



Einfluss des Grundöltypes in Schmierfetten auf die Schmier-
filmbildung in EHD Kontakten

Effect of base oil type in lubricating greases on the film forma-
tion in EHD contacts

D. Fischer*¹

G. Jacobs¹, A. Stratmann¹

¹Institut für Maschinenelemente und System Engineering
Schinkelstraße 10, 52062 Aachen, Deutschland

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	1
2	Einleitung.....	1
3	Methoden und Ergebnisse	3
3.1	Schmierstoffe Versuchsdurchführung.....	3
3.2	Ausblutversuche	6
3.3	Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung.....	7
4	Zusammenfassung und Fazit.....	9
5	Literaturverzeichnis	10

1 Abstract

Bei der Auslegung von fettgeschmierten Wälzlagern wird im Allgemeinen die Grundölviskosität herangezogen, um damit die Ermüdungslebensdauer zu berechnen. Diese wird maßgeblich durch die Schmierfilmbildung im elastohydrodynamischen (EHD) Kontakt bestimmt. Neben Parametern wie Pressung und Temperatur wird der Schmierfilmaufbau m 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, welche den Schmierfilmaufbau beeinflussen. Dadurch stellt sich bei gleicher Rollgeschwindigkeit in fettgeschmierten Kontakten eine andere Schmierfilmdicke 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 mit Annahme der Grundölviskosität bei der Berechnung der Schmierfilmdicke fettgeschmierter Kontakte, diese im Bereich von Starvation überschätzt werden.

Allerdings sind die Mechanismen, die die Schmierfilmbildung in fettgeschmierten EHD Kontakten bestimmen, bisher nicht vollständig geklärt. Daher soll in diesem Beitrag der Einfluss des Grundöltyps in der Fettzusammensetzung auf die Schmierfilmbildung identifiziert werden. Dazu werden die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessungen von Schmierfetten mit unterschiedlichen Grundöltypen, aber identischen Verdickertypen gegenübergestellt und diskutiert. Mit den Ergebnissen soll ein Systemverständnis aufgebaut werden, um zukünftig ein Modell zur Prognose des Schmierfilmaufbaus in fettgeschmierten EHD-Kontakten ableiten zu können.

2 Einleitung

Reibung und Verschleiß von Wälzlagern werden maßgeblich durch den verwendeten Schmierstoff und die resultierende Schmierfilmbildung im Wälzkontakt beeinflusst. Daher wird bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer ölgeschmierter Wälzlager, die Schmierfilmdicke bzw. der Schmierungsstatus indirekt über die kinematische Viskosität im Betrieb berücksichtigt [DIN07]. Da Fettschmierung gegenüber der Ölschmierung allerdings einige Vorteile bietet, wie geringe Wartungs- bzw. Wechselintervalle sowie Abdichtung gegen Feuchtigkeit und Schmutzpartikel aus der Umgebung, werden ca. 90 % aller Wälzlager fettgeschmiert [Sch15]. Die physikalischen Zusammenhänge zur Beschreibung des Schmierfilmaufbaus in fettgeschmierten elastohydrodynamischen (EHD) Kontakten sind bisher jedoch nur ansatzweise geklärt [Lug09]. Daher wird häufig

zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer fettgeschmierter Wälzlager die Grundölviskosität des Schmierfettes herangezogen, um darüber den Schmierungszustand abzuschätzen [DIN07].

