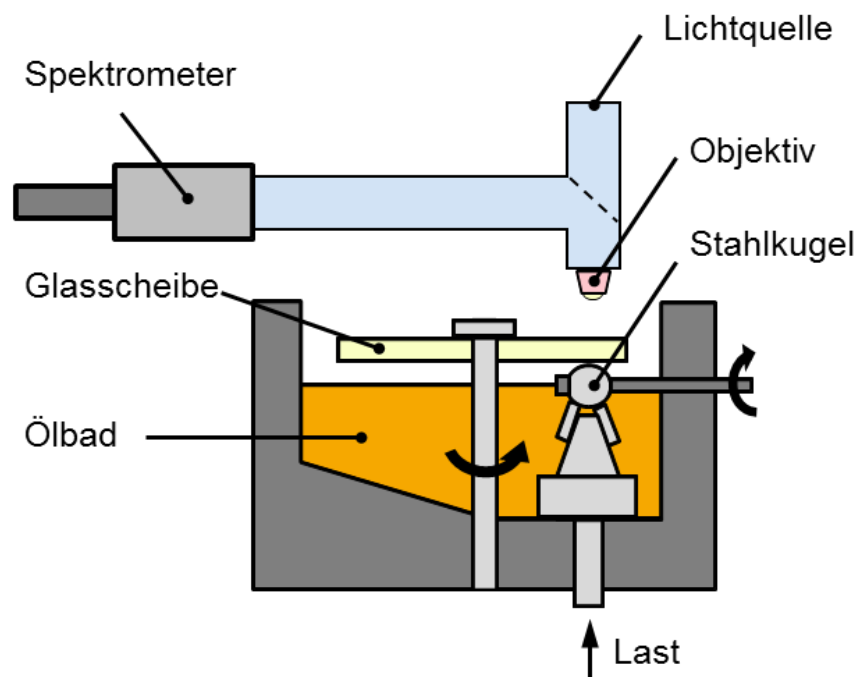


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Kugel/Scheibe-Tribometers zur Schmierfilmdickenmessung

2.2 Schmierstoffe

Die untersuchten Schmierfette sind der Konsistenzklasse NLGI 2 zuzuordnen und ohne Additivzusätze. Es werden ein Poly- α -Olephin (PAO) Lithium-Komplex (Li) Fett und ein Polyalkylenglykolen (PAG) Lithium-Komplex Fett vermessen. Ebenfalls wurden auch die ausgebluteten Öle und die korrespondierenden Grundöle PAO und PAG einzeln untersucht. Die Grundölviskosität beider Öle beträgt 100 mm/s bei 40 °C.

Grundöl	Verdicker	Grundölviskosität (40 °C)	Abkürzung	NLGI
PAO	Lithium-Komplex	100 mm/s	PAO-Li-100	2
PAG	Lithium-Komplex	100 mm/s	PAG-Li-100	2

Tabelle 1: Auswahl der vermessenen Schmierstoffe

2.3 Verfahren für die Ausblutversuche

Die Ausblutversuche zur Extraktion des Öls aus dem Schmierfett werden in Anlehnung an DIN 51817 [7] durchgeführt. Der Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt und besteht aus einem konischen Sieb, einem darüber stehenden Flansch, einer Schüssel zum Sammeln des Öls und einem Auflagegewicht. Der Flansch wird mit Fett befüllt und die Apparatur bei einer konstanten Temperatur sieben Tage lang gelagert. In der Schüssel unter dem Sieb sammelt sich das ausgeblutete Öl.



Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau der konstruierten Ausblutapparatur

3 Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessungen gezeigt. Zunächst wird die Messprozedur vorgestellt, mit der es möglich ist die Schmierfilmdicke fettgeschmierter Kontakte am Kugel/Scheibe-Tribometer reproduzierbar zu messen und das Auftreten von Starvation nachzuweisen. Anschließend werden die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessungen für die Schmierfette PAO-Li-100 und PAG-Li-100 sowie deren ausgeblutete Öle und korrespondierenden Grundöle miteinander verglichen. Die Messungen wurden bei 700 MPa Hertzscher Pressung und 40 °C durchgeführt.

