

Entwicklung eines modularen Messsystems zur optischen und kapazitiven Schmierfilmdickenmessung in einem EHD-Kontakt

Masterarbeit

Verfasser:
cand. mach. Ngoc Minh DAO

Betreuer:
Dipl.-Ing. Norbert BADER

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	4
1. Einleitung	6
2. Stand der Technik	7
2.1. Eigenschaften des Schmiermittels	7
2.2. Reibung	12
2.2.1. Reibungsarten	12
2.2.2. Reibungszustände und Schmierfilmaufbau	13
2.2.3. Stribeck-Kurve	15
2.3. Betrachtung des EHD-Kontaktes	15
2.3.1. Kontakt von beliebig gekrümmten Elementen	16
2.4. Schmierfilmdicke nach Hamrock und Dowson	18
3. Literaturforschung der experimentellen Techniken zur Schmierfilmdickenmessung in EHD-Kontakten	20
3.1. Optische Messung der EHD Schmierfilmdicke	20
3.1.1. Licht-Interferometrie	20
3.1.2. Schmierfilmdickenmessungen mittels Lichtinterferenz	21
3.1.3. Variante der optischen Messmethoden	22
3.2. Elektrische Messung der EHD Schmierfilmdicke	23
3.2.1. Widerstandsmessung	23
3.2.2. Kapazitätssmessung	24
3.3. Alternative EHD Schmierfilmdicke Messmethoden	26
3.3.1. Taktile	26
3.3.2. Ultraschall	27
3.3.3. Laserinduzierte Fluoreszenz	29
4. Aufbau und Funktion des EHD-Messgeräts	30
4.1. PC und Elektronikeinheit	30
4.2. Mechanischer Aufbau	31
4.3. Messsystem zur Schmierfilmdickemessung	32
5. Konstruktive Bearbeitung	34
5.1. Konstruktion der Kugelführung	34
5.2. Konstruktion des Kugelsupports	35
5.3. Die Glasscheibeabaugruppe	36
5.4. Konstruktion des Deckels	38
6. Versuche auf dem EHD-Messgerät	39
6.1. Dielektrizitätskonstante des Schmierstoffes	39
6.2. Kapazitive Messgeräte zur Schmierfilmdickenbestimmung	40
6.2.1. Stromladekurve Messgerät	40

6.2.2. LCR Messgerät	42
6.3. Versuchsplanung	43
6.4. Versuchdurchführung	45
7. Versuchergebnisse	48
7.1. Vergleichsmessung von modifizierten Teilen	48
7.2. Störkapazitätsmessung	48
7.3. Kapazitätsmessung für EHD-Punktkontakt	49
8. Zusammenfassung und Ausblick	52
9. Literaturverzeichnis	53
Appendices	56
A. Öldaten	57
B. PCS EHD-Prüfstand	61
B.1. Vorgehensweise für Schmierfilmdicken-Messungen [1]	61
B.2. Procedure for resetting the ball track micrometer	62
B.3. Rauheitsmessung der halben beschichteten Glasscheibe	64
B.4. PCS EHD-Prüfstand Spezifikationen	64
C. Zeichnungen	66

Notes

■ Update image the glas disc assembly	37
■ Die Korrelation von beiden Messmethoden unter verschiedenen Testparameter?	52

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	m	Halbachse der Kontaktellipse senkrecht zur Bewegungsrichtung
b	m	Halbachse der Kontaktellipse parallel zur Bewegungsrichtung
C	Pa^{-1}	Kompressibilität
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
F	N	Normalkraft im Kontaktpunkt
G	-	Werkstoffparameter
H	-	Schmierfilmparame
h	m	Schmierfilmdicke
h_0	m	Minimale Schmierfilmdicke (glatte Oberflächen)
n	-	Brechungsindex
P	N	Belastung im Kontakt
p	Pa	Druck im Kontaktpunkt
p_0	Pa	Maximaldruck im Kontaktpunkt
r	m	Krümmungsradius der Kontaktkörper
R	m	Reziproker Krümmungsradius
R_x	m	Hauptkrümmungsradius in der Bewegungsebene
S	-	Schnittpunkt der Rotationsachsen
S_B	%	Bohrschlupf
U	-	Geschwindigkeitsparameter
u	m/s	Wälzgeschwindigkeit im Schmierfilm
W	-	Belastungsparameter
α, α^*	Pa^{-1}	Druck-Viskosität-Koeffizient
β	K^{-1}	Temperatur-Viskosität-Koeffizient
γ	s^{-1}	Schergefälle
γ_1	°	Neigungswinkel der Rotationsachse der Scheibe
γ_2	°	Neigungswinkel der Rotationsachse der Kugel
η	Pas	Viskosität
η_0	Pas	Viskosität im Kontakteintritt ($p = 0$)
η_s	Pas	Viskosität beim Druck p (Barus)
κ	-	Verhältnis der Halbachsen der Kontaktellipsen
ν	-	Querkontraktionszahl
ν	m^2/s	Kinematische Viskosität
ρ	kg/m^3	Dichte
φ	°	Winkel zwischen den Hauptebenen

1. Einleitung

Eine Maschine besteht im Allgemein aus beweglichen Teilen. Dabei tritt zwischen den sich berührenden Oberflächen Reibung und Verschleiß auf. Um diese unerwünschten Effekte gering zu halten, werden diese Teile in der Maschine gelagert. Es gibt verschiedene Typen von Lagern. Ein weit verbreitetes Maschinenelement ist das Wälzlager. Das Geheimnis für einen sicheren und langlebigen Betrieb eines Wälzlagers ist die Schmierung. Diese kann in Form einer Fettschmierung oder einer Ölschmierung vorliegen.

Im Wälzlager entsteht zwischen den Oberflächen von relativ zu einander beweglichen Teilen ein Schmierfilm. Unter der enormen Belastung im kontraformen Kontakt befindet sich dieser Schmierfilm im Bereich der elastohydrodynamischen Schmierung. Für die Ölschmierung gibt es viele Möglichkeiten zur Bestimmung der Schmierfilmdicke, wie zum Beispiel die analytische, optische, kapazitive, taktile Methode etc. Jede Methode hat eigene Vorteile und Nachteile, jedoch wurden die einzelnen Verfahren aufgrund von technischem Aufwand und der Eigenschaften der Test-Maschinenelementen meist separat ausgeführt. Ist es möglich, die Vorteile von verschiedenen Messmethoden, nämlich die hohe Auflösung des optischen und die einfache Einsetzbarkeit des elektrischen Messverfahren zu kombinieren?

Um diese Frage zu beantworten, wird im Rahmen dieser Arbeit ein System entwickelt, das beide Aufbauten vereinigt. Die Entwicklung basiert auf einem Kugel-Scheibe-Modellprüfstand. In diesem wird zwischen einer rotierenden Glasscheibe und einer Stahlkugel ein Wälzkontakt, der etwa ähnlich mit dem im realen Wälzlager ist, hergestellt. Um die optische und elektrische Schmierfilmdickenmessung gleichzeitig in einem System auszuführen, wird der Prüfstand teilweise modifiziert.

2. Stand der Technik

Der Begriff Tribologie ist nach [2] die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie beschäftigt sich mit Reibung, Verschleiß und Schmierung sowie Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen (Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1.: Das tribologische System[3]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vornehmlich mit dem ölgeschmierten Kugel-Scheibe-Kontakt. Aus diesem Grund soll im folgenden kurz auf die Themen Schmieröle, Reibung und auf die elastohydrodynamischen Grundlagen eingegangen werden.

2.1. Eigenschaften des Schmiermittels

Viskosität

Viskosität, die auch als innere Reibung bezeichnet wird, ist die wichtigste Kenngröße eines Schmierstoffs. Sie beschreibt die Zähigkeit von Flüssigkeiten und Gasen. Je größer die Viskosität ist, desto dickflüssiger ist das Fluid und umgekehrt. Ein Modell des Parallelplattenversuchs veranschaulicht das Fließverhalten des Schmierstoffes (Abbildung 2.2).

Für die Newtonsche Flüssigkeit wird die Viskosität η in Beziehung zu der Schubspannung τ definiert [4]:

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{oder} \quad \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

wobei u die Wälzgeschwindigkeit und $\dot{\gamma} = u/z$ das Schergefälle ist.

Die kinematische Viskosität ν ergibt sich aus der dynamischen Viskosität η durch die Division mit der Dichte des Fluids ρ . Diese wird zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Schmieröle

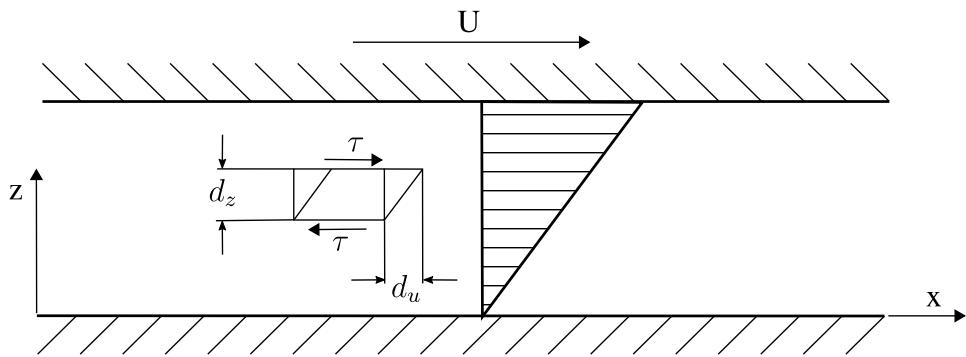


Abbildung 2.2.: Geschwindigkeitsprofil in einem Parallelplattenversuch[3]

verwendet.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2)$$

Im Si-Einheitensystem hat die dynamische Viskosität η die Einheit N s/m² oder Pas und die kinematische Viskosität ν die Einheit m²/s. Ein Stoff hat die Viskosität 1 N s/m², wenn er sich zwischen zwei Platten, die die Größe von 1 m² und einen Abstand von einander 1 m haben, befindet und man 1 N braucht, um die zwei Platten gegeneinander mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s zu verschieben [4].

Temperatureffekt

Die Temperatur hat große Auswirkungen auf die Viskosität aller fließfähigen Stoffe. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität der Flüssigkeiten ab. Dieser Effekt kann experimentell mittels eines Viskosimeters und rechnerisch nach *Crouch* und *Cameron* [5] bestimmt werden.

Die einfachste Gleichung, die den Temperatureffekt auf die Viskosität, nach *Reynolds* [6] beschreibt:

$$\eta = \eta_s \exp(-\beta \Delta \phi) \quad (2.3)$$

wobei η_s die Viskosität des Schmierstoffes bei der Temperatur ϕ_s ist, η ist die Viskosität des Schmierstoffes bei der Temperatur ϕ , $\Delta \phi$ ist die Temperaturdifferenz ($\phi = \phi_s + \Delta \phi$) und β ist die thermoviskose Konstante.

Viskositätsindex

Die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität eines Schmieröls wird mit dem Viskositätsindex (VI oder KVI) beschrieben. Der Viskositätsindex basiert auf einer Skala, in der zwei unterschiedliche Öltypen mit deutlich abweichenden Viskositätstemperaturverhalten zugeordnet werden. Das Öl, das starke Veränderungen der Viskosität zeigt, wird mit 0 oder LVI (low viscosity index) indiziert. Das andere Öl wird mit 100 oder HVI (high viscosity index) gekennzeichnet. Aus dem Vergleich der kinematischen Viskosität eines zu beschreibenden Öls mit diesen beiden Referenzölen bei 100 °C ergibt sich dessen Viskositätsindex nach Formel 2.4.

$$VI \text{ (oder KVI)} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0 - \nu_{100}} \quad (2.4)$$

In der VI-Definition ist angenommen, dass die Veränderung der Viskosität mit der Temperatur von drei Ölen linear ist. Die Linearisierung der kinematischen Viskosität ν von der Temperatur θ nach *Walther (Sánchez-Rubio, et al.)* [7] lautet:

$$\log \log(\nu + 0,7) = A + B \log(\theta) \quad (2.5)$$

Durch die Verwendung der doppeltlogarithmischen Koordinaten ergibt die Linearisierung für Mineralöle eine Gerade. Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel für die SAE-Öle. Die Tabelle A.1 und A.3 zeigen die Viskosität von verschiedenen Ölen bei unterschiedlichen Temperaturen.

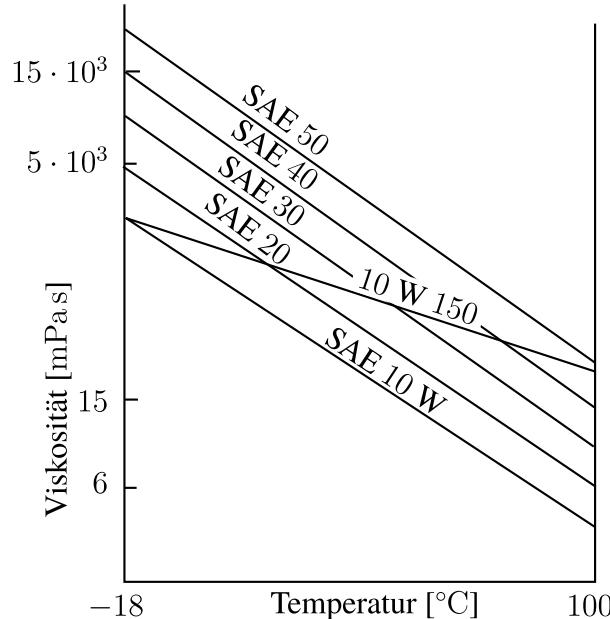


Abbildung 2.3.: Variation der Viskosität mit Temperatur [8]

Einfluss von Druck auf Viskosität

Mit steigendem Druck nimmt die Viskosität aller Schmieröle zu. Allerdings verändert sich das Schmiermittel unter dem für die EHD-Kontakte enormen Druck schlagartig. Die Viskosität nimmt rapide zu und der Schmierstoff erreicht einem festen Zustand. Die Abbildung 2.4 zeigt, dass die Viskosität der FVA-Öle im Bereich von 0 MPa bis 200 MPa etwa hundertfach zunimmt.