In fettgeschmierten EHD Kontakten wird der Schmierfilmaufbau durch das aus dem Fett ausgetretene Öl, das sogenannte ausgeblutete Öl, sowie Verdickerpartikel, welche unter Schereinfluss aus der Verdickermatrix freigesetzt werden und in den Kontakt eindringen können, bestimmt [Can92]. Wie Abbildung 1 zeigt, stellt sich dadurch bei Fett-schmierung gegenüber Ölschmierung eine veränderte Schmierfilmdicke bei gleicher Rollgeschwindigkeit ein [Gon15]; [Nag12]. Abhängig von der Fettzusammensetzung und Betriebsparametern, kann es jedoch ab einer bestimmten Rollgeschwindigkeit zu einer Stagnation bzw. Abnahme der Schmierfilmdicke bei weiterer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit kommen [Ven16]; [Fis18]; [Sak17]. Dieser Effekt wird in der Literatur als Starvation bezeichnet und beschreibt einen Mangel an Schmierstoff im Kontakt. Nach WILSON [Wil79] tritt Starvation auf, wenn die Schmierfilmdicke geringer ist als die des korrespondierenden Grundöls. Diese Definition wird in diesem Beitrag bei der Diskussion der Ergebnisse verwendet.

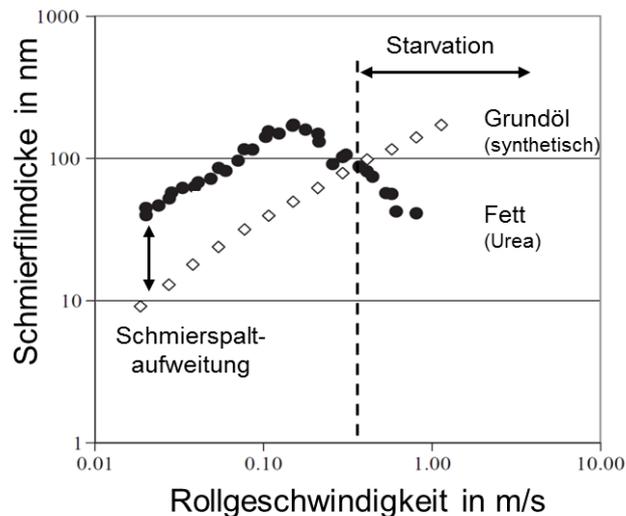


Abbildung 1: Vergleich der Schmierfilmdicken Grundöl/Fett [Nag12]

Folglich kann unter der Annahme der Grundöleigenschaften die Schmierfilmdicke fettgeschmierter Kontakte im Bereich von Starvation überschätzt werden und zu Unsicherheiten bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer führen.

Im Allgemeinen ist das Auftreten von Starvation abhängig vom Schmierstoffangebot, welches maßgeblich durch die vorhandene Schmierstoffmenge und -strömung um den EHD Kontakt bestimmt wird. Die Effekte, die das Schmierstoffangebot beeinflussen sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Abhängig vom Ausblutverhalten eines Schmierfettes, wird eine bestimmte Menge an ausgeblutetem Öl bereitgestellt. Das Zurückfließen von Schmierstoff hinter dem Wälzkörper nach einer Überrollung, wird in der Literatur als Replenishment bezeichnet und wird maßgeblich durch Oberflächenspannungen des

Schmierstoffs in Kontaktnähe getrieben [Chi74]; [Åst93]; [Jac99]. Bei hohen Rollgeschwindigkeiten kann aufgrund häufiger Überrollungen der verdrängte Schmierstoff nicht schnell genug in die Laufbahn der Wälzkörper zurückfließen. Dies kann dazu führen, dass dem nächsten Kontakt zu wenig Schmierstoff für eine vollständige Schmierfilmbildung bereitgestellt wird und Starvation auftritt. Das Replenishment wird somit, neben den Fließeigenschaften des Schmierstoffes, zusätzlich durch die Überrollfrequenz beeinflusst [Can97]; [Ger08].