3.1 Messprozedur

Die Schmierfilmdickenmessung fettgeschmierter Kontakte auf einem Kugel/Scheibe-Tribometer kann zum einen mit Nachschmierung und zum anderen ohne Nachschmierung erfolgen. Wie in der Einleitung beschrieben, kann dies einen Einfluss auf den Schmierfilmaufbau haben. Bei der Messung mit Nachschmierung wird ein Zusatzelement, der sogenannte Scoop, unmittelbar vor den EHD-Kontakt gesetzt (siehe Abbildung 3). Dieses trapezförmige Fettreservoir wird über eine Feder von unten gegen die eingefettete Scheibe gedrückt, sodass das Schmierfett vor dem Kontakt zusammengeführt wird. In diesem Zustand ist der Kontakt stets vollgeschmiert und das Auftreten von Starvation wird verhindert.

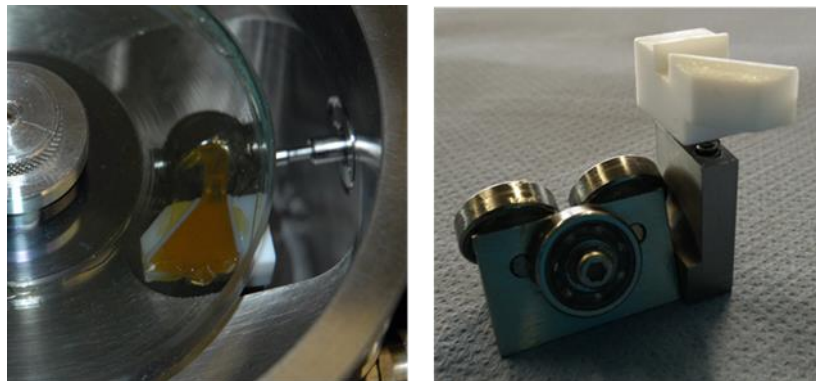


Abbildung 3: Scoop zur Messung fettgeschmierter Kontakte mit Nachschmierung

Bei der Schmierfilmdickenmessungen ohne Nachschmierung wird ein Fettfilm mit einer definierten Höhe von ca. 0,1 bis 0,2 mm einmalig vor der Messung auf die Scheibe aufgetragen. Abbildung 4 zeigt die Fettlehre, mit der das Schmierfett definiert aufgetragen wird. Um das Schmierfett vor der Messung gleichmäßig auf der Laufspur zu verteilen, wird der Schmierfilmdickenmessung eine sog. Einlaufphase von 15 min mit konstanter Rollgeschwindigkeit vorangestellt. Mit dieser Prozedur sind reproduzierbare Schmierfilmdickenmessungen für fettgeschmierte Kontakte ohne Nachschmierung möglich.

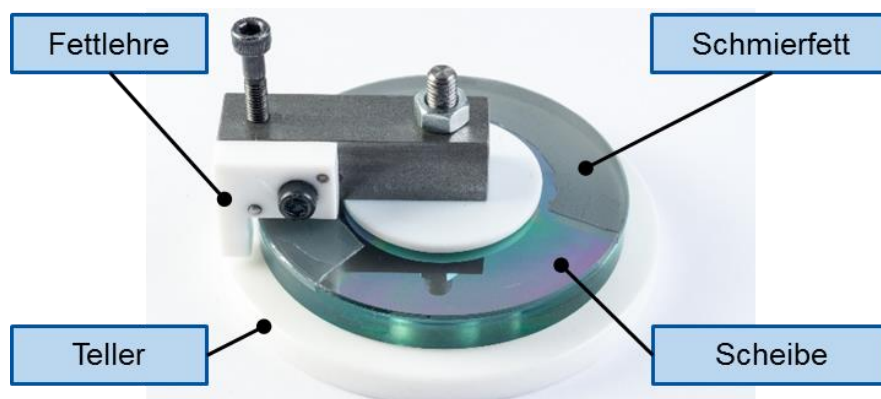
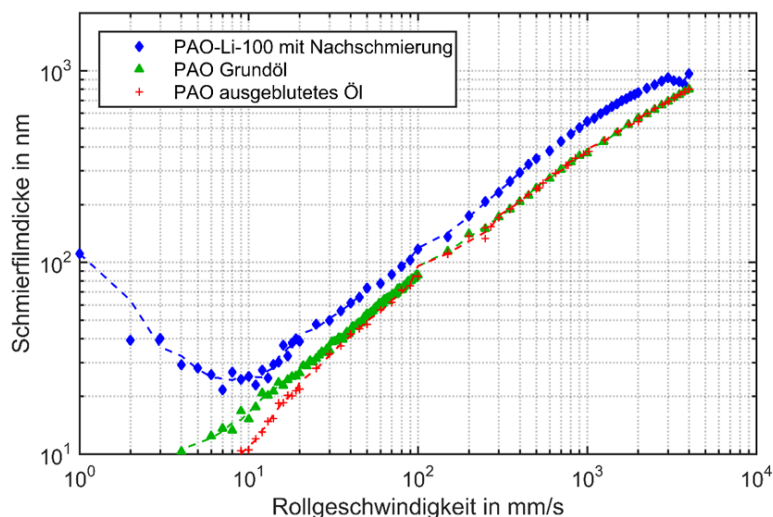