Nach *Barus* [10] kann die Viskosität mit der unteren Formel berechnet werden,

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad (2.6)$$

wobei η_0 die Viskosität beim Atmosphärendruck ($p = 0$) und α_p der Druck-Viskosität-Koeffizient ist. Für Mineralöle sind diese Parameter ungefähr [3]:

$$\begin{aligned} 0,001 &\rightarrow 0,1 & \text{für } \eta_0 [\text{Pas}] \\ 0 &\rightarrow 2,0 \cdot 10^{-8} & \text{für } \alpha [\text{Pa}^{-1}] \end{aligned}$$

Leider liefert die Gleichung von *Barus* einen zu großen Wert bei hohem Druck. Eine genauere Gleichung für die Viskosität bei der Temperatur θ wurde von *Roelands* [11] vorgeschlagen:

$$\eta_R = \eta_0 \exp(\alpha^* p) \quad (2.7)$$

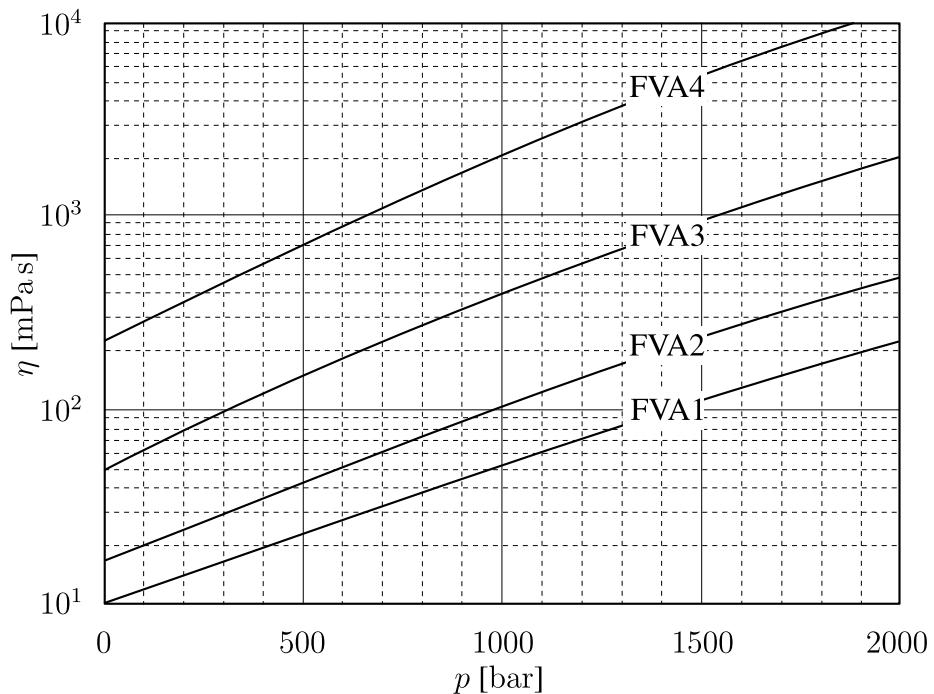


Abbildung 2.4.: Dynamische Viskosität der FVA-Referenzöle bei 50 °C in Abhängigkeit vom Druck [9]

Der *Roelands* Druck-Viskositätskoeffizient α^* ist eine Funktion des Drucks p und der Temperatur θ und kann mit Formel 2.8 berechnet werden:

$$\alpha^* p = [\ln(\eta_0) + 9.67] \left\{ \left(\frac{\theta - 138}{\theta_0 - 138} \right)^{-S_0} \left[\left(1 + \frac{p}{p_0} \right)^Z - 1 \right] \right\} \quad (2.8)$$

wobei θ_0 [K] die Raumtemperatur und $p_0 = 1,98 \cdot 10^8$ Pa eine Konstante ist. Die Z und S_0 sind die Konstanten für alle Öle, unabhängig von Temperatur und Druck und können durch die unteren Formeln [8] berechnet werden:

$$Z = \frac{\alpha}{5.1 \times 10^9 (\log(\eta_0) + 9.67)} \quad (2.9)$$

$$S_0 = \frac{\beta(\theta_0 - 138)}{\log(\eta_0) + 9.67} \quad (2.10)$$

α und β sind für bekannte Öle gegeben (siehe Tabelle A.1 für α). Zum Berechnungszwecken wird $Z = 0,68$ genommen.

Der Viskositäts-Druck-Koeffizient α ist keine Konstante, sondern eine Funktion der Temperatur. Die Abbildung 2.5 zeigt diese Abhängigkeit im Bereich von 0 bar bis 2000 bar (Index 2000) mit der Temperatur für die Referenzöle der FVA an.

Dichte

Für eine numerische Schmierfilmdickenmessung ist es notwendig zu wissen, wie sich die Dichte des Schmierstoffes unter variierendem Drucken verhält. Die Form des Schmierfilms kann nicht

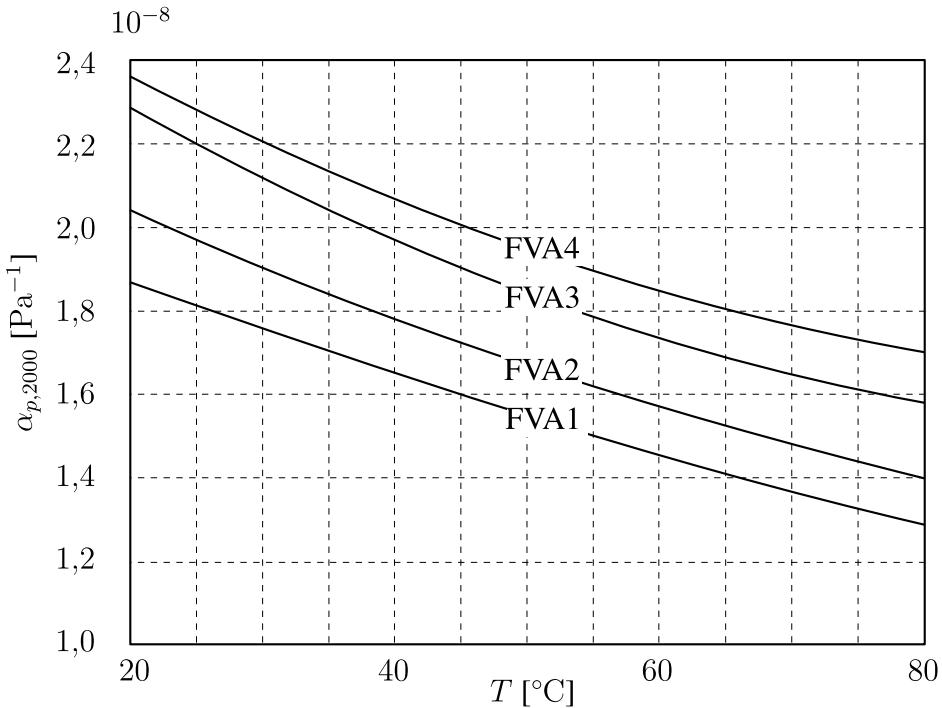


Abbildung 2.5.: Viskositäts-Druck-Koeffizient der FVA-Referenzöle in Abhängigkeit von der Temperatur [9]

richtig berechnet werden, wenn diese Eigenschaft vernachlässigt wird. Die Kompressibilität eines Schmierstoffes C kann nach *Chu und Cameron* [12] so beschrieben werden:

$$C = \left(\frac{1}{\rho} \right) \frac{d\rho}{dp} = \left(\frac{1}{V} \right) \frac{dV}{dp} \quad (2.11)$$

wobei V das Volumen und dV die Änderung des Volumens ist.

Die Dichte der Mineralöle ist nach *Dowson und Higginson* [13] mit folgender Formel zu berechnen:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0,6p}{1 + 1,7p} \right) \quad (2.12)$$

wobei p der Druck und ρ_0 die Dichte bei normalem Luftdruck ($0,87 \text{ kg/m}^3$ bei 20°C) ist. Abbildung 2.6 zeigt einen Plot der Gleichung 2.12 für ein Mineralöl, das eine Dichte ρ_0 von $0,85$ bei 40°C hat. Die Messpunkte \triangle stammen aus Versuchen von *Hirano et al* [14].

Brechungsindex

Für die Messverfahren, die auf optischen Interferometrie basieren, braucht man die Abhängigkeit zwischen der Dichte und dem Brechungsindex des Schmierstoffes. Nach *Gohar* [15] wird das Verhältnis mit der Formel 2.13 beschrieben:

$$c\rho = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (2.13)$$

wobei c ein Ölkonstante (zB: SAE-30, $c = 0,33$) ist. Der Brechungsindex beträgt für die meisten Mineralöle bei normalen Luftdruck ca. 1,51. Die Abhängigkeit des Brechungsindex von dem Druck für das Öl SAE-30 wird auch in die Abbildung 2.6 angezeigt.

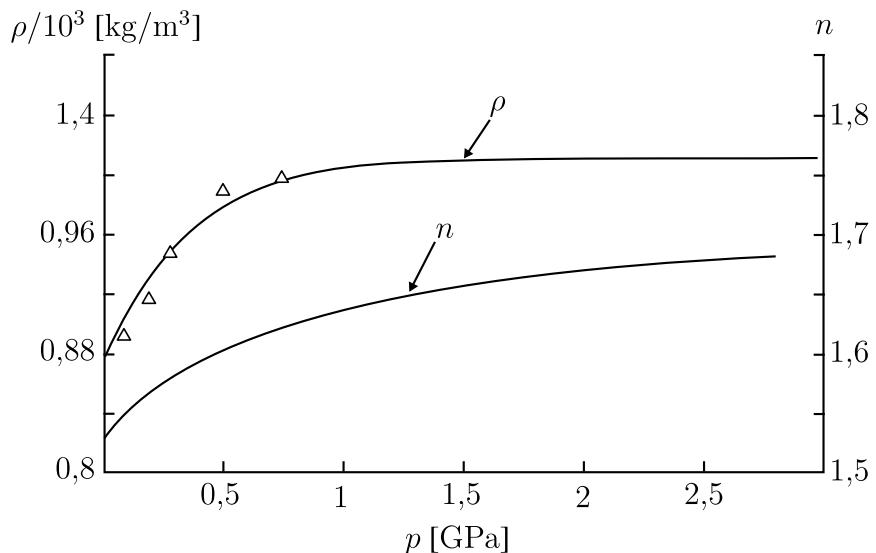


Abbildung 2.6.: Variation der Dichte und des Brechungsindex bei unterschiedlichem Drucken [8]

Wärmeleitfähigkeit

Um die Temperaturerhöhung des Schmierstoffes unter Schubspannung zu schätzen, ist dessen Wärmeleitfähigkeit k nötig. Nach Cameron [10] kann diese Größe bei normalem Luftdruck mit folgender Formel berechnet werden.

$$k = \frac{0,1173 - 6,33 \times 10^{-5} \theta}{\rho_0} \quad (2.14)$$

wobei θ [K] die absolute Temperatur und ρ_0 [kg/m³] die Dichte ist.

Newtonsche Fluide

Wenn die Viskosität eines Fluids von der Schubspannung unabhängig ist, wird das Fluid als Newtonsches Fluid bezeichnet (siehe Abbildung 2.7). Flüssigkeiten, deren Viskosität mit steigenden Schubspannungen zunehmen, nennt man dilatant. Solches Verhalten zeigt häufig Suspensionen an, die sich nicht als Schmierstoff eignen. Strukturviskose Fluide sind die Umkehr der Dilatanz. Strukturviskosität tritt bei synthetischen Fluiden auf. Für die Bestimmung der Schmierfilmdicke werden alle Fluide in Rahmen dieser Arbeit als Newtonsche Fluide angenommen.

2.2. Reibung

2.2.1. Reibungsarten

Bewegungsreibung ist immer da, wo sich berührende Körper bzw. Stoffbereiche relativ zueinander bewegen. Sie ist entgegen der Bewegungsrichtung gerichtet und wandelt die mechanische Energie in Wärme um. Man unterscheidet zwischen innerer und äußerer Reibung. Äußere Reibung tritt auf, wo die Flächen der unterschiedlichen Körper sich berühren. Von innerer Reibung spricht man, wenn die sich berührenden Stoffbereiche einem Körper angehören, z.B im Schmierstoff.



Abbildung 2.7.: Newtonsche und die andere Fluide[3]

Im Gegensatz zur Bewegungsreibung tritt die Hafreibung auf, wo es keine relative Bewegung zwischen den Reibpartnern gibt. In diesem Fall ist die angreifende Kraft nicht ausreichend, um die Körper in Bewegung zu bringen.

Reibung wird durch den Reibwert μ charakterisiert. Er beschreibt das Verhältnis von der Reibungskraft F_R und der Normalkraft F_N [16]:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (2.15)$$

Die Bewegungsreibung kann man zu drei Kategorien — Gleitreibung, Rollreibung und Bohreibung — einteilen (siehe Abbildung 2.8). In der Praxis treten meist Kombinationen dieser drei Reibungsarten auf. Die wichtigste ist hier die sogenannte Wälzreibung, eine Kombination aus Rollen und Gleiten.

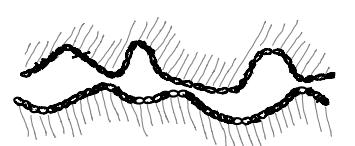
2.2.2. Reibungszustände und Schmierfilmaufbau

Die Reibungszustände werden durch den Kontaktzustand der beteiligten Reibpartner beschrieben. Man spricht hier von Festkörper-, Grenz-, Misch-, Flüssigkeits- und Gasreibung. Da die Gasreibung für diese Arbeit unrelevant ist, wird kurz auf die einzelnen Reibungszustände ohne Gasreibung eingegangen.

Festkörperreibung: Von Festkörperreibung spricht man, wenn sich kein Schmierstoff im Reibkontakt befindet. Dabei besteht bei hohen Flächenpressungen die Gefahr, dass die beiden Körper aneinander haften, verschleißt und es zum Festfressen kommen kann.



Grenzreibung: Grenzreibung ist der Festkörperreibung recht ähnlich. Allerdings werden die Oberflächen der Reibpartner von einer Schicht getrennt und befinden sich nicht direkt in Berührung. Diese Schicht kann zum Beispiel durch Oxidation, Adsorption oder chemische Reaktionen entstanden sein und vermindert die Reibung im Vergleich zur Festkörperreibung schon eheblich.



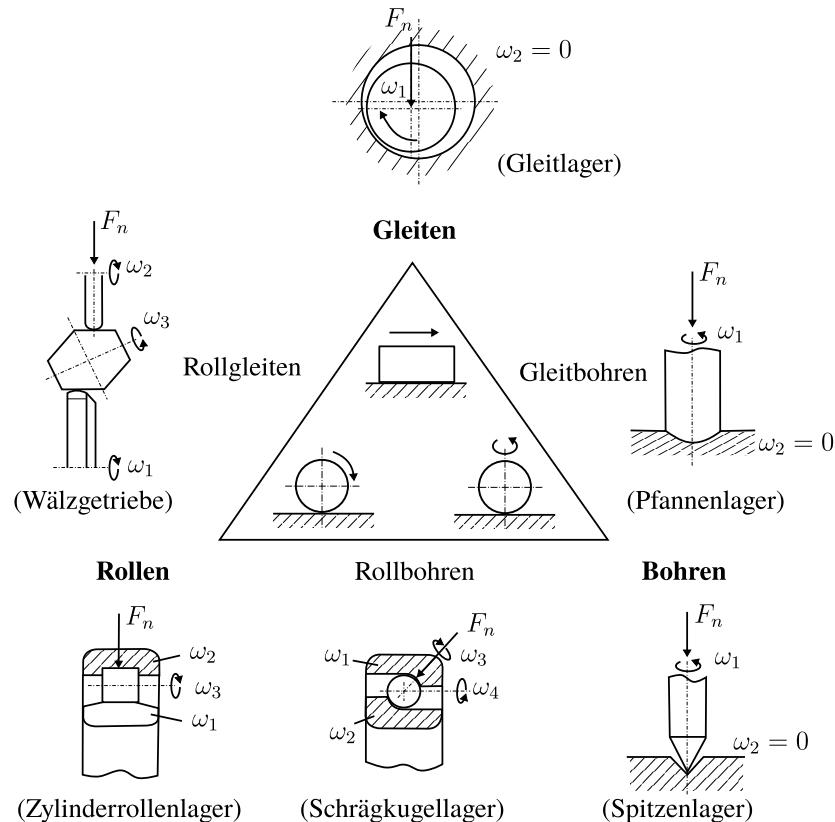
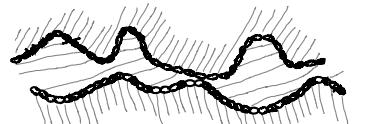
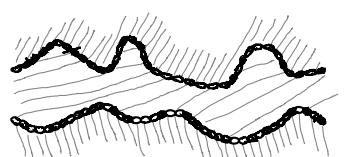


Abbildung 2.8.: Arten der Bewegungsreibung [17]

Mischreibung: Bei Mischreibung gibt es schon im Reibkontakt ein bisschen Schmierstoff und die Laufflächen werden zum Teil durch einen Schmierfilm getrennt. Leider ist dieser nicht hoch genug, um ein vollständiges Trennen der beiden Körpern zu erreichen. Es kommt immer noch zu einer Berührung der Rauheitsspitzen der Laufflächen. Die Reibung bei der Mischreibung ist deutlich geringer als die der Grenzreibung. Allerdings bleibt immer noch der Verschleiß im Reibkontakt.