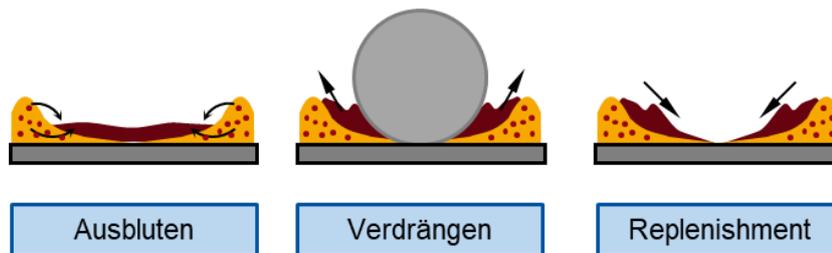


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Ausbluten und Replenishment

Um die Einflüsse durch den Grundöltyp in der Fettzusammensetzung auf das Auftreten von Starvation zu identifizieren, wurden Schmierfilmdickenmessungen fettgeschmierter EHD Kontakte an einem Kugel/Scheibe-Tribometer durchgeführt. Des Weiteren wurden Ausblutversuche durchgeführt, um das Ausblutverhalten, d.h. die Fähigkeit eines Fettes Öl abzugeben, zu bestimmen und dieses mit den Ergebnissen der Schmierfilmdickenmessungen zu korrelieren. Mit den Ergebnissen soll ein Systemverständnis der relevanten Mechanismen, welche zum Auftreten von Starvation führen, aufgebaut werden, um zukünftig ein Modell zur Prognose des Schmierfilmaufbaus in fettgeschmierten EHD Kontakten ableiten zu können.

3 Methoden und Ergebnisse

3.1 Schmierstoffe Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen des Einflusses des Grundöltyps auf die Schmierfilmbildung wurden drei Fette mit einem Lithium-Komplex (Li) Verdicker und unterschiedlichen Grundölen verwendet. Alle Fette wurden mit demselben Lithium-Komplex Verdicker hergestellt. Dabei wurden die Grundöltypen Polyalphaolephin (PAO), Polyalkylenglykolen (PAG) und Ester für die Fettzusammensetzungen gewählt. Die untersuchten Schmierfette sind der Konsistenzklasse NLGI 2 zuzuordnen und ohne Additivzusätze. Zusätzlich wurden die korrespondierenden Grundöle PAO, PAG und Ester untersucht, welche als Referenz zu den Schmierfilmdickenmessungen mit Fett dienen. Die Eigenschaften der Schmierstoffe und die verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Grundöl	Verdickeran- teil	Viskosität bei 40 °C	Viskosität bei 80 °C	Abkürzung
PAO	22 m%	98,0 mm ² /s	22,1 mm ² /s	PAO-Li-100
PAG	26 m%	141,7 mm ² /s	40,6 mm ² /s	PAG-Li-140
Ester	25 m%	91,4 mm ² /s	21,4 mm ² /s	E-Li-90

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Schmierstoffe

Mit dem Kugel/Scheibe-Tribometer kann die Schmierfilmdicke an einem Punkt im Zentrum des EHD Kontaktes gemessen werden. Bei dem vorhandenen EHD2-Tribometer der Firma PCS Instruments können Kontaktpressung (ca. 400 MPa bis 700 MPa) und Umgebungs- bzw. Schmierstofftemperatur (bis ca. 150 °C) variiert werden. Dabei 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.

$$u_{\text{Roll}} = \frac{(u_{\text{Scheibe}} + u_{\text{Kugel}})}{2} \quad \text{Formel 1}$$

$$u_{\text{Gleit}} = u_{\text{Scheibe}} - u_{\text{Kugel}} \quad \text{Formel 2}$$

$$\text{SRR} = \frac{u_{\text{Gleit}}}{u_{\text{Roll}}} \quad \text{Formel 3}$$

In Abbildung 3 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 des Messprinzips ist in [Hen13] beschrieben.