Abbildung 4: Auftragen von Schmierfett mittels Fettlehre

3.2 Ergebnisse PAO-Li-100

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung des Schmierfettes PAO-Li-100, dessen Grundöl PAO und des ausgebluteten Öls dargestellt.

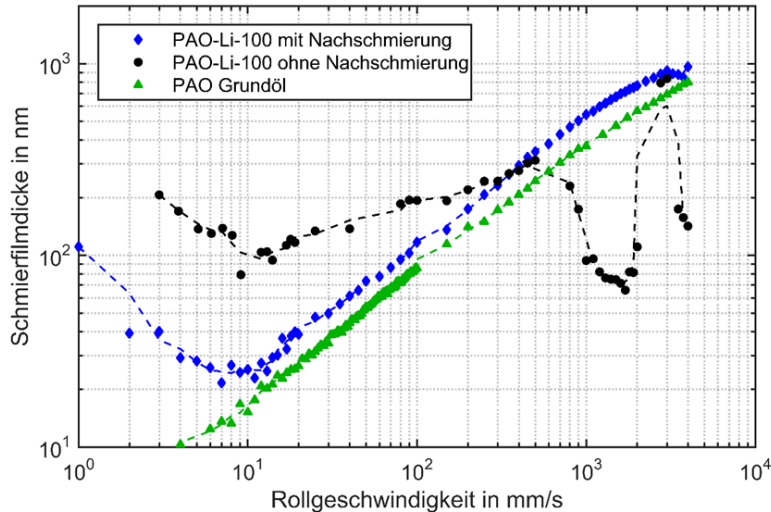
In Abbildung 5 ist der Verlauf der Schmierfilmdicke für Schmierfett, Grundöl und ausgeblutetes Öl über der Rollgeschwindigkeit dargestellt. Im doppellogarithmischen Diagramm ist ein annähernd linearer Anstieg der Schmierfilmdicke des Grundöls erkennbar. Bei der Messung mit Schmierfett wurde der Scoop eingesetzt, sodass der Kontakt stets mit Schmierstoff versorgt wurde und kein Starvation auftreten kann. Im Bereich der Rollgeschwindigkeit von 1 mm/s bis ca. 15 mm/s sinkt die Schmierfilmdicke zunächst ab und steigt mit weiterer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit von 15 mm/s auf 4000 mm/s linear an. Im gesamten Bereich wird durch das Schmierfett eine höhere Schmierfilmdicke aufgebaut als bei Schmierung mit Grundöl. Die Rollgeschwindigkeit im Wendepunkt wird als Transition-Speed [8] bezeichnet und liegt bei PAO-Li-100 bei ca. 10 mm/s. Des Weiteren wurde ausgeblutetes Öl aus PAO-Li-100 hinsichtlich der Schmierfilmbildung vermessen und der Messung mit dem korrespondierenden Grundöl gegenübergestellt. Dabei kann keine Schmierspaltaufweitung bei ausgeblutetem Öl gegenüber dem Grundöl festgestellt werden.