Flüssigkeitsreibung: Bei Flüssigkeitsreibung handelt sich um eine vollständige Trennung der Laufflächen. Selbst die Rauheitsspitzen berühren sich hierbei nicht mehr. Die äußere Reibung ist weg, so dass nur noch die innere Reibung bleibt, die durch die Scherbeanspruchung des Schmierstoffs hervorgerufen wird.



Der Aufbau des Schmierfilms erfolgt hydrodynamisch, elastohydrodynamisch oder hydrostatisch. Hydrostatisch aufgebaute Schmierfilme werden durch externe Aggregate, wie zum Beispiel eine Pumpe, aufgebaut. Bei der hydrodynamischen Schmierung wird der Schmierfilm durch die Relativbewegung der Reibpartner aufgebaut. Die hydrodynamische Schmierung tritt im Allgemeinen nur bei konformen Kontaktpaarungen auf. Bei konformen Kontaktpaarungen spricht man von Kontaktkörpern, die sich auf einer Fläche berühren. Eine Verformung der Oberflächen spielt hier keine wichtige Rolle, da die Pressungen aufgrund der großen Kontaktflächen vergleichsweise gering sind. Im Gegenteil dazu ist bei der elastohydrodynamischen Schmierung die Flächenpressung ein entscheidender Faktor zum Aufbau einer tragenden Schicht. Die Kontaktpaarungen bei dieser Schmierung sind im Allgemeinen kontraform. Ihre Flächen berühren sich nur in einem Punkt oder in einer Linie. Dadurch treten deutlich höhere Flächenpressungen als bei konformen Kontaktten auf, was zu einer lokalen Verformung der Oberflächen führt. Durch dieses Phänomen und die Zunahme der Viskosität des Schmierstoffes unter hohem Druck

wird der Schmierfilm im Kontaktbereich bei elastohydrodynamischen Schmierung aufgebaut.

2.2.3. Stribeck-Kurve

Zur anschaulichen Darstellung der verschiedenen Reibungszustände wird häufig die Stribeck-Kurve gewählt. In die Abbildung 2.9 wird die Reibungszahl eines geschmierten Gleitlagers in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt.

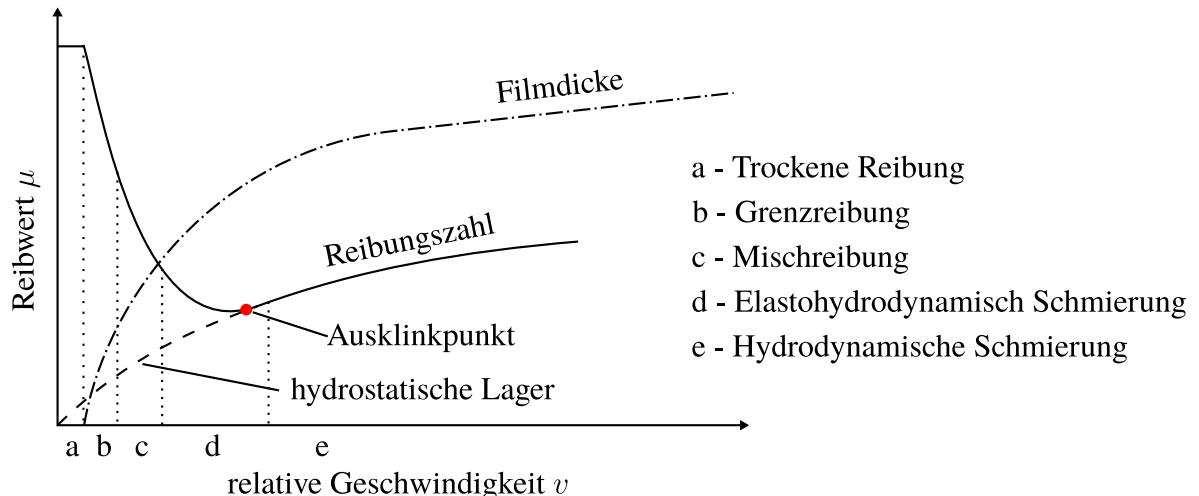


Abbildung 2.9.: Stribeck-Kurve eines geschmierten Gleitlagers [18]

Im Stillstand tritt erst einmal reine Haftreibung auf. Nach dem Anlauf des Lagers sinkt die Reibungszahl trotz des fehlenden Schmierstoffes im Reibkontakt und es kommt zur Grenzreibung. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen Lagerbuchse und Welle wird der Schmierstoff in den Lagerspalt befördert. Jetzt nimmt die Reibung weiter ab und es kommt zur Mischreibung. Bei weiter zunehmender Drehzahl sinkt die Reibungszahl ab bzw. steigt der Schmierfilm weiter an, bis es ab dem Ausklinkpunkt zur reinen Flüssigkeitsreibung kommt. Nun schwimmt die Welle im Schmierstoff und berührt nicht mehr die Lagerbuchse. Da die innere Reibung mit der steigenden Drehzahl zunimmt, liegt an der Stelle (Ausklinkpunkt) ein Minimum der Reibungszahl vor.

Für Gleitlager, deren Schmierfilm hydrostatisch durch eine Pumpe aufgebaut wird, gilt die Stribeck-Kurve nicht. Da der Schmierfilm schon beim Stillstand voll ausgebildet ist, befinden sich solche Lager bei jeder Drehzahl im Bereich der Flüssigkeitsreibung.

2.3. Betrachtung des EHD-Kontaktes

Die Kontaktflächen von Maschinenelementen werden in zwei Grundformen eingeteilt. Dieses sind konforme (z.B. Gleitlager) und nichtkonforme Paarungen (z.B. Zahnrad, Reibrad, Nocken-Stößel). Die Abbildung 2.10 zeigt die Beispiele konformer und nichtkonformer Kontakte an.

Im Gegenteil zu den konformen Kontakten, wo die Pressungen in der Größenordnung von 10 MPa auftreten, können nichtkonforme Kontakte, die sich zwischen den Laufflächen befinden, die Druckspannungen von 0,5 GPa und höher aufweisen. Durch die enorme, konzentrierte Belastung werden die Flächen an dem Kontaktspunkt elastisch verformt und vergrößert. Im Folgenden soll der Wälzkontakt nach Wisniewski [3] näher betrachtet werden.

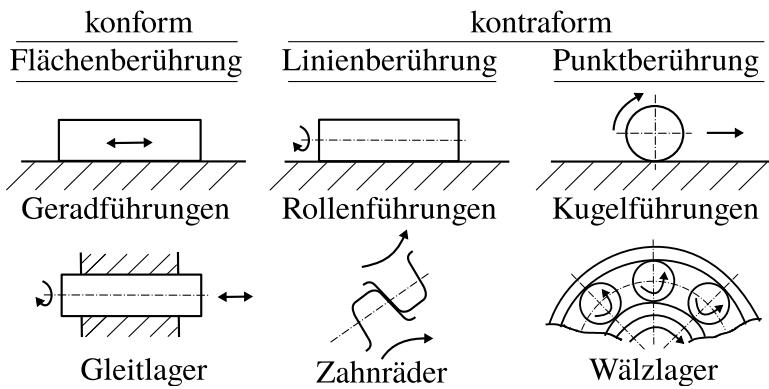


Abbildung 2.10.: Konforme und kontraforme Kontakte [17]

2.3.1. Kontakt von beliebig gekrümmten Elementen

Bei der Betrachtung des konzentrischen Kontaktes werden alle Oberflächen als ideal glatt angenommen. Durch deren minimale und maximale Krümmungen wird die Geometrie des Grundkörpers bzw. des Gegenkörpers beschrieben. Bei konvexen Körpern (Index 1) sind die Krümmungsradien (r_{11}, r_{12}) positiv und bei konkaven Körpern (Index 2) sind die Radien (r_{21}, r_{22}) negativ. Zwischen den beiden Ebenen, die r_{11} und r_{21} erhalten, bildet sich der Winkel φ . In Abbildung 2.11 wird die generelle Kontaktgeometrie bei nicht konformen Festkörpern dargestellt.

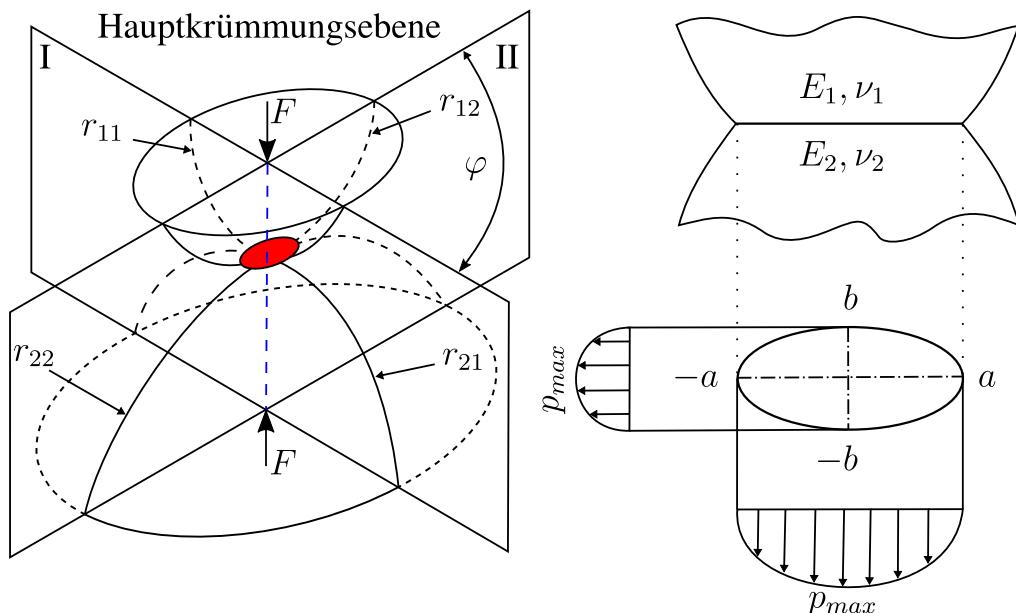


Abbildung 2.11.: Kontaktgeometrie bei nicht konformer Paarungen[19]

Im Kontaktbereich bildet die Kontaktfläche eine Ellipse mit den Halbachsen a und b . Um a und b zu bestimmen, braucht man das reduzierte Elastizitätsmodul E , die Belastung P und der Krümmungsradius R .

$$a = \beta_a \sqrt[3]{\frac{3PR}{E}} \quad (2.16)$$

$$b = \beta_b \sqrt[3]{\frac{3PR}{E}} \quad (2.17)$$

Das reduzierte Elastizitätsmodul E' beschreibt die elastischen Eigenschaften der beiden Elemente und wird definiert als

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2.18)$$

wobei ν_x die Querkontraktionszahl der Kontaktkörper und E_x das Elastizitätsmodul der Kontaktkörpern ist. Die Druckverteilung p hat die Form eines Halbellipsoids und wird so definiert:

$$p = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2 - \left(\frac{y}{a}\right)^2} \quad (2.19)$$

wobei x und y die Koordinaten in der Ebene ist. Die maximale Pressung p_0 ist ein Produkt der Belastung P und der Länge von Halbachsen a und b sind.

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (2.20)$$

Der reziproke Krümmungsradius R wird mit der Summe aller vier Hauptkrümmungen r_x bestimmt

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \quad (2.21)$$

Die Koeffizienten β_a und β_b zur Bestimmung der Berührungsfläche in einem konformen Kontakt können über den Parameter $\cos \psi$ aus dem Diagramm 2.12 abgelesen werden.

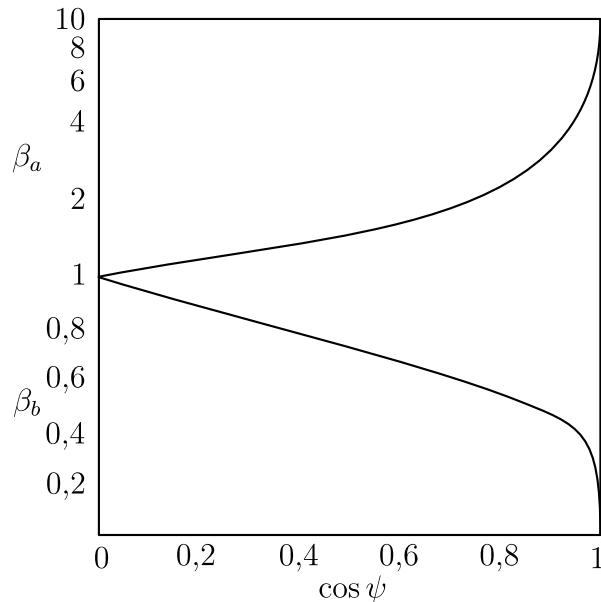


Abbildung 2.12.: β_a und β_b als Funktion von $\cos \psi$ [3]

Der Parameter $\cos \psi$ kann mit folgender Formel 2.22 berechnet werden:

$$\cos \psi = R \sqrt{\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)^2 + 2 \cos 2\varphi \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right) \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)} \quad (2.22)$$

Für ein Kugel-Scheibe-Modell gilt

$$\begin{aligned} r_{11} &= r_{12} = r_{Kugel} \\ r_{21} &= r_{22} = r_{Scheibe} = \infty \end{aligned}$$

2.4. Schmierfilmdicke nach Hamrock und Dowson

Die Berechnung der Schmierfilmhöhe bei der EHD-Schmierung wurde von vielen Autoren behandelt und ihre Ergebnisse wurden von *Dowson und Higginson* mit numerischer Unterstützung bestätigt. Nach *Dowson und Higginson* kann die Schmierfilmdicke durch vier dimensionslose Größen ermittelt werden:

$$H = kG^\alpha U^\beta W^\gamma \quad (2.23)$$

mit:

Schmierfilmparame	$H_0 = \frac{h_0}{R}$	(c.a $10^{-6} \rightarrow 10^{-2}$)
Werkstoffparameter	$G = \alpha E$	(c.a $2000 \rightarrow 6000$)
Geschwindigkeitsparameter	$U = \frac{\eta_0 u}{ER}$	(c.a $10^{-13} \rightarrow 10^{-8}$)
Belastungsparameter	$W = \frac{P}{ER}$	(c.a $10^{-5} \rightarrow 10^{-3}$)

In einer Reihe von Veröffentlichungen in [20][21][22][23] wurde von *Dowson und Hamrock* die Formel zur Berechnung der minimalen und zentralen Schmierfilmdicke in elliptischen Punktkontakten angeführt:

$$H_{min} = \frac{3,63G^{0,49}U_0^{0,68}}{W_0^{0,073}}(1 - e^{-0,68\chi}) \quad (2.24)$$

$$H_0 = \frac{2,69G^{0,53}U_0^{0,67}}{W_0^{0,067}}(1 - 0,61e^{-0,73\chi}) \quad (2.25)$$

$$\text{mit } U_0 = \frac{\eta_0 u}{ER_x}; \quad W_0 = \frac{P}{ER_x^2}; \quad \chi = \frac{a}{b}; \quad \frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}}$$

wobei χ das Verhältnis der Halbachsen der Kontaktellipse ist und R_x bedeutet den Krümmungsradius in der Bewegungsebene. Der Geschwindigkeits-, und Belastungsparameter weichen hier von den verallgemeinerten Parametern ab.