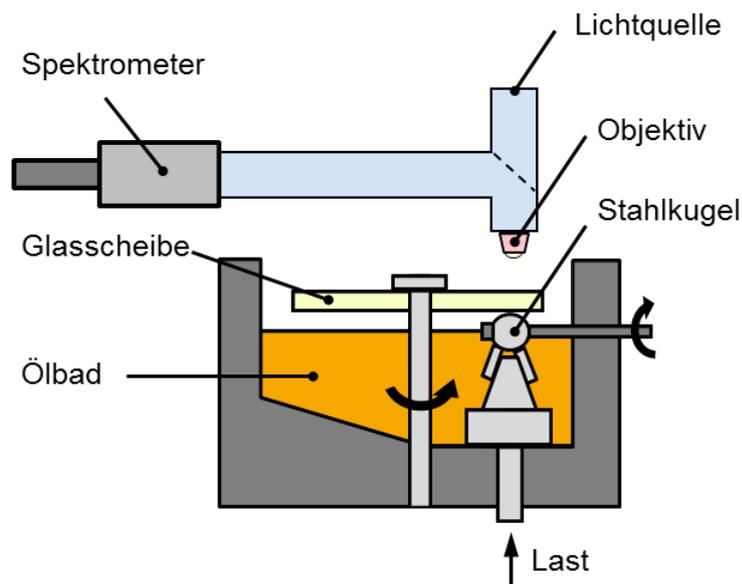


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Kugel/Scheibe-Tribometers

Die Schmierfilmdickenmessungen wurden für alle Schmierstoffe bei 700 MPa und 40 °C durchgeführt. Bei der Schmierfilmdickenmessungen mit Fett 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 von 30 mm/s vorangestellt. Mit dieser Prozedur sind reproduzierbare Schmierfilmdickenmessungen für fettgeschmierte Kontakte möglich.

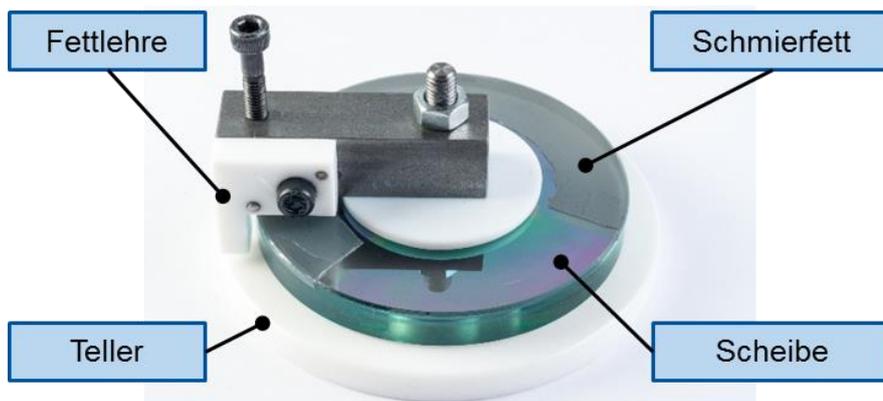


Abbildung 4: Auftragen von Schmierfett mittels Fettlehre

Um eine statistische Sicherheit bei den Schmierfilmdickenmessungen mit Fett zu erhalten, wird jeder Versuch sechs Mal wiederholt. Wie in [Fis18] beschrieben, werden die Ergebnisse gemittelt dargestellt.

3.2 Ausblutversuche

Die Ausblutversuche zur Bestimmung der Ölabscheidung aus dem Schmierfett werden in Anlehnung an DIN 51817 [DIN14] durchgeführt, wie bereits in [Fis18] ausführlich erläutert. Der Aufbau ist in Abbildung 5 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 bei 80 °C gelagert. In der Schüssel unter dem Sieb sammelt sich das ausgeblutete Öl.



Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau der konstruierten Ausblutapparatur [Fis18]

Um statistisch aussagekräftige Ergebnisse der Ölabscheidung zu erhalten, wurde jeder Ausblutversuch mit mindestens 14 Apparaturen gleichzeitig durchgeführt. Die Ergebnisse der gemittelten Ölabscheidungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Der Schmierstoff E-Li-90 weist die höchste Ölabscheidung mit ca. 5,4 % auf, gefolgt von PAO-Li-100 mit ca. 4,1 % und PAG-Li-140 zeigt die niedrigste Ölabscheidung mit ca. 2,0 %.