Parameter bei der Schmierfilmdickenmessung	
Schmierfett	PAO-Lithium
Grundöl	PAO
Viskosität (40 °C)	100 mm ² /s
Pressung	700 MPa
Temperatur	40 °C
Geschwindigkeit	1 – 4000 mm/s

Abbildung 5: Schmierfilmdicke von Fett mit Nachschmierung, Grundöl und ausgeblutetem Öl

Um das Auftreten von Starvation am Kugel/Scheibe-Tribometer nachzuweisen, wurden Messungen mit Schmierfett ohne Nachschmierung, wie in Kapitel 3.1 erläutert, durchgeführt. In Abbildung 6 sind die Verläufe der Schmierfilmdicken von Grundöl, Fett mit und ohne Nachschmierung gegenübergestellt. Der Verlauf der Schmierfilmdicke von Fett ohne Nachschmierung zeigt im Bereich geringer Rollgeschwindigkeiten bis ca. 200 mm/s eine höhere Schmierfilmdicke als bei der Messung mit Nachschmierung. Ab ca. 200 mm/s überschneiden sich die Kurven mit und ohne Nachschmierung und ab ca. 500 mm/s tritt mit dem Absinken der Schmierfilmdicke Starvation auf. Ab ca. 2000 mm/s steigt die Schmierfilmdicke wieder an.



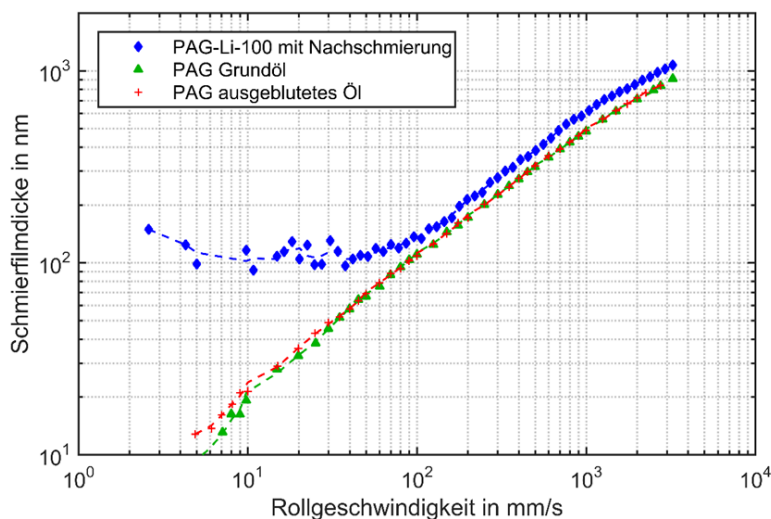
Parameter bei der Schmierfilmdickenmessung	
Schmierfett	PAO-Lithium
Grundöl	PAO
Viskosität (40 °C)	100 mm ² /s
Pressung	700 MPa
Temperatur	40 °C
Geschwindigkeit	1 – 4000 mm/s

Abbildung 6: Schmierfilmdicke von Fett mit und ohne Nachschmierung sowie von Grundöl

3.3 Ergebnisse PAG-Li-100

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung des Schmierfettes PAG-Li-100, des Grundöls PAG und des ausgebluteten Öls dargestellt.

Im Verlauf der Schmierfilmdicke bei Fett mit Nachschmierung zeigt sich ebenso wie bei PAO-Li-100 ein Wendepunkt und eine Schmierspaltaufweitung gegenüber dem Grundöl (Abbildung 7). Im Gegensatz zum Verlauf des PAO-Li-100 ist jedoch der Bereich um den Wendepunkt zwischen 10 mm/s und 40 mm/s flacher ausgeprägt, sodass es nicht möglich ist eine eindeutige Rollgeschwindigkeit als Transition-Speed zu identifizieren. Außerdem ist die Schmierfilmdicke in diesem Bereich um ca. 75 nm höher.