Die Einflüsse von Faktoren auf die Schmierfilmdicke bei der elastohydrodynamischen Schmierung werden in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1.: Einflüsse auf Schmierfilmdicke [3]

Faktor	Verhalten der Schmierfilmdicke bei steigendem Faktor	Anmerkung
Viskosität	↗	
Temperatur	↘	mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität
Wälzgeschwindigkeit	↗	
Last	↘	Einfluss gering
Druck-Viskositätskoeffizient	↗	Ölspezischer Wert hängt vom Druck ab
Kontaktgeometrie (Radius)	↗	

3. Literaturforschung der experimentellen Techniken zur Schmierfilmdickenmessung in EHD-Kontakten

3.1. Optische Messung der EHD Schmierfilmdicke

Viele lichtspezifische Phänomene wie Spiegelung, Refraktion, Interferenz etc. können durch die Wellentheorie erklärt werden. Einige dieser Phänomene machen Licht zu einem sehr nützlichen Werkzeug in zahlreichen Forschungsbereichen. In diesem Kapitel werden einige Begriffe und Konzepte für die physikalische Optik kurz definiert.

3.1.1. Licht-Interferometrie

Eine Lichtwelle, die eine Amplitude von A , eine Wellenlänge von λ hat und die sich in x Richtung mit einer Geschwindigkeit v bewegt, kann durch eine Sinus- oder Cosinus Funktion beschrieben werden.

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) = A \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x) \quad (3.1)$$

Der Term $(x - vt)$ in der Gleichung 3.1 ist die Phase der Lichtwelle, die die Wellenposition beim Zeitpunkt t angibt. Was in der Praxis wichtig ist, ist die Phasendifferenz von zwei Lichtquellen an der gesuchten Stelle zu finden. Wenn Licht unterschiedliche Medien durchdringt, wird dessen Geschwindigkeit entsprechend dem Brechungsindex der Medien verändert. Diese Geschwindigkeitsabweichung verursacht einen Pfadunterschied Δ , der in Folge zur Phasenabweichung δ führt.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (3.2)$$

Immer, wenn ein Lichtstrahl, der durch ein Medium mit einem bestimmten Brechungsindex läuft, mit einem anderen Medium und einem anderen Brechungsindex an der Grenze ankommt, wird er teilweise reflektiert und teilweise transmittiert. Allein durch die Reflektion an der Grenze resultiert eine Phasenverschiebung zwischen dem originalen und dem reflektierten Lichtstrahl.

Wenn zwei Lichtstrahlen, die die gleiche Wellenlänge haben, an einem Punkt zusammentreffen, tritt dort das Phänomen Interferenz auf. Durch die Überlagerung der beiden Strahlen kommt es zu einer Veränderung der Amplitude bzw. Intensität des resultierenden Lichts. Wo die Intensität stärker wird, nennt man das konstruktive Interferenz, wo die Intensität schwächer wird, nennt man dieses destruktive Interferenz.

Diese Phänomene sind in einem Beispiel (siehe Abbildung 3.1), wo ein Lichtstrahl in der Luft auf eine Glasscheibe mit einem Winkel von θ trifft, dargestellt. Der Brechungsindex der Luft ist n_1 und der der Glasscheibe ist n_2 . Hier wird der Lichtstrahl an der Grenze der Glasscheibe am Punkt A teilweise reflektiert (Pfad ADF) und teilweise durchgelassen (Pfad AB). An der Unterseite der Glasscheibe wird er noch einmal am Punkt B gespiegelt und durchdringt am Punkt C die Luft (Pfad BCF'). Aus einem Lichtstrahl werden nun zwei Lichtstrahlen, welche die gleiche Wellenlänge sowie originale aber wegen der Pfaddifferenz ($ABCF' > ADF$) verschiedene Phasen haben.

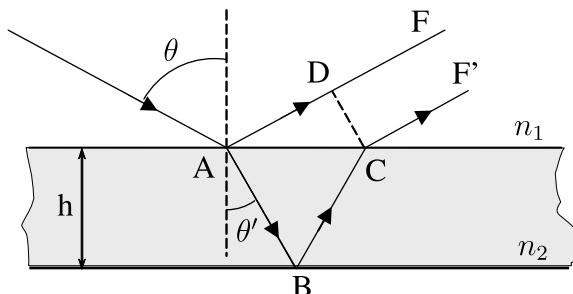


Abbildung 3.1.: Pfaddifferenz eines Lichtstrahles [24]

3.1.2. Schmierfilmdickenmessungen mittels Lichtinterferenz

Diese Methode wurde in den frühen sechziger Jahren auf der Basis der Lichtinterferenz entwickelt und verwendet eine flache, transparente Scheibe (Glas, Saphir), die gegen eine glänzende Stahlkugel oder -rolle gerichtet ist (siehe Abbildung 3.2). Die berührende Fläche der Scheibe ist mit einer halbdurchsichtigen Schicht (Chrom) beschichtet, so dass ein auf den Kontakt auftreffendes Licht (monochrom) zweimal reflektiert wird, erstens an der Glas-Metallschicht-Grenzfläche und zweitens an der Kugel-, Rolleroberfläche.

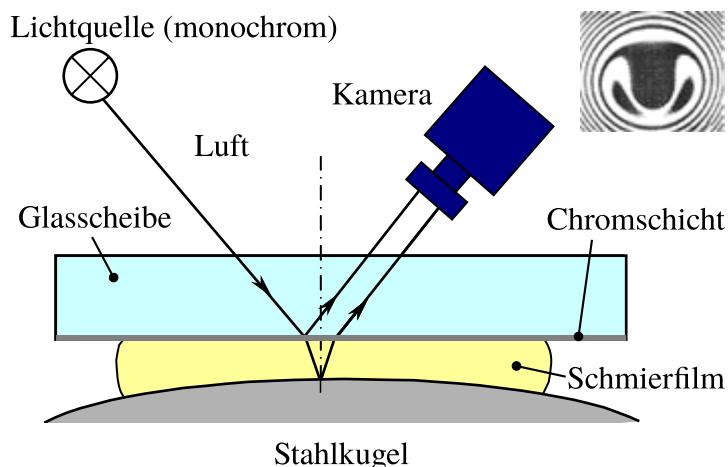


Abbildung 3.2.: Prinzip der optischen Schmierfilmdickenmessung [24]

Bei Rekombination führt die Pfaddifferenz zwischen den reflektierten Strahlen entweder zu einer konstruktiven oder zu einer destruktiven Interferenz. Dieses Interferenzmuster hängt von der Dicke der Chromschicht und der Schmierfilmdicke ab. Bei der bekannten Chromschichtdicke und durch entsprechende Kalibrierung lässt sich daraus die Schmierfilmdicke bestimmen. Leider ist die Auflösung dieser Methode nicht so hoch. Nur der Schmierfilm, der dicker als ein Viertel der Wellenlänge der Lichtquelle ist, ist messbar.

3.1.3. Variante der optischen Messmethoden

Johnston et al [25] versuchte die geringe Auflösung der klassischen Methode zu überwinden. Sein Ansatz bestand darin, eine Abstandsschicht aus Silikat mit fixierter Dicke zu verwenden, die auf der 20 nm Chromschicht abgelagert wird. Die Silikatschicht hat einen Brechungsindex, der ähnlich dem von Mineralölen ist und als "festes Öl" wirkt. Sie soll die Trennung zwischen den Kontaktflächen erhöhen und ermöglicht dadurch die Messungen von Filmen theoretisch beliebiger Dicke. Die Vorteile der Spacer-Schicht-Methode wurden in der *Ultra-Dünnfilm-Interferometrie-Methode* (UTFI) voll ausgenutzt, die weißes Licht und ein Spektrometer verwendet, um das Licht in seine Wellenlängenkomponenten zu teilen (siehe Abbildung 3.3). Die Auflösung dieser Technik liegt in der Größenordnung von Nanometern.

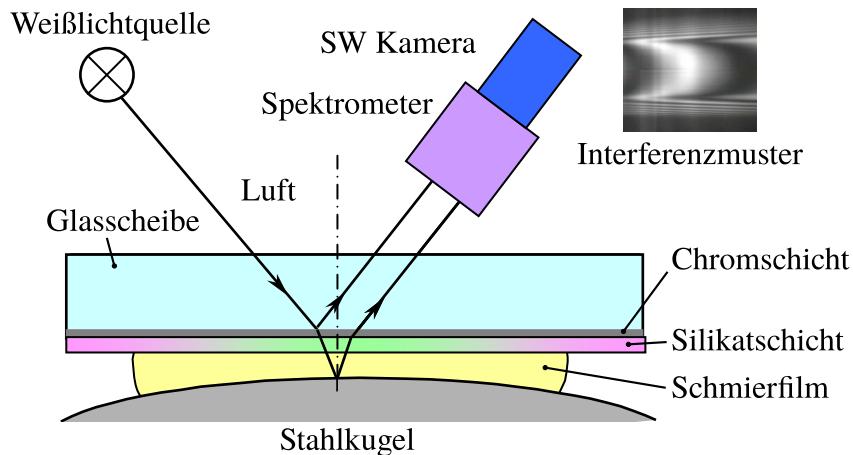


Abbildung 3.3.: Spacer-Layer-Methode [25]

Eine Beschränkung der Technik der Spacer-Layer-Methode besteht darin, dass nur eine Messung von der Mitte des Kontakts aufgenommen wird. *Cann et al.* [26] beschrieb die Entwicklung einer neuen Technik, die die Abbildungsfähigkeiten des klassischen optischen Verfahrens mit der UTFI-Methode kombiniert: das *Spacer-Layer-Imaging-Verfahren* (SLIM) (siehe Abbildung 3.4).

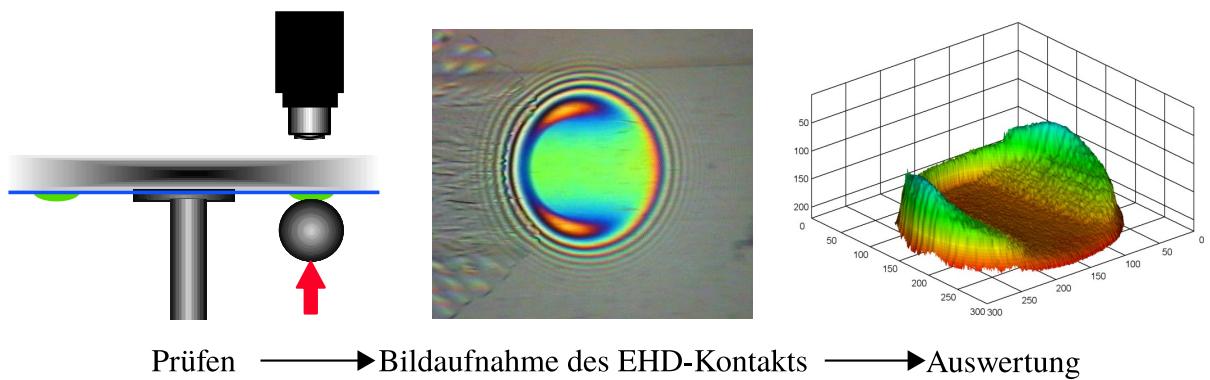


Abbildung 3.4.: SLIM Methode [27]

Anstatt ein Spektrometer zu verwenden, um die Wellenlänge des vom Bild eines EHD-Kontakts zurückgeworfenen Lichts zu bestimmen, benutzt SLIM eine hochauflösende RGB-CCD-Farbkamera, um ein Bild des gesamten Kontakts aufzunehmen. Das SLIM-Softwarepaket passt die Farben im Bild anhand einer vorher festgelegten Farbraumkalibrierung an die Schmierfilmdicke an. Das System erzeugt somit in wenigen Sekunden eine Filmdickenkarte des gesamten EHD-Kontakts. Diese Fähigkeit

macht es zu einem geeigneten Werkzeug für die Untersuchung des EHD-Kontakts unter verschiedenen Bedingungen wie zum Beispiel bei Fettschmierung, rauher Oberfläche, mangelnder Schmierung oder additiver Grenzschichtbildung.

3.2. Elektrische Messung der EHD Schmierfilmdicke

Neben der optischen Messmethode gibt es noch die elektrische Messmethode zur Untersuchung der EHD-Schmierung, wie zum Beispiel mit Hilfe der Messungen von Widerstand, Kapazität und Entladespannung. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie direkt bei Maschinenelementen, welche aus Stahl sind, während des Betriebs verwendet werden kann. Allerdings gibt es auch Nachteile: Die Form des Kontakts, an dem die große lokale Verformung stattfindet, ist nur angenommen und stark vereinfacht. Dieses hat Einfluss auf die Widerstands- und Kapazität-Messergebnisse. Ein anderer Faktor ist die Sauberkeit des Schmierstoffes, welche schwer zu kontrollieren ist. Generell liefert die elektrische Methode nur mittlere Werte über den gesamten Kontaktbereich und gibt leider keine direkte Indikation der Form des Schmierfilms.

Normalerweise wird die elektrische Methode für folgende Anwendungen verwendet:

- Schmierfilmdickenmessung bei bekannten Schmierstoffen
- Detektion des Voll-Schmierfilmaufbaus im Kontakt der rauen Oberflächen
- Evaluierung des geschmierten Kontakts unter Einfluss des elektrischen Felds

3.2.1. Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessmethode ist geeignet, den Schmierungszustand qualitativ zu beschreiben. Der Widerstand ist eine Indikation der direkten Berührung der Rauheitspitzen der KontaktPartner. Bei vollständiger Oberflächentrennung (Flüssigkeitschmierung) soll der Widerstand theoretisch unendlich groß sein. Zum besseren Verständnis der elektrischen Vorgänge im EHD-Kontakt wurde eine Reihe Arbeiten an unterschiedlichen Modellprüfständen und Maschinenelementen durchgeführt.

In einem System, bestehend aus einer feststehenden Kugel und einem rotierenden Zylinder, hatte *Furey* [28] das Verhalten des elektrischen Widerstands untersucht. Die Ergebnisse zeigten eine große Streuung des Widerstands bei Mischreibung (siehe Abbildung 3.5). Zum Beschreiben für einen isolierenden Schmierfilm definierte er einen Wert von $10 \text{ k}\Omega$. Im Oszilloskop erkannte er, dass es zwei Zustände des Kontaktwiderstands gab: hoch und niedrig. Das zeitliche Verhältnis zwischen den beiden Zuständen wurde über Intervalle von 10 ms aufgenommen, ausgewertet und das Ergebnis als prozentualer Anteil des direkten Kontakts angegeben. Mit dieser Methode konnte er berechnen, wie groß der Anteil der Festkörperkontakte bei jedem Reibungszustand ist.