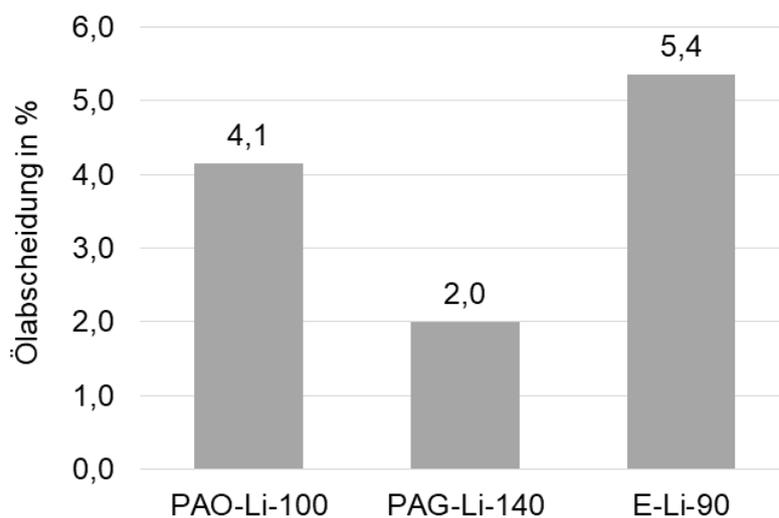


Abbildung 6: Ölabscheidung der untersuchten Schmierfette bei 80 °C

Somit konnte eine Abhängigkeit des Ausblutverhaltens von der Fettzusammensetzung bzw. vom Grundöltyp nachgewiesen werden.

3.3 Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessung

Die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessungen der untersuchten Schmierfette zeigen deutliche Unterschiede im Schmierfilmaufbau. Im Folgenden wird zunächst die Schmierfilmbildung von PAO-Li-100 und PAG-Li-140 verglichen. Abbildung 7 stellt die Rollgeschwindigkeiten, bei denen Starvation auftritt, der beiden Schmierfette gegenüber. PAG-Li-140 zeigt bei 50 mm/s ein deutlich früheres Auftreten von Starvation als PAO-Li-100 bei 180 mm/s. Wie in [Fis18] gezeigt, kann dies mit dem Ausblutverhalten korreliert werden, da PAG-Li-140 auch eine geringere Ölabscheidung mit 2,0 % im Gegensatz zu PAO-Li-100 mit 4,1 % aufweist. Daher wird vermutet, dass bei der Schmierfilmdickenmessung mit PAG-Li-140 die Menge an ausgeblutetem Öl zu gering ist und einen geringen Einfluss auf die Schmierfilmbildung hat. Damit kann auch der nahezu konstante Verlauf der Schmierfilmdicke von PAG-Li-140 bis ca. 800 mm/s erklärt werden. Da die Schmierfilmbildung in diesem Fall unabhängig von der Rollgeschwindigkeit ist und somit kein hydrodynamischer Schmierfilmaufbau nachgewiesen werden kann, muss der Verdicker beim Aufbau des trennenden Schmierfilms eine deutlich übergeordnete Rolle spielen. Der Anstieg der Schmierfilmdicke bei Rollgeschwindigkeiten > 1000 mm/s kann auf Einflüsse durch Fliehkräfte zurückgeführt werden. Diese wirken auf das seitlich abgelagerte Fett und fördern dieses in Richtung des EHD Kontaktes. Dadurch wird das Schmierstoffangebot erhöht und es kann zu einem Anstieg der Schmierfilmdicke im Starvationbereich kommen. Da dieser Effekt jedoch nicht kontrolliert werden kann, wird dieser Bereich als nicht interpretierbar gewertet.