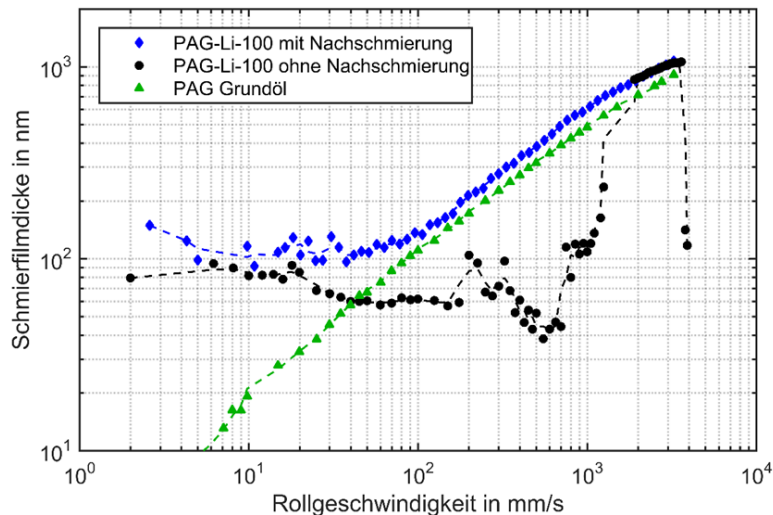


Parameter bei der Schmierfilmdickenmessung	
Schmierfett	PAG-Lithium
Grundöl	PAG
Viskosität (40 °C)	100 mm ² /s
Pressung	700 MPa
Temperatur	40 °C
Geschwindigkeit	1 – 4000 mm/s

Abbildung 7: Schmierfilmdicke von Fett mit Nachschmierung, Grundöl und ausgeblutetem Öl

Des Weiteren ist in Abbildung 7 der Verlauf der Schmierfilmdicke von ausgeblutetem Öl dargestellt. Ebenso wie bei dem Vergleich zwischen dem Grundöl PAO und ausgeblutetem PAO kann hier keine Schmierspaltaufweitung nachgewiesen werden.

Abbildung 8 zeigt die Verläufe der Schmierfilmdicke für das Grundöl PAG sowie für das Schmierfett PAG-Li-100 mit und ohne Nachschmierung. Die Schmierfilmdicke bei der Messung ohne Nachschmierung zeigt zunächst ein konstantes Niveau und ein leichtes Absinken ab ca. 20 mm/s. Dabei ist der Betrag der Schmierfilmdicke stets unter dem der Messung mit Nachschmierung. Ab ca. 40 mm/s tritt Starvation auf, da hier die Schmierfilmdicke unter die des Grundöls fällt.



Parameter bei der Schmierfilmdickenmessung	
Schmierfett	PAG-Lithium
Grundöl	PAG
Viskosität (40 °C)	100 mm ² /s
Pressung	700 MPa
Temperatur	40 °C
Geschwindigkeit	1 – 4000 mm/s

Abbildung 8: Schmierfilmdicke Fett mit und ohne Nachschmierung sowie von Grundöl

4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung der untersuchten Schmierstoffe zeigen eine Schmierspaltaufweitung bei Fett mit Nachschmierung gegenüber dem korrespondierenden Grundöl. Der EHD-Kontakt wird vermutlich nicht nur durch das ausgeblutete Öl geschmiert, sondern durch das gezielte Zuführen des Schmierfettes über den Scoop treten zusätzlich Teile des Verdickers in den Kontakt ein. Diese Verdickerteile stellen Festkörper dar, sodass der Schmierspalt im EHD-Kontakt aufgeweitet wird. Der Verlauf mit Wendepunkt ist in Übereinstimmung mit Messungen in der Literatur [8–10]. Die Messungen mit PAO-Li-100 und PAG-Li-100 sowie die Messungen in der Literatur zeigen, dass Transition-Speed und Schmierfilmdicke abhängig von der Fettzusammensetzung variieren können.

In [11] wurde gezeigt, dass das Auftreten einer Schmierspaltaufweitung bei ausgeblutetem Öl gegenüber dem Grundöl abhängig von der Fettzusammensetzung ist, da diese die Eigenschaften, wie die Viskosität des ausgebluteten Öls beeinflusst. Bei den ausgebluteten Ölen, welche hier untersucht wurden, konnte keine Schmierspaltaufweitung gegenüber den Grundölen festgestellt werden. Somit wird vermutet, dass in diesem Fall die Eigenschaften der ausgebluteten Öle sich nur geringfügig von den denen der Grundöle unterscheiden.