In seiner Arbeit [29] verwendete *Kuhlmann* zwei unterschiedliche Systeme zur Widerstandsmessung: Ein System basiert auf der Wheatstonsche Brückenschaltung (siehe Abbildung 3.6 links), welche zur Vermeidung eines Tunneleffektes mit Wechselstrom gespeist wird. Der Zusammenhang zwischen dem Widerstand R_L des Lagers und der gemessenen Brückenspannung U_m wird durch eine aufwändige Kalibration über variable Referenzwiderstände hergestellt. Zur Vereinfachung der Messkettenkalibrierung und zur Verbesserung der Messempfindlichkeit von R_L bei mehr als $1 \text{ k}\Omega$ setzte *Kuhlmann* ein direkt

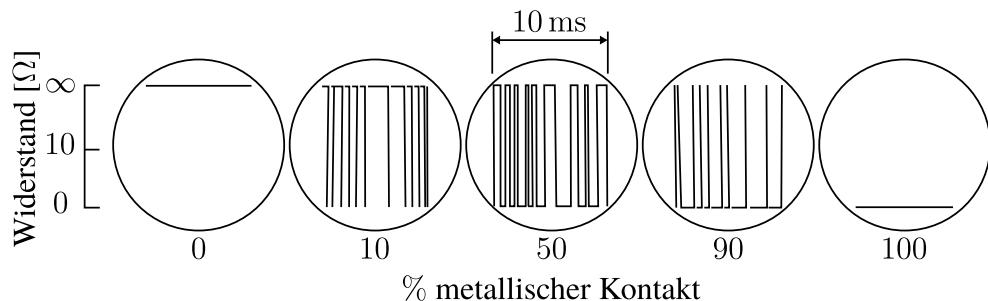


Abbildung 3.5.: Der prozentuale Anteil von metallischen Kontakt [28]

messendes Trägerfrequenz-Messsystem ein (siehe Abbildung 3.6 rechts). Der Widerstandssteig wird an einer hochgenauen Wechselstromquelle ($1,0 \pm 0,2$ mA) angeschlossen. Da R_V und R_P bekannt sind, konnte er aus dem Spannungsabfall über den Gesamtwiderstand den Lagerwiderstand bestimmen.

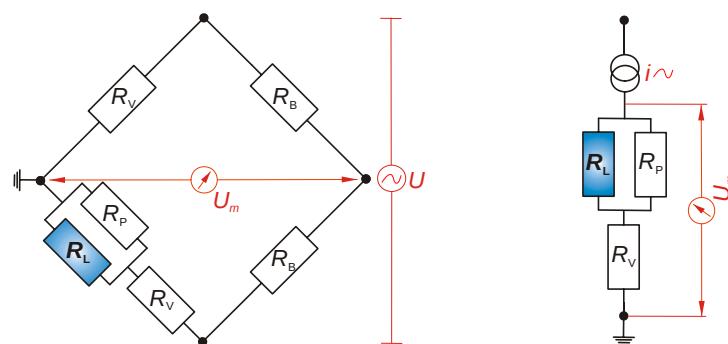


Abbildung 3.6.: Ersatzschaltbild für die Messsysteme [29]

Beide oben genannte Messsysteme wurden von *Kuhlmann* bei Fettuntersuchungen mit Schräkgugellagern und Kegelrollenlagern bei niedrigen Betriebstemperaturen eingesetzt (siehe Abbildung 3.7). Durch eine 0,4 mm dicke Keramikbeschichtung zwischen der Lagersitze und der Welle konnte er den Widerstand für beide Lager separat messen. Abbildung 3.7 zeigt die elektrischen Ersatzschaltbilder für einen Wälzkörper im Schräkgugellager und Kegelrollenlager. Alle Wälzkörper eines Lagers sind elektrisch parallel geschaltet und der Kontakt zwischen Rollenstirn und Bord beim Kegelrollenlager muss berücksichtigt werden.

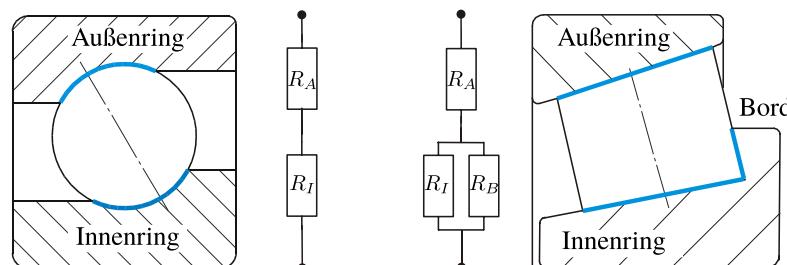


Abbildung 3.7.: Schema des Schräkgugellager- und Kegelrollenlager-Einzelkontakte [29]

3.2.2. Kapazitätssmessung

Der Vorteil bei der Kapazitätssmessung ist wie bei der Widerstandsmessung die einfache Anwendung im Maschinenelement. Es ist auch möglich, bei dieser Methode eine quantitative Schmierfilmdickenmessung durchzuführen, welche bei der resistiven Methode schwer oder unmöglich ist.

Auf Basis der Konstantstromladung hat *Barz* [30] ein System zur kapazitiven Schmierfilmdickenmessung im Wälzlager entwickelt. Hier werden die Oberflächen zwischen Wälzkörpern, Außenring und Innenring bei einem trennenden Schmierfilm als Kondensator betrachtet. Die Kapazität des einzelnen EHD-Kontaktes wird nach dem Modell von *Brüser* [31] beschrieben:

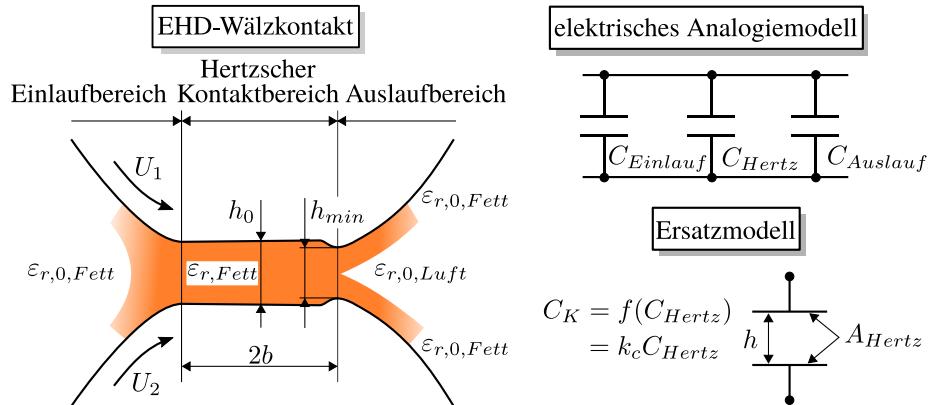


Abbildung 3.8.: Kapazitives Modell eines EHD-Kontaktes [30]

Im Modell von *Barz* wird der EHD-Kontakt in drei Bereiche — *Einlaufbereich*, *Hertzschener Kontaktbereich* und *Auslaufbereich* — geteilt und unter folgenden Annahmen betrachtet:

1. Der Einlaufbereich ist vollständig mit Schmierstoff gefüllt.
2. Im Hertzschener Kontaktbereich herrscht es eine konstante Schmierfilmdicke h_0 .
3. Die Einschnürung vor dem Auslaufbereich wird vernachlässigt.
4. Im Auslaufbereich haftet der Schmierstoff gleichmäßig an den Kontaktpartner an.
5. Das elektrische Feld im Hertzschener Bereich ist homogen.

Mit diesen Annahmen kann man die Kontaktkapazität so berechnen:

$$C_K = C_{Einlauf} + C_{Hertz} + C_{Auslauf} \quad (3.3)$$

Aufgrund des großen Einflusses und der linearen Propotionalität von der C_{Hertz} mit der C_K vereinfachte *Barz* die Kontaktkapazität als:

$$C_K = f(C_{Hertz}) = k_C C_{Hertz} \quad (3.4)$$

$$C_{Hertz} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_{Hertz}}{h_0} \quad (3.5)$$

wobei A_{Hertz} die Größe der Hertzschener Kontaktfläche, h_0 die zentrale Schmierfilmdicke, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ A s/V m}$) und ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante ist. In der Gleichung 3.5 definierte *Barz* einen Umrechnungsfaktor k_C , welcher die $C_{Einlauf}$ und die $C_{Auslauf}$ berücksichtigt. Er ist von den Betriebsbedingungen, dem Lager, dem Schmierstoff, der Laufzeit etc., abhängig. Da das Verhältnis zwischen $C_{Einlauf}$ und $C_{Auslauf}$ bei der Änderung der Schmierfilmdicke nicht konstant bleibt, variiert der Faktor k_C bei unterschiedlichen Filmdicken. Für den betrachteten Fall mit axial belasteten Spindellagern hat *Barz* den Wert $k_C = 3,5$ bestimmt.

Da die Kontakte zwischen den Wälzkörpern mit dem Außenring und dem Innenring nicht gleich sind, führte *Barz* weiterhin einen Faktor k_h zur individuellen Bestimmung der Schmierfilmdicke an den beiden Ringen ein. Dieser ist das Verhältnis von den nach der EHD-Theorie berechneten Schmierfilmdicken am Innenring $h_{EHD,i}$ und am Außenring $h_{EHD,a}$ und berechnet sich unter der Annahme, dass die Schmierungbedingungen am Innenring und Außenring gleich sind, zu:

$$k_h = \frac{h_a}{h_i} = \frac{h_{mess,a}}{h_{mess,i}} = \frac{h_{EHD,a}}{h_{EHD,i}} \quad (3.6)$$

Schließlich berechnen sich die Schmierfilmdicken am Innenring bzw. am Außenring aus der gemessenen Gesamtkapazität C_{ges} eines Lagers mit einer Wälzkörperanzahl Z zu:

$$h_{mess,i} = 2Zk_C\varepsilon_0 \frac{\left(\varepsilon_{r,i}A_{Hertz,i}\right) \left(\varepsilon_{r,a} \frac{A_{Hertz,a}}{k_h}\right)}{\left(\varepsilon_{r,i}A_{Hertz,i}\right) + \left(\varepsilon_{r,a} \frac{A_{Hertz,a}}{k_h}\right)} \frac{1}{C_{ges}} \quad (3.7)$$

$$h_{mess,a} = k_h h_{mess,i} \quad (3.8)$$

3.3. Alternative EHD Schmierfilmdicke Messmethoden

3.3.1. Taktile

Um den Schmierfilmaufbau in Axialzylinderrollenlagern unter der Annahme, dass die zentrale Schmierfilmdicke h_0 eine gleiche Verschiebung zwischen Wälzkörpern und Lagerringen verursacht, zu untersuchen, benutzte *Walbeck* in seiner Arbeit [32] einen modifizierten FE8-Prüfkopf (FE8-SDM) benutzt (siehe Abbildung 3.9).

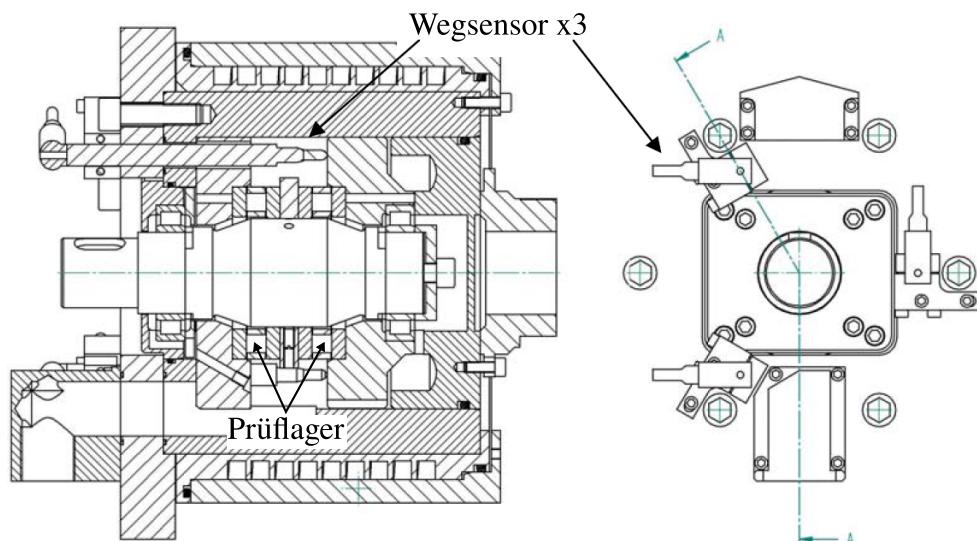


Abbildung 3.9.: FE8-SDM Prüfkopf [32]

In der Anordnung, die nebeneinander aufgebaut ist, sollen die Schmierfilme in zwei Prüflagern eine Gesamtverschiebung von $x_{ges} = 4h_0$ verursachen. Zur Messkette, die einen maximalen Messfehler von $0,9 \mu\text{m}$ aufweist, gehören die drei hochauflösenden induktiven Wegaufnehmer. Wird jener auf den einzelnen Schmierspalt bezogen, reduziert sich der maximal mögliche Fehler auf $0,23 \mu\text{m}$. Da die Erwärmung im Schmierspalt Messfehler verursachen kann, führte *Walbeck* die Messungen bei relativ geringen Kontaktpressungen (419 MPa bis 593 MPa) durch. Allerdings ist die Wärmeentwicklung durch die Lagerreibung nicht vermeidbar und dadurch ist eine absolute Schmierfilmdickenmessung wegen Wärmedehnung in den Bauteilen nicht möglich. Abhilfe schafft hier die Differenzmessung der Verschiebung zwischen Stillstand und Betriebsdrehzahl. Um die thermischen Effekte auf die Messergebnisse gering zu halten, soll die Drehzahländerung innerhalb einer halben Sekunde stattfinden. Zusätzlich wurde die Wegmessungen von Winkelstellung der Welle getriggert, um durch Formtoleranzen von Lagerscheiben hervorgerufene Fehler zu vermeiden.

Ein ähnliches System wurde von *Kuhlmann* [29] zur Schmierfilmdickenmessung in Schräkgugel- und Kegelrollenlagern eingesetzt. Wegen der Geometriedifferenz zwischen zwei Lagerbauarten und dem Axialzylinderrollenlager ist die axiale Verschiebung in diesem Fall eine Funktion des Druckwinkels α . Für das Kegelrollenlager muss zusätzlich der Kontakt zwischen Rollenstirnfläche und Innenringbord berücksichtigt werden.

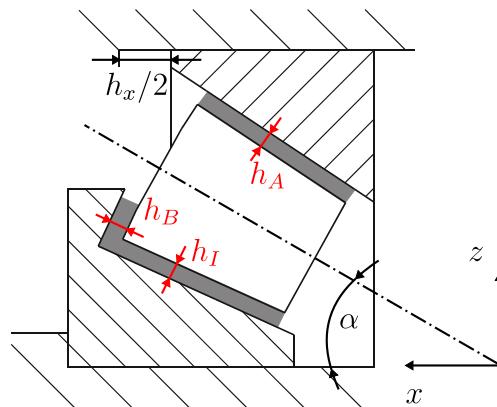


Abbildung 3.10.: Schmierfilme im Kegelrollenlager [29]

Die Schmierfilmdickenmessungen wurden von *Kuhlmann* während des Abbremsvorgangs von der Betriebsdrehzahl auf eine minimale Drehzahl von $n_0 = 0,5 \text{ min}^{-1}$ innerhalb 1,5 s durchgeführt (siehe Abbildung 3.11).

Anstatt von der Winkelstellung der Welle getriggert zu sein, wurde vor jedem Versuch eine Kalibrierkurve aufgenommen. Diese Kurve stellt die gemittelten Planlaufabweichungen zwischen den Lagern und der Prüfwelle in Abhängigkeit von der Wellenstellung dar (siehe Abbildung 3.12). Bei der Auswertung der Schmierfilmdicke findet eine Korrektur der gemessenen Verschiebung an der jeweiligen Wellenposition anhand der Kalibrierkurve statt.