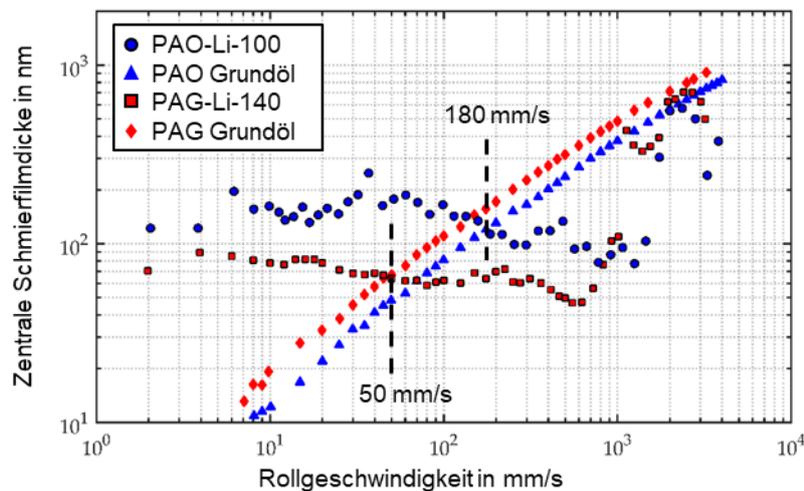


Abbildung 7: Auftreten von Starvation in Korrelation mit dem Ausblutverhalten [Fis18]

Wie in der Literatur [Can92]; [Ven16]; [Can07] beschrieben, kann sich eine Verdickerschicht mit bis zu 100 nm Schichtdicke auf den Oberflächen der Kontaktpartner aufbauen, welche diese im Betrieb voneinander trennt. Die Verdickerschicht bewirkt bei den Messungen mit PAO-Li-100 ebenso eine konstante Schmierfilmdicke bis ca. 20 mm/s. Allerdings kommt es von 20 mm/s bis 40 mm/s zu einem Anstieg der Schmierfilmdicke

mit anschließendem Abfallen ab 40 mm/s bei weiterer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit. Da die Schmierfilmdicke im Bereich von Starvation nahezu konstant und unabhängig von der Rollgeschwindigkeit bleibt, wird angenommen, dass die Verdickerschicht weiterhin wirksam ist.

Der Einfluss des Grundölytys in der Fettzusammensetzung auf die Schmierfilmbildung wurde mit einer weiteren Schmierstoffvariation E-Li-90 untersucht. Ein Vergleich der Schmierfilmbildung zwischen PAO-Li-100 und E-Li-90 ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Ergebnisse der Schmierfilmdickenmessungen mit E-Li-90 zeigen nur eine geringe Schmierspaltaufweitung gegenüber dem korrespondierenden Grundöl und keinen Plateau-ähnlichen Verlauf der Schmierfilmdicke mit ansteigender Rollgeschwindigkeit, wie bei den anderen Schmierfetten. Allerdings steigt die Schmierfilmdicke mit ansteigender Rollgeschwindigkeit annähernd parallel zur Grundölkurve an. Daher wird vermutet, dass bei dem E-Li-90 Schmierstoff die Schmierung überwiegend durch das ausgeblutete Öl dominiert wird und es somit zu einem hydrodynamischen Schmierfilmaufbau mit untergeordnetem Verdickereinfluss kommt. Das Auftreten von Starvation kann bei ca. 60 mm/s identifiziert werden.