Bei den Messungen ohne Nachschmierung konnte für PAO-Li-100 das Auftreten von Starvation ab einer Rollgeschwindigkeit von ca. 500 mm/s und für PAG-Li-100 ab ca. 40 mm/s nachgewiesen werden. Abbildung 9 zeigt eine mögliche Erklärung für das Auftreten von Starvation auf dem Kugel/Scheibe-Tribometer. Nachdem die Kugel eine

Laufspur in die aufgetragene Fettschicht geprägt hat, fließt von den Seiten ausgeblutetes Öl in den Kontaktbereich, welches bei der nächsten Überrollung der Kugel den EHD-Kontakt schmiert. Durch das erneute Überrollen der Kugel wird das ausgeblutete Öl zunächst verdrängt und fließt, getrieben durch Oberflächenspannung, hinter der Kugel wieder zurück (Replenishment) [12]. Bei höheren Rollgeschwindigkeiten ist die Überrollfrequenz der Kugel so hoch, dass das Öl nicht schnell genug zurückfließen kann, um eine ausreichende Schmierung des Kontaktes zu ermöglichen. Somit kommt es zu einer Verarmung an Schmierstoff im Kontakt (Starvation) und die Schmierfilmdicke nimmt mit weiterer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit ab.

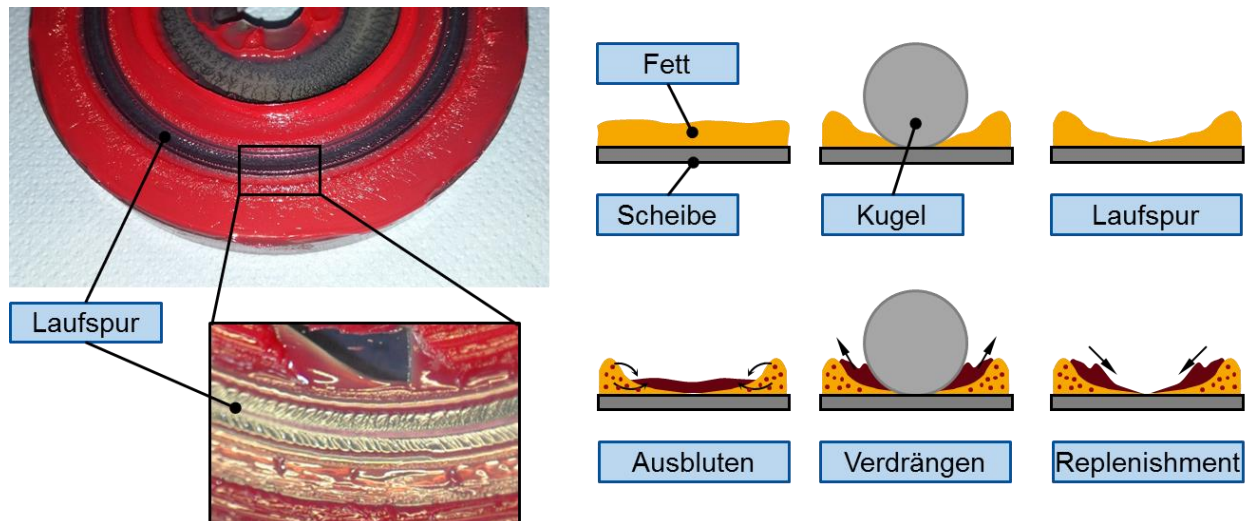


Abbildung 9: Modellvorstellung zum Auftreten von Starvation

Die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung mit PAG-Li-100 zeigen, dass die Schmierfilmdicke der Messung ohne Nachschmierung stets unter der Kurve der Messung mit Nachschmierung liegt, sodass vermutet wird, dass schon bei geringen Rollgeschwindigkeiten zu wenig Schmierstoff im Kontakt bereitgestellt wird. Die Schmierfilmdicke steigt nicht an, sondern verläuft nahezu konstant mit weiterer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit. Dieses Verhalten und das frühe Auftreten von Starvation kann mit einem schlechteren Ausblutverhalten des Schmierfettes PAG-Li-100 gegenüber PAO-Li-100 korreliert werden. Die Ergebnisse der Ausblutversuche zeigen, dass die Ölabscheidung aus PAG-Li-100 mit ca. 2,20 % gegenüber der Ölabscheidung aus PAO-Li-100 mit ca. 4,14 % deutlich geringer ausfällt. Durch die geringere Ölabscheidung kann eine Schmierstoffverarmung bei den Versuchen am Kugel/Scheibe-Tribometer schon bei niedrigen Rollgeschwindigkeiten erklärt werden.