3.3.2. Ultraschall

Dwyer-Joyce et al. [33] beschrieben ein neues Verfahren zur Dickenmessung einer zwischen einer Stahlkugel und einer Stahlscheibe liegende Flüssigkeitsschicht mittels der Reflektion des Ultrashalls. Diese Reflektion hängt von der Ultraschallfrequenz, den akustischen Eigenschaften der Flüssigkeit bzw. der Festkörper und der Schichtdicke ab. Wenn die Wellenlänge des gesendeten Impulses viel größer als die Dicke der Flüssigkeitsschicht ist, wird die Antwort durch die Steife der Schicht bestimmt. Wenn die

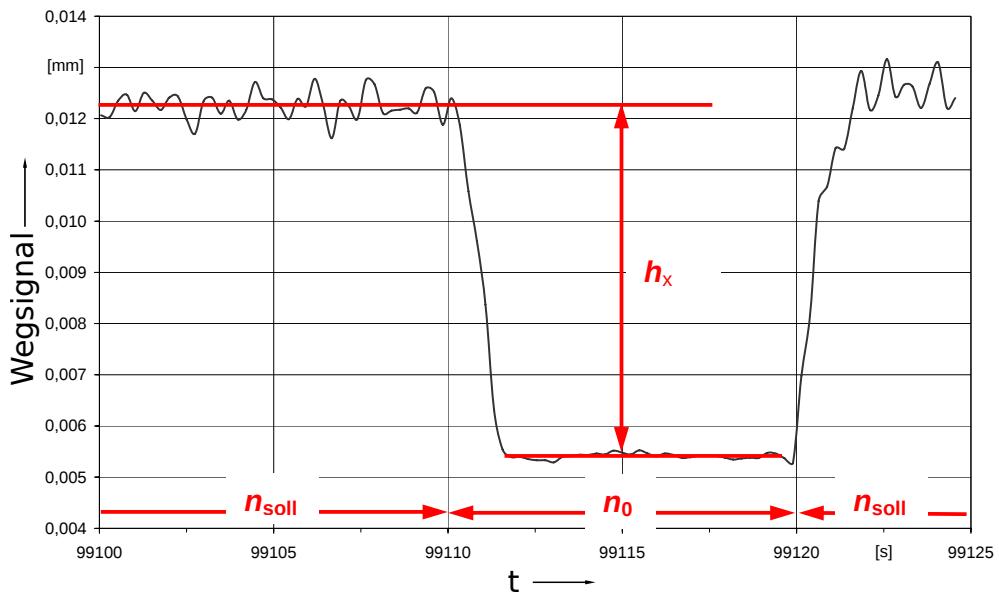


Abbildung 3.11.: Messung während eines Abbremsvorgangs [29]

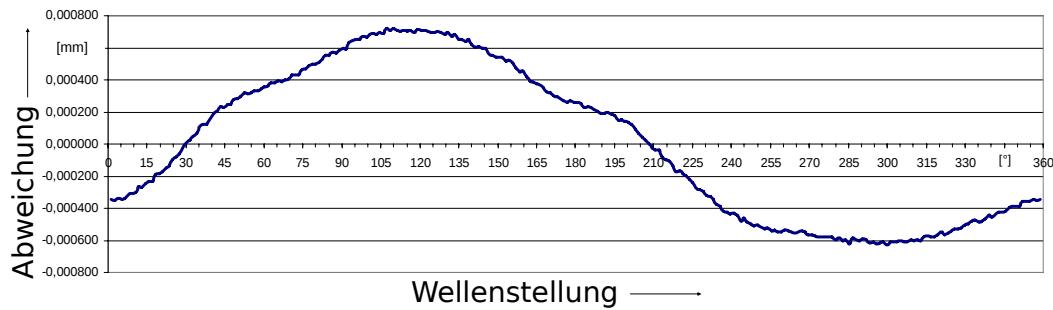


Abbildung 3.12.: Kalibrierkurve [29]

Wellenlänge ähnlich der Schichtdicke ist, wird die Wechselwirkung vom Ultraschall mit der Flüssigkeit durch das Resonanzverhalten gesteuert. Durch den Vergleich des Frequenzspektrums des reflektierten Impulses mit dem des gesendeten Impulses wird die Bestimmung der Schmierfilmdicke ermöglicht. Die Messmethode von Dwyer-Joyce war in der Lage, Filme im Bereich von 50 mm bis 500 mm zu messen. Der schematische Aufbau des Ultraschall-Prüfstands zur Schmierfilmdickenmessung ist in Abbildung 3.13 zu sehen.

Ein Schmierfilm-Überwachungssystem an einem Rillenkugellager mittels Ultraschall wurde von Zhang et al. in seine Arbeit [34] beschrieben (siehe Abbildung 3.14). Eine Hochfrequenz-Ultraschallsonde ist am statischen Außenring des Lagers montiert. Die Sonde ist auf die Kugel-Laufbahn ausgerichtet und wird verwendet, um den Reflektions-Koeffizienten des Schmierstoffes in der Kontaktellipse zwischen den Lagerkomponenten zu messen. Der Reflektions-Koeffizient kennzeichnet den Schmierfilm, daraus kann seine Dicke berechnet werden. Ein optisches Triggersystem ermöglicht mehrere Messungen, wenn jeder geschmierte Kontakt sich an der Messstelle vorbeibewegt. Drei Verunreinigungsmaterialien (Aceton, Wasser und Sand) wurden separat zu dem Schmiermittel hinzu gegeben, um das Versagen des Lagers einzuleiten. Diese Zugabe simuliert allgemeine Fehlermechanismen, die unter realen Bedingungen auftreten können. Alle Ergebnisse, wie zum Beispiel die Schwingung, die Temperatur, die Ultraschall-Reflektions-Koeffizienten wurden unter diesen drei Fehlerszenarien aufgenommen und lieferten wertvolle diagnostische Informationen über die Fehler sowie Frühschadenmeldung.

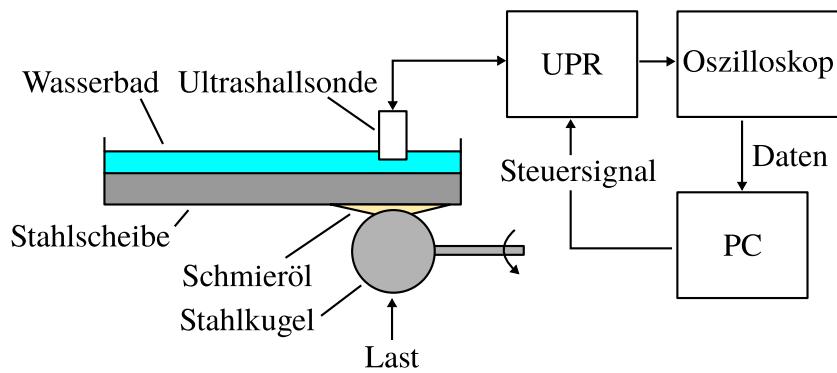


Abbildung 3.13.: Schematischer Aufbau der Ultraschall-Prüfstand [33]

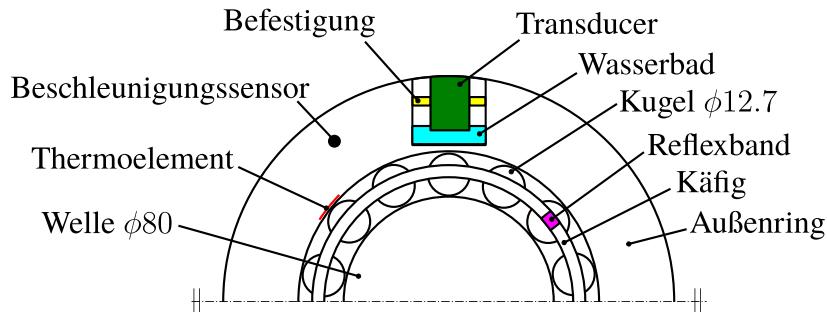


Abbildung 3.14.: Schmierfilm-Überwachungssystem mittels Ultraschall [34]

3.3.3. Laserinduzierte Fluoreszenz

Jones *et al.* beschrieb in seiner Arbeit [35] die Kalibrierung einer Technik, die auf Basis der Laser-induzierten Fluoreszenz die quantitative Messung von industriellen Beschichtungen mit einer Dicke von 10 nm bis 20 nm ermöglicht. Wachsfilme, die mit einem fluoreszierenden Rhodaminfarbstoff dotiert waren, wurden durch ein Elektrospray-Verfahren auf eine Seite der aluminiumbeschichteten Glasscheibe angebracht. Mit einem optischen Profilometer wurden mittels Lasertriangulation die Filmdicken von 220 nm bis 450 nm ermittelt. Die emittierte Fluoreszenz wurde unter der Verwendung einer fasergekoppelten Sonde mit Laseranregung und Spektraldetektion aufgenommen. Die Fluoreszenzemission wurde wegen der Aluminiumschicht um das Zehnfache reduziert. Die Kalibrierung lieferte gute Ergebnisse, die sich in Übereinstimmung mit den aus Volumenmessung im Beschichtungsprozess geschätzten Filmdicken befinden.

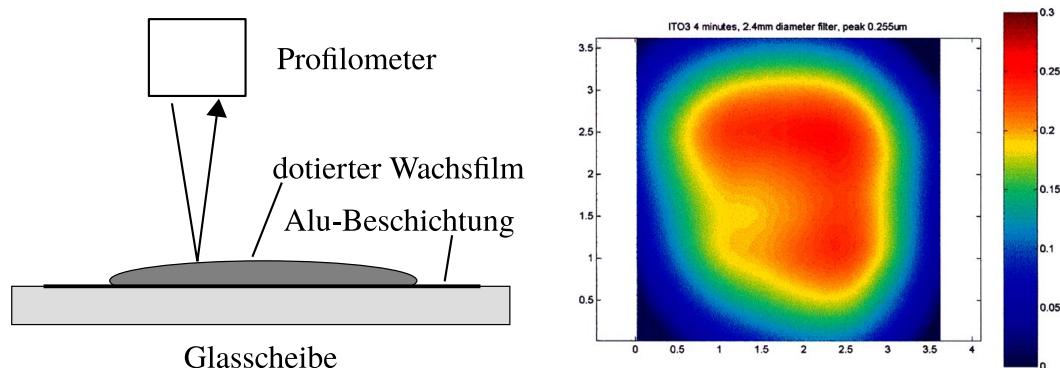


Abbildung 3.15.: Schematischer Aufbau der Kalibrierung mit Profilometer (links) und deren Scan-Ergebnis (Dickenkarte) (rechts) [35]

4. Aufbau und Funktion des EHD-Messgeräts

Zur Schmierfilmdickenmessung wurde ein “EHL Ultra Thin Film Measurement System” der Firma PCS-Instrument genutzt (siehe Abbildung 4.1). Es basiert auf dem Kugel-Scheibe-Modell. Mit optischer Interferenz wird die Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt ermittelt. Durch einen leicht modifizierten Aufbau ermöglicht das Gerät auch die Bestimmung von Reibkoeffizienten der eingesetzten Schmierstoffe. Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Komponenten des EHL-Gerätes und die Modifikation im Rahmen dieser Arbeit eingegangen.



Abbildung 4.1.: EHL-Messgerät [36]

4.1. PC und Elektronikeinheit

Zur Bedienung des Prüfstands steht ein PC zur Verfügung. Der PC hat Windows 98 als Betriebssystem und fünf ISA-Steckkarten. Diese Karten sind für die Ein-/Ausgabe, die Zeiterfassung, die SW-Bilderfassung sowie ADC und DAC zuständig. Die Kommunikation mit dem Prüfstand erfolgt durch das Softwarepaket “Ultra Thin Film EHL Measurement”. Der PC ist mit einem Spektrometer, einem SW-Monitor und einer Elektronikeinheit verbunden.

Zu der Elektronikeinheit gehören die Motoren, die Lasteinheit sowie die Heizvorrichtung. Außerdem ist eine Überwachungsfunktion eingebaut, die bei einem Absturz der Software oder des PC den Prüfstand abschaltet.

4.2. Mechanischer Aufbau

Abbildung 4.2 zeigt den Schematischen Aufbau des EHL-Prüfstands. Das Reservoir ist bei Messungen mit Öl bis zur Hälfte der Kugel gefüllt. Durch die Heizvorrichtung kann das Öl bis c.a 150 °C erhitzt werden.

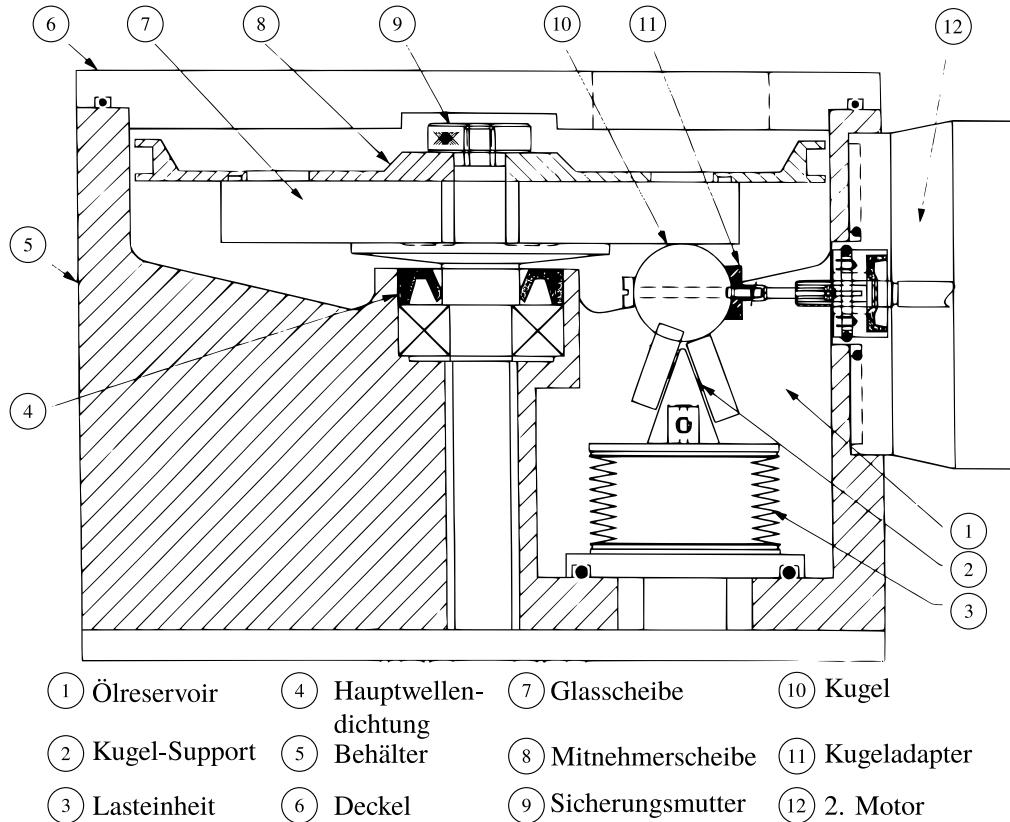


Abbildung 4.2.: Schematischer Aufbau des EHL-Prüfstands [36]

Der elastohydrodynamische Schmierfilm wird durch einen Kugel-Scheibe-Kontakt erzeugt. Die Kugel ist hochglanzpoliert, aus 100Cr6 Stahl und hat einen Durchmesser von 19,05 mm. Es gibt zwei Variationen der Kugel: normal und durchbohrt. Über ein Kugel-Support wird die Kugel von unten von einer Lasteinheit gegen eine rotierende Glasscheibe gedrückt. Die Last ist von 0 N bis 50 N wählbar und ergibt einen maximalen Druck von 0,7 GPa im Kontaktpunkt (bei Glasscheibe). Die Glasscheibe hat einen Durchmesser von 100 mm und ist an der Unterseite mit einer durchlässigen Chromschicht und einer Silikatschicht versehen. Es gibt durch die axiale Verschiebung des Kugel-Supports insgesamt 21 befahrbare Spuren ($R = 34 \rightarrow 44$ mm) auf der Scheibe. Ein Spurwechsel ist nötig, weil die Silikatschicht, die nicht so robust wie die Chromschicht ist, im Laufe der Zeit abgenutzt wird.