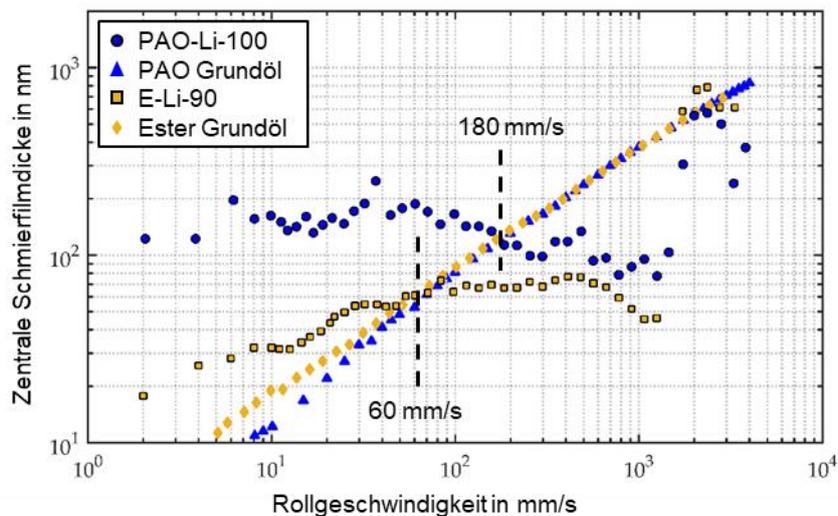


Abbildung 8 Vergleich der Schmierfilmbildung zwischen PAO-Li-100 und E-Li-90

Es wird angenommen, dass der Verdickereinfluss durch die hohe Polarität des Ester-Grundöls gehemmt wird. Polare Schmieröle verhalten sich oberflächenaffin, sodass sie sich bevorzugt an Oberflächen von Festkörpern anlagern [Sch13]. Dies könnte den Aufbau einer Verdickerschicht auf den Oberflächen verhindern bzw. hemmen, sodass der Einfluss des Verdickers auf die Schmierfilmbildung gering bleibt. Somit kommt es nicht zu einem Plateau-ähnlichen Verlauf der Schmierfilmdicke bei geringen Rollgeschwindigkeiten, wie bei den anderen untersuchten Schmierfetten kommt. Das Ausblutverhalten von E-Li-90 zeigt jedoch eine vergleichsweise hohe Ölabscheidung von 5,4 %, sodass angenommen wird, dass eine ausreichende Menge an ausgeblutetem Öl vorliegt um einen hydrodynamischen Schmierfilm bis 60 mm/s aufzubauen. Allerdings kann

durch die begrenzte Menge an ausgeblutetem Öl die Schmierfilmdicke nicht weiter ansteigen und es kommt zum Auftreten von Starvation bei 60 mm/s. Um den Einfluss des Verdickers zu prüfen und die dargestellten Ergebnisse zu bekräftigen, sind ausführliche Untersuchungen des Verdickerschichtaufbaus in Zukunft geplant.

4 Zusammenfassung und Fazit

Mit den dargestellten Ergebnissen der Untersuchungen und deren Diskussion konnten die Einflüsse des Grundöltypes in Schmierfetten auf die Schmierfilmbildung in EHD Kontakten herausgearbeitet werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass mit der erarbeiteten Messprozedur die Schmierwirkung unterschiedlicher Schmierfettformulierungen am Kugel/Scheibe-Tribometer charakterisiert und bewertet werden kann. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Bei der Untersuchung der Schmierfilmbildung wurde gezeigt, dass der Grundöltyp den Schmierfilmaufbau maßgeblich beeinflusst. Zum einen konnte herausgestellt werden, dass das Auftreten von Starvation bei unterschiedlichen Grundöltypen aber gleichen Verdickersystemen, wie PAO-Li-100 und PAG-Li-140, mit dem Ausblutverhalten korreliert werden kann. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass bei diesen beiden Fetten im Bereich niedriger Rollgeschwindigkeiten < 20 mm/s der Schmierfilm deutlich über dem des Grundöls liegt. Aufgrund der niedrigen Rollgeschwindigkeiten wird ein hydrodynamischer Schmierfilmaufbau ausgeschlossen, sodass die hohe Schmierfilmdicke durch den Verdicker verursacht wird. Bei der Ester/Lithium-Komplex Kombination hingegen, ist der Verdickereinfluss auf die Schmierfilmbildung, vermutlich aufgrund der Polarität von Ester, gering. Folglich wird bei letzterem die Schmierfilmbildung höchstwahrscheinlich durch das ausgeblutete Öl dominiert, sodass ein hydrodynamischer Schmierfilmaufbau erkennbar ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Schmierfilmbildung bei dem PAO-Li-100 Schmierfett ein spätes Auftreten von Starvation im Vergleich zu den Schmierstoffen auf PAG und Ester Grundölbasis aufweist. Dabei zeigte sich, dass die Variation von Fettzusammensetzung eine Veränderung der Schmierfilmbildung zur Folge hat, die durch den Verdicker beeinflusst wird.

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.