Da der Verdicker in beiden Schmierfetten gleich ist, sind die Unterschiede im Schmierfilmaufbau vermutlich auf das Grundöl als Schmierfettkomponente zurückzuführen. Wie schon beschrieben, weist das Schmierfett PAG-Li-100 einen deutlich schlechteren Schmierfilmaufbau und früheres Auftreten von Starvation im Vergleich mit PAO-Li-100 auf. Somit konnte der Einfluss der Fettzusammensetzung auf die Schmierfilmbildung bei Variation des Grundöls gezeigt werden.

Beide Schmierfette zeigen bei den Messungen ohne Nachschmierung bei Rollgeschwindigkeiten größer als 2000 mm/s eine Erholungsphase [13], in der die Schmierfilmdicke wieder ansteigt. Dieser Bereich bei höheren Rollgeschwindigkeiten wird als nicht interpretierbar gewertet, da hier vermutlich Fliehkräfte auf das seitlich

abgelagerte Schmierfett wirken. Dadurch wird dieses in Richtung EHD-Kontakt gefördert und das Schmierstoffangebot im Kontakt steigt wieder an, sodass sich ein vollständiger Schmierfilm ausbilden kann.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessungen von zwei Schmierfetten unterschiedlicher Zusammensetzung, deren ausgebluteten Ölen und korrespondierenden Grundölen gegenübergestellt und diskutiert.

Bei dem Vergleich der Schmierfette konnte gezeigt werden, dass in beiden Fällen die Schmierfilmdicke, bei nachgeschmierten Kontakten, höher ist als die des Grundöls. Diese Schmierspaltaufweitung wird vermutlich durch Teile des Verdickers, welche in den Kontakt gefördert werden, begünstigt.

Eine mögliche Schmierspaltaufweitung von ausgeblutetem Öl gegenüber dem Grundöl ist abhängig von der Fettzusammensetzung und konnte bei den untersuchten Schmierstoffen nicht nachgewiesen werden.

Bei Messungen ohne Nachschmierung konnte das Auftreten von Starvation für beide Schmierfette bei unterschiedlichen Rollgeschwindigkeiten nachgewiesen werden. Es wurde gezeigt, dass durch Variation des Grundöls bei der Fettzusammensetzung der Schmierfilmaufbau maßgeblich beeinflusst werden kann. Ein frühes Auftreten von Starvation ist vermutlich auf ein schlechtes Ausblutverhalten zurückzuführen, welches sich in statischen Ausblutversuchen widerspiegelt.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) sowie den beteiligten Mitgliedsunternehmen für die Unterstützung des IGF-Vorhabens N/1 19027, das über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Lugt P.M. Grease lubrication in rolling bearings. John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2013.
- [2] Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Wälzlagerpraxis. Vereinigte Fachverlage, Mainz 2015.
- [3] N. N. DIN ISO 281: Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- [4] Cousseau T., Björling M., Graça B., Campos A., Seabra J., Larsson R. Film thickness in a ball-on-disc contact lubricated with greases, bleed oils and base oils. Tribology International 2012;53:53–60.
- [5] Cann P.M., Spikes H. Film thickness measurements of lubrication greases under normally starved conditions. NLGI Spokesman 1992;56(2)
- [6] Hentschke C. Abschlussbericht FVA Vorhaben 580-I Dünne Schmierfilme. FVA Frankfurt 2013.

- [7] N. N. DIN-51817: Bestimmung der Ölabscheidung aus Schmierfetten unter statischen Bedingungen. Beuth Verlag, Berlin 2014.
- [8] Morales-Espejel G.E., Lugt P.M., Pasaribu H.R., Cen H. Film thickness in grease lubricated slow rotating rolling bearings. Tribology International 2014;74:7–19.
- [9] Laurentis N., Kadiric A., Lugt P.M., Cann P.M. The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts. Tribology International 2016;94:624–632.
- [10] Cen H., Lugt P.M., Morales-Espejel G.E. Film thickness of mechanically worked lubricating grease at very low speeds. Tribology Transactions 2014;57:1066–1071.
- [11] Gonçalves D.E.P. Polymer greases film thickness friction and thermal degradation. Dissertation, Universität Porto 2016.
- [12] Cann P.M. Starvation and reflow in a grease-lubricated elastohydrodynamic contact. Tribology Transactions 1996;39:3:698–704.
- [13] Vengudusamy B., Kuhn M., Rankl M., Spallek R. Film forming behavior of greases under starved and fully flooded EHL conditions. Tribology Transactions 2016;59:62–71.