Die Glasscheibe kann von 1 mm/s bis 5 m/s durch einen Motor betrieben werden. Ein weiterer Motor ermöglicht auch das Antreiben der Kugel. In diesem Fall sind Versuche mit Schlupf zwischen Kugel und Scheibe innerhalb von 0 % bis 200 % möglich.

Das originale Kugel-Support von PCS-Instrument besteht aus drei Lagern, die auf einem dreieckigen Aluminium-Klotz geschraubt werden. Eine modifizierte Lagerung mit einstellbarer, geführter Achse von Wittek [37] steht zudem zur Verfügung (siehe Abbildung 4.3).

Die Spezifikationen des Prüfstands von PCS sind in Tabelle B.2 zusammengefasst.



Abbildung 4.3.: Originaler PCS-Support (links) und von Wittek modifizierter Support (rechts) [37]

4.3. Messsystem zur Schmierfilmdickemessung

Beim EHD-Prüfstand von PCS Instrument wird die Schmierfilmdicke im Kugel-Scheibe-Kontakt mit Weißlichtinterferometrie (siehe Abschnitt 3.1) bestimmt. Der Kontakt wird von oben durch die Glasscheibe beleuchtet und das reflektierende Bild wird von einem Spektrometer bewertet. Die Messeinrichtung wird in Abbildung 4.4 dargestellt.

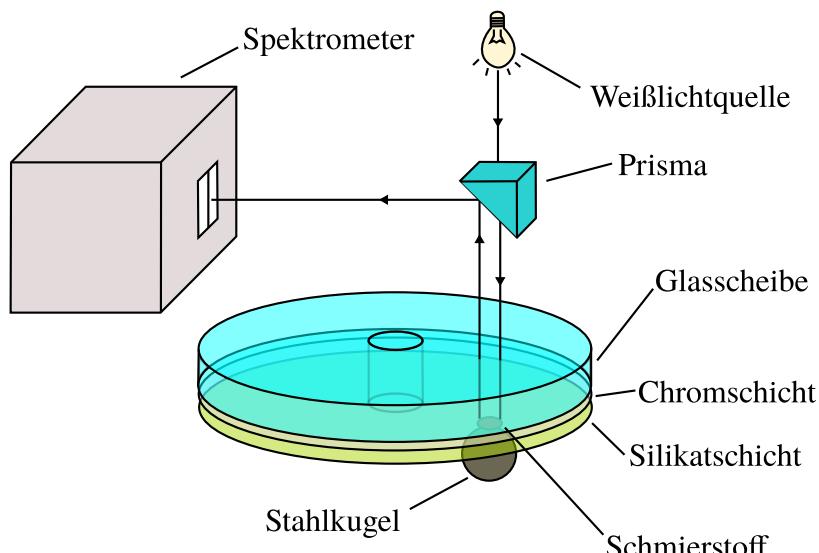


Abbildung 4.4.: Messprinzip des EHD-Prüfstand von PCS [38]

Die Glasscheibe weist nicht nur eine Chromschicht, sondern auch eine Silikatschicht (Spacer-Layer) auf. Diese hat die Funktion eines Harter-Ölfilms, der immer da ist. Das heißt, dass es im Stillstand Interferenzen gibt. Die Interferenzmuster sind fabelhafte Bilder (siehe Abbildung 4.5). Aus ihrer Farben kann die Schmierfilmdicke bei bekannter Silikatschichtdicke berechnet werden.

Da eine Auswertung der Schmierfilmdicke aus den Farben der Interferenzen durch einen menschlichen Beobachter zu ungenau wäre, wird der reflektierende Lichtstrahl über ein Prisma durch einen Spalt in ein Spektrometer geleitet. Dort werden die Interferenzmuster analysiert und aus einem SW-Monitor angezeigt (siehe Abbildung 4.6).

Der senkrechte, weiße Balken im Interferenzmuster sind die Maxima, wo die konstruktiven Interferenzen stattfinden und gibt die Wellenlänge an. Wandern diese Balken nach rechts, nimmt die Wellenlänge bzw. Schmierfilmdicke zu. Mit Hilfe des Ultra-Softwarepaket kann man aus dem Interferenzmuster

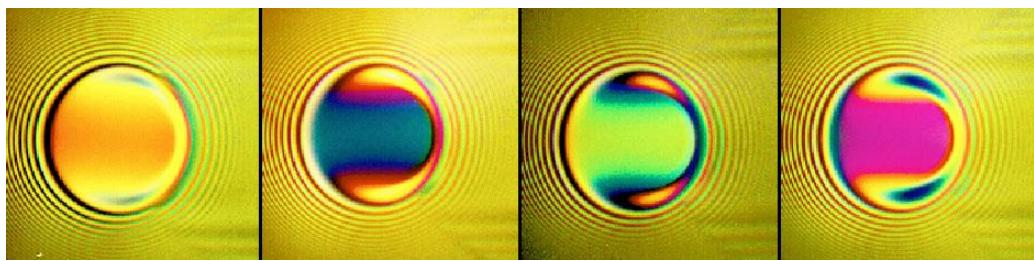


Abbildung 4.5.: Interferenzmuster eines Punktkontaktes bei zunehmenden Geschwindigkeiten [27]

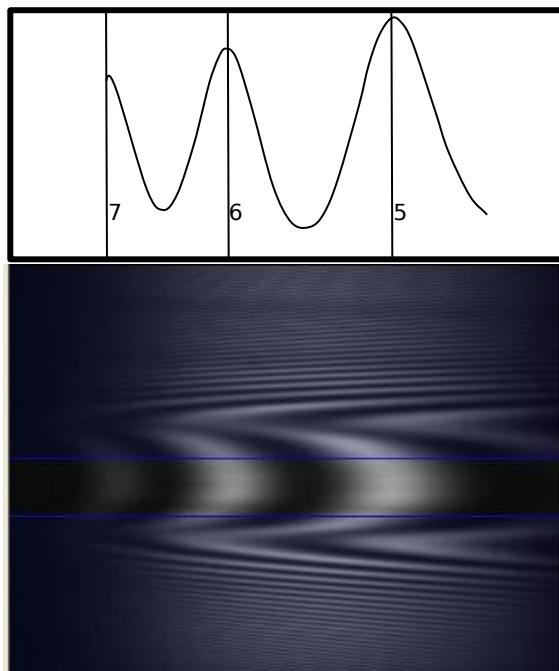


Abbildung 4.6.: Interferenzmuster im Spektrometer [27]

die genaue Schmierfilmdicke berechnen.

5. Konstruktive Bearbeitung

Um die Messgenauigkeit der optischen Interferometrie-Technik mit der einfachen Adaptierbarkeit an verschiedenen realen Maschinenelementen der elektrischen Messmethode zur Schmierfilmdickenmessung im EHD-Kontakt zu vereinigen, soll ein neues modulares Messsystem auf Basis des EHD-Prüfstands von PCS entwickelt werden. Dieses System soll gleichzeitig die optische und elektrische (kapazitive) Messung erlauben. Für ein solches System gibt es folgende Anforderungen, die durch konstruktive Bearbeitung in den nächsten Abschnitten gelöst werden:

- Elektrische Isolierung der Glasscheibe und der Kugel des gesamten Systems
- Elektrische Zugänge für die Messproben an der Scheibe und der Kugel
- Beschichtung auf der Scheibe, die eine elektrische und eine optische Messung gleichzeitig erlaubt.

5.1. Konstruktion der Kugelführung

Da das modifizierte Kugelsupport mit einstellbarer Achse von *E. Wittek* [37] wegen Rundlaufabweichungen nur bis zu einer Wälzgeschwindigkeit von ca. 0,7 m/s einsetzbar ist, wird die originale Kugelführung der Firma *PCS Instruments* im Rahmen dieser Arbeit modifizierte und weiter benutzt. Bei der standardmäßigen Kugelführung wird eine durchgebohrte Kugel in einem Adapter eingeklemmt, welche damit über einen Querstift mit der Motorausgangswelle des zweiten Antriebs formschlüssig verbunden wird. Für die kapazitive Messung soll die Kugel elektrisch mit dem gesamten System isoliert werden. Das erfolgt durch die Verwendung einer Kunststoffwelle. Die Kugelaufnahme wird aus Messing gefertigt, um den Kontaktwiderstand der, das Signal übertragenden Kohlebürsten, zu reduzieren. Abbildung 5.1 zeigt den Zusammenbau der neuen Kugelführung an.

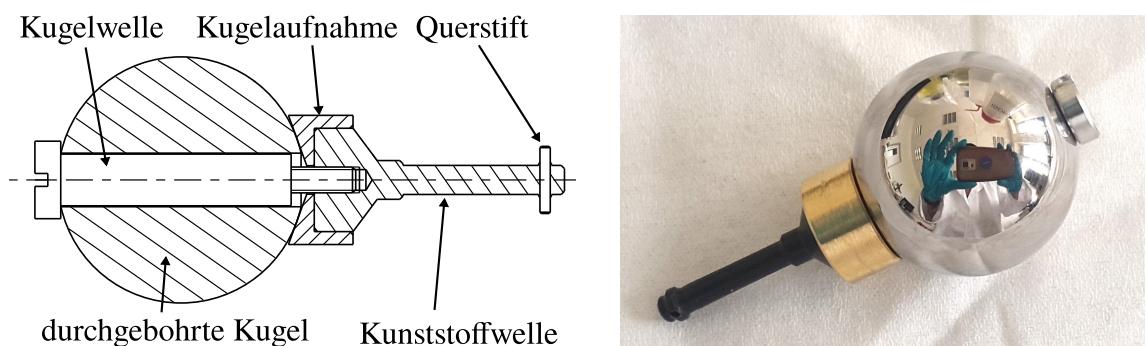


Abbildung 5.1.: Aufbau der neuen Kugelführung

Die geführte Kugelachse ermöglicht die Versuche mit Schlupf und verhindert auch das unkontrollierte Eindringen des Schmierstoffes (Öl, Fett) in den Kontakt. Der Kraftfluss zwischen dem zweiten Motor

und der Kugel kann durch den Wegfall des Querstifts unterbrochen werden. In diesem Fall dreht sich die Kugelführung frei in der Motorausgangswelle.

5.2. Konstruktion des Kugelsupports

Das neue Kugelsupport besteht aus drei Rillenkugellagern, die durch drei M3 Schrauben auf einem dreieckigen Sockel befestigt werden (siehe Abbildung 5.2). Die Kugel wird von den drei Lagern sicher von unten gegen der Glasscheibe gedrückt. Da die Kugel mit der Lasteinheit elektrisch isoliert werden muss, wird der Sockel aus Kunststoff gefertigt. Auf der Unterseite des Sockels befinden sich zwei Löcher, die mit dem Stift der Lasteinheit arretiert werden, dadurch wird die Position des Kugelsupports während der Versuche sichergestellt. An der Seite des Sockels sind zwei M3 Bohrung zur Anbringung der Kohlebürstenhalter, die für die Aufnahme der elektrischen Signale von der Kugel zuständig sind, versehen. Bei den Versuchen mit Fett ist es dort auch möglich, die Befestigungsvorrichtung zu montieren.

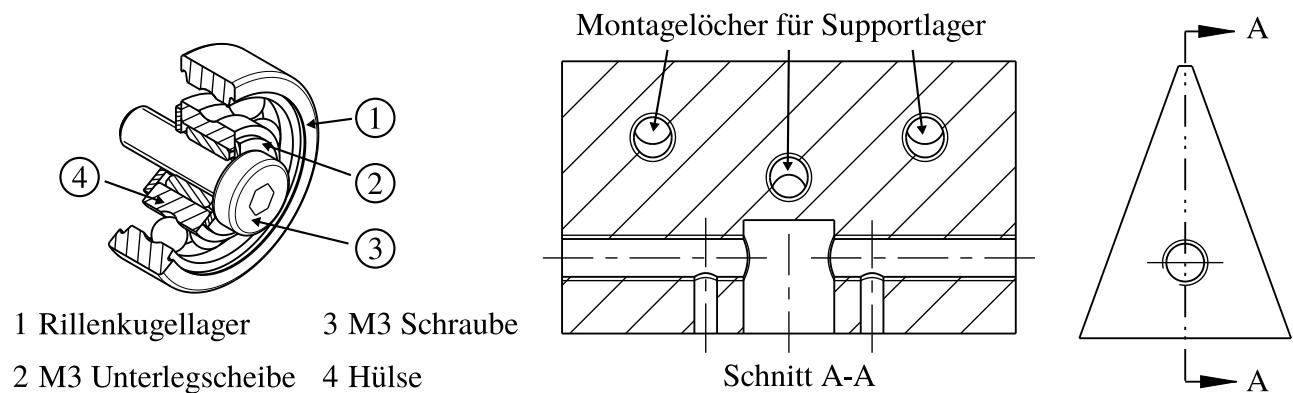


Abbildung 5.2.: Das Supportlager (links) und der Kunststoffsockel (rechts)

Der Kohlebürstenhalter ist aus Messing, hat eine zylindrische Form und wird mit einem Blechhalter, welcher an der Seite des Supports angeschraubt wird, gelötet. Die Kohlebürste Typ KK399 wurden von der Firma *Schmidthammer* gekauft. Dank dem hohen Kupferanteil (98 %) hat sie einen sehr geringen Kontaktwiderstand bzw. Eigenwiderstand. Sie hat am Ende eine Kupferlitze und ist an der anderen Seite mit Laufschrägen versehen. Leider sind die Laufschrägen für diese Anwendung nicht geeignet und wurden flach geschliffen. Die Kohlebürste wird von einer Feder Typ LG860 gegen die Lauffläche der Kugelaufnahme gedrückt. Abbildung 5.3 zeigt die Baugruppe des Kohlebürstenhalters.

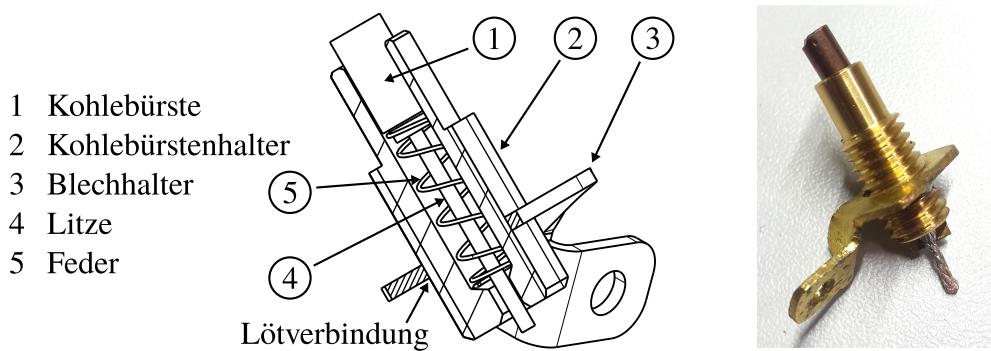


Abbildung 5.3.: Die Baugruppe des Kohlebürstenhalters

Um den elektrischen Kontakt zwischen der Kugel und der Messprobe während der Versuche gering an Störungen zu halten, sind zwei Kohlebürsten für die Kugel vorgesehen. Abbildung 5.4 zeigt das komplette neue Support an.



Abbildung 5.4.: Zusammenbau des neuen Kugelsupports

5.3. Die Glasscheibebeaugruppe

Um die elektrische Messung bei dem vorhandenen Prüfstand durchzuführen, müssen die folgenden Maßnahmen durchgeführt werden:

- Stromleitende Beschichtung für die Glasscheibe
- Isolierung der Glasscheibe mit dem gesamten Prüfsystem
- Elektrischer Zugang für die Messprobe zur Unterseite der Glasscheibe

Wie im vorherigen Kapitel 3 schon erwähnt, ist es auch möglich, die Schmierfilmdickenmessung bei einer Chrom-beschichteten Scheibe durchzuführen. Allerdings gibt es folgende Probleme bei der klassischen Messmethode. Erstens bietet dieses Verfahren eine niedrige Auflösung. Zweitens ist eine monochrome Lichtquelle notwendig. Es fehlt bei dem vorhandenen Prüfstand dieser Apparat. Nicht zuletzt ist das *Ultra-Softwarepaket* von *PCS Instruments* nicht in der Lage, solche Messung durchzuführen bzw. auszuwerten. Letztern ist der Eigenwiderstand der Chromschicht wegen der extrem dünnen Dicke sehr hoch (größer als $1\text{ k}\Omega$). Das macht die optische und elektrische Messung bei der Chrom-Glasscheibe ungünstig.

Eine andere Option ist es, die *Spacer-Layer-Scheibe* zu benutzen. Da die Silikatschicht nicht stromleitend ist, wird die Hälfte der Scheibe mit einer dickeren Chromschicht (c.a 600 nm) beschichtet. Durch die Erhöhung der Beschichtungsdicke wird der Eigenwiderstand reduziert. Eine Widerstandsmessung mit dem Multimeter liefert den Wert von $2,4\Omega$ bis 8Ω . Die neue Cr-Beschichtung weist eine Rauheit von $R_z = 0,2\mu\text{m}$ auf und ist relativ glatt, so wie die Oberflächen des Herstellers (siehe Tabelle B.3 im Anhang). Die Schmierfilmdicke kann wie normal mit dem EHD-Prüfstand von *PCS* auf der unbehandelten Seite bestimmt werden. Neben der neuen Glasscheibe wird auch eine Stahlscheibe gefertigt, um die kapazitive Messergebnisse mit der Glasscheibe zu kontrollieren. Abbildung 5.5 zeigt die neue Glasscheibe mit der neuen Cr-Beschichtung (links) und die Stahlscheibe (rechts) an.

Der nächste Schritt ist, die behandelte Glasscheibe mit dem gesamten Testsystem zu isolieren. Das erfolgt durch die Verwendung einer Kunststoff-Unterlegscheibe und einer Kunststoffhülse, die die Unterseite der Scheibe mit der Welle des ersten Motors trennen. Beide Teile sind aus *Polypropylen*, welches bis 80°C beständig ist. Die Unterlegscheibe ist nur 0,5 mm dick. Da sich die Lasteinheit nicht nur in die horizontale sondern auch in die vertikale Richtung bewegen kann, ist diese minimale Höhenänderung der Glasscheibe kein Problem. Die äußere Oberfläche der Hülse wurden an sechs

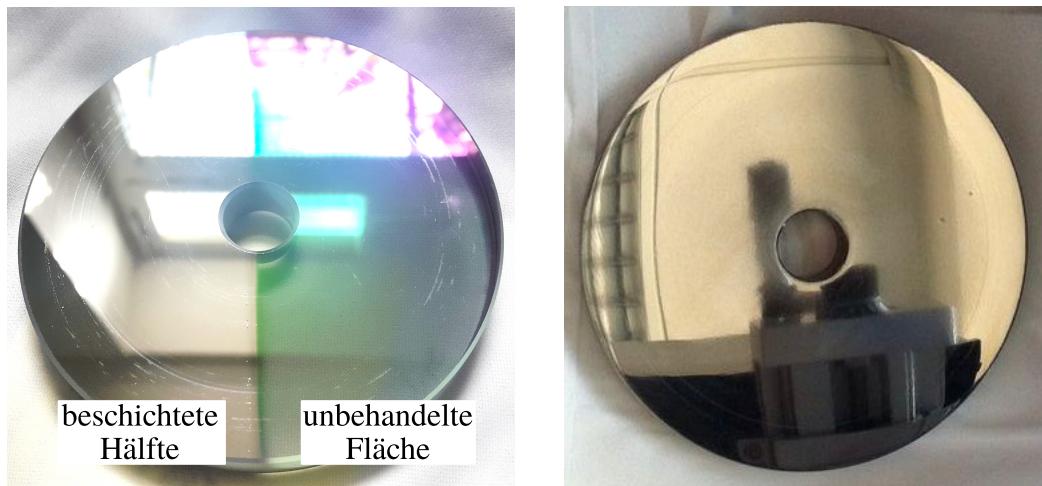


Abbildung 5.5.: Die neue Spacer-Layer-Glasscheibe mit sichtbarer beschichteten Hälfte (links) und die Stahlscheibe (rechts)

Positionen flach gefräst. Diese bilden mit der inneren Bohrung der Glasscheibe sechs Kanäle, die den Platz für die elektrische Verbindungen von Unterseite zur Oberseite der Scheibe schaffen. Die Kunststoff-Unterlegscheibe wird mit der Hülse mit dem *Plastix*-Kleber von Pattex verklebt. Diese Verbindung ist gegen das Wegrutschen der beiden Teile während Betriebs vorgenommen worden. Abbildung 5.6 zeigt die mit Kupferstreifen darauf befestigte Unterlegscheibe zur Isolierung der Glasscheibe und der ersten Motorwelle an.

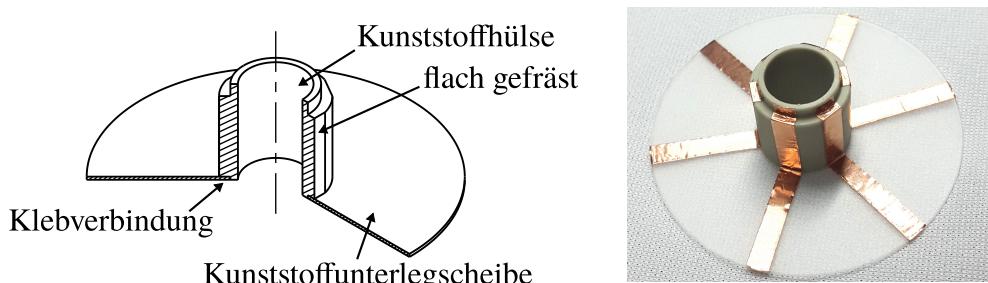


Abbildung 5.6.: Isolierung der Glasscheibe

Um die elektrische Verbindung von der Unterseite der Scheibe nach oben zu bringen, werden sechs Kupferstreifen verwendet. Sie werden auf der Kunststoff-Unterlegscheibe angeklebt und durch die sechs Kanäle (zwischen Hülse und Glasscheibe) nach oben geführt. Dort werden sie bei der Montageposition zwischen die Oberkante der Hülse und eine Mitnehmerscheibe geklemmt. Dadurch ist die elektrische Verbindung zwischen beiden Seiten der Scheibe hergestellt. Die von oben geschraubte Sicherungsmutter sichert die gesamte Baugruppe fest. Abbildung 5.7 zeigt die ganze Baugruppe der Glasscheibe an.

Update image the glas disc assembly

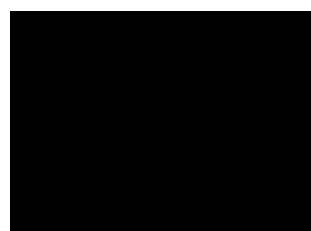


Abbildung 5.7.: Glasscheibebaugruppe

5.4. Konstruktion des Deckels

Der originale Deckel des EHD-Prüfstands von PCS hat zwei wichtige Aufgaben: Erstens soll er das Spritzöl vom Ölreservoir auf der Oberseite der Glasscheibe und in der Linsen der Lichtquelle schützen. Zweitens, da es nur eine Öffnung für die Lichtquelle auf dem Deckel gibt, soll er die Störungen, die durch Streulicht aus der Umgebung im EHD-Kontakt entstehen, bei der Messung reduzieren.

Für diese Arbeit wurde der Deckel modifiziert, so dass man die Kohlebürste, die das Messsignal von der Glasscheibe aufnimmt, in den Deckel integrieren kann. Die gesamte Kohlebürste-Baugruppe wurde in dem Deckel durch eine M8 Bohrung angeschraubt und ihre Position durch eine Kontermutter gesichert. Dadurch wird der elektrische Kontakt zwischen der Kohlebürste und der Glasscheibe über die Mitnehmerscheibe hergestellt. An der Kante des Deckels gibt es eine kleine, gefräste Nut. Durch diese werden die von der Kugel getragenen Messsignal-Leitungen nach draußen zu dem Messgerät geführt. Abbildung 5.8 zeigt den neuen Deckel und den elektrischen Kontakt zwischen der im Deckel integrierten Kohlebürste und der Glasscheibe an.

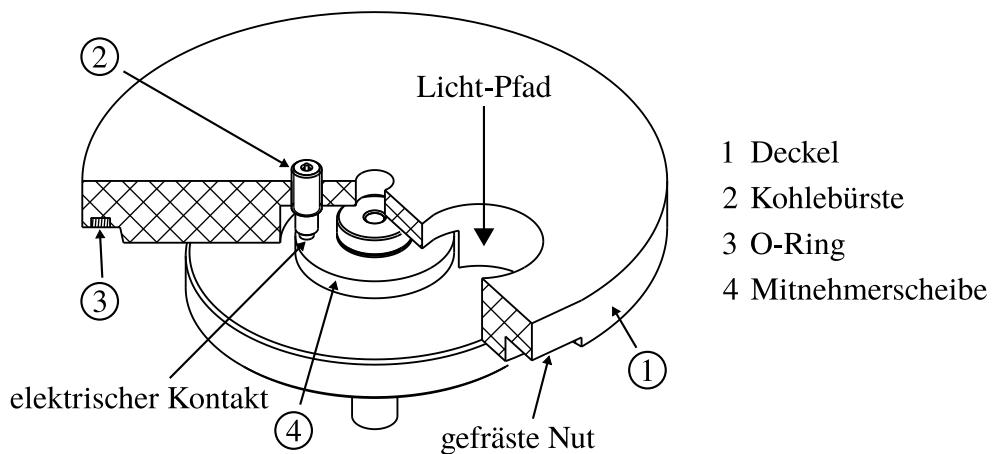


Abbildung 5.8.: Der neue Deckel mit der integrierten Kohlebürste

6. Versuche auf dem EHD-Messgerät

Um die Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt mittels des elektrischen Verfahrens zu bestimmen, braucht man Kenntnis von den dielektrischen Eigenschaften des Schmierstoffes und dessen Abhängigkeit von der Temperatur und dem Druck.

6.1. Dielektrizitätskonstante des Schmierstoffes

Die Bestimmung der Dielektrizitätskonstante der Öle *FVA 3* und *SHC 320* wurde an einem kapazitiven Wegmessgerät durchgeführt. Das Messgerät besteht aus zwei Stahlbacken, die auf einem Gestell aufgehängt werden, einem Zylinder und der elektronischen Einheit (siehe Abbildung 6.1).

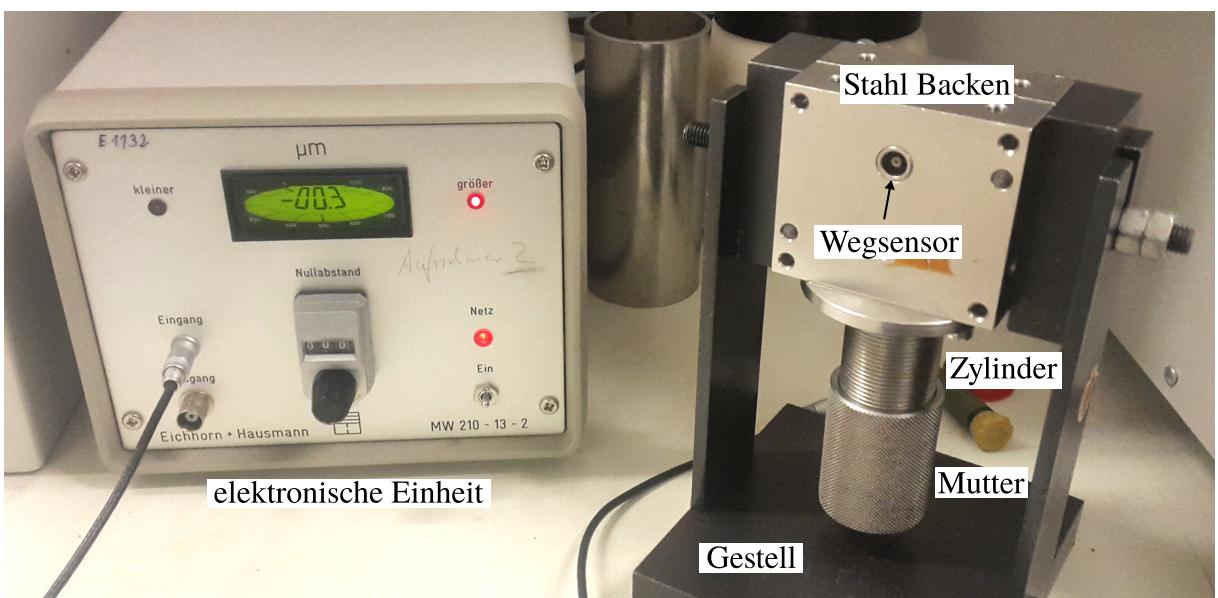


Abbildung 6.1.: Das kapazitive Wegmessgerät zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstante des *FVA 3* Öl

Abbildung 6.2 zeigt den Prüfkopf des Wegmessgeräts im abgebauten Zustand. An einem Backen befindet sich der Wegsensor, welcher bündig mit der Innenseite des Backens sitzt. Bei dem anderen Backen wurde eine Nut auf der inneren Oberfläche angebracht, sodass, wenn beide Backen zusammen verschraubt werden, sich dazwischen ein Spalt bildet. Der Zylinder wird an der unteren Seite des Backens angeflanscht. Durch das Drehen der Mutter wird der Kolben nach oben gedrückt, damit wird das Öl in den Spalt gepumpt.

Die Messung der Höhe des Spalts zwischen den Backen erfolgt durch dessen Betrachtung als Plattenkondensator, welcher die Luft als Dielektrikum hat (siehe Abbildung 6.3). Beim Befördern des Öls in den Spalt ändert sich das Dielektrikum von Luft zu Luft + Öl, damit verändert sich seine Kapazität bzw. der Messwert, obwohl der Abstand im Spalt konstant bleibt. Durch dieses Phänomen