5 Literaturverzeichnis

- [DIN07] DIN ISO 281:2010-10. Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life (ISO 281:2007), 2007
- [Sch15] Schaeffler Technologies. Wälzlagerpraxis, 4. Auflage; Vereinigte Fachverlage: Mainz, Germany, 2015, 978-3-7830-04-01-4
- [Lug09] Lugt, P.M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings, *Tribology Transactions* 2009, 52(4), 470–480, 10.1080/10402000802687940
- [Can92] Cann, P.M.; Spikes, H.A. Film thickness measurements of lubrication greases under normally starved conditions, *NLGI Spokesman* 1992, 56(2), 21–27
- [Gon15] Gonçalves, D.; Graça, B.; Campos, A.V.; Seabra, J.; Leckner, J.; Westbroek, R. On the film thickness behaviour of polymer greases at low and high speeds, *Tribology International* 2015(90), 435–444, 10.1016/j.triboint.2015.05.007
- [Nag12] Nagata, Y.; Kalogiannis, K.; Glovnea, R. Track replenishment by lateral vibrations in grease-lubricated EHD contacts, *Tribology Transactions* 2012, 55(1), 91–98, 10.1080/10402004.2011.629404
- [Ven16] Vengudusamy, B.; Kuhn, M.; Rankl, M.; Spallek, R. Film forming behavior of greases under starved and fully flooded EHL conditions, *Tribology Transactions* 2016, 59(1), 62–71, 10.1080/10402004.2015.1071450
- [Fis18] Fischer, D.; Jacobs, G.; Stratmann, A.; Burghardt, G. Effect of Base Oil Type in Grease Composition on the Lubricating Film Formation in EHD Contacts, *Lubricants* 2018, 6(2), 32, 10.3390/lubricants6020032
- [Wil79] Wilson, A.R. The Relative Thickness of Grease and Oil Films in Rolling Bearings, *Proc Instn Mech Engrs* 1979, 193185–192, 10.1243/PIME_PROC_1979_193_019_02
- [Chi74] Chiu, Y.P. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems, *ASLE Transactions* 1974, 17(1), 22–35, 10.1080/05698197408981435
- [Åst93] Åström, H.; Östensen, J.O.; Höglund, E. Lubricating Grease Replenishment in an Elastohydrodynamic Point Contact, *Journal of Tribology* 1993, 115(3), 501–506, 10.1115/1.2921666
- [Jac99] Jacod, B.; Pabilier, F.; Cann, P.M.; Lubrecht, A.A. An analysis of track replenishment mechanisms in the starved regime, *Tribology Series* 1999, 36483–492, 10.1016/S0167-8922(99)80069-8
- [Can97] Cann, P.M.; Chevalier, F.; Lubrecht, A.A. Track Depletion and Replenishment in a Grease Lubricated Point Contact: A Quantitative Analysis, *Tribology Series* 1997, 32405–413, 10.1016/S0167-8922(08)70469-3
-

- [Ger08] Gershuni, L.; Larson, M.G.; Lugt, P.M. Lubricant Replenishment in Rolling Bearing Contacts, *Tribology Transactions* 2008, 51(5), 643–651, 10.1080/10402000802192529
- [Hen13] Hentschke, C. Dünne Schmierfilme I - Abschlussbericht, FVA: Frankfurt, 2013, Forschungsvorhaben 580-I, FVA-Heft Nr. 1061
- [DIN14] DIN 51817:2014-08. Testing of lubricants - Determination of oil separation from greases under static conditions (DIN 51817:1998-04), *Beuth Verlag, Berlin* 2014
- [Can07] Cann, P.M. Grease Lubrication of Rolling Element Bearings - Role of the Grease Thickener, *Lubrication Science* 2007, 19(3), 183–196, 10.1002/lis.39
- [Sch13] Schulz, J.; Brinksmeier, E.; Meyer, D. On the Interactions of Additives in Metalworking Fluids with Metal Surfaces, *Lubricants* 2013, 1(4), 75–94, 10.3390/lubricants1040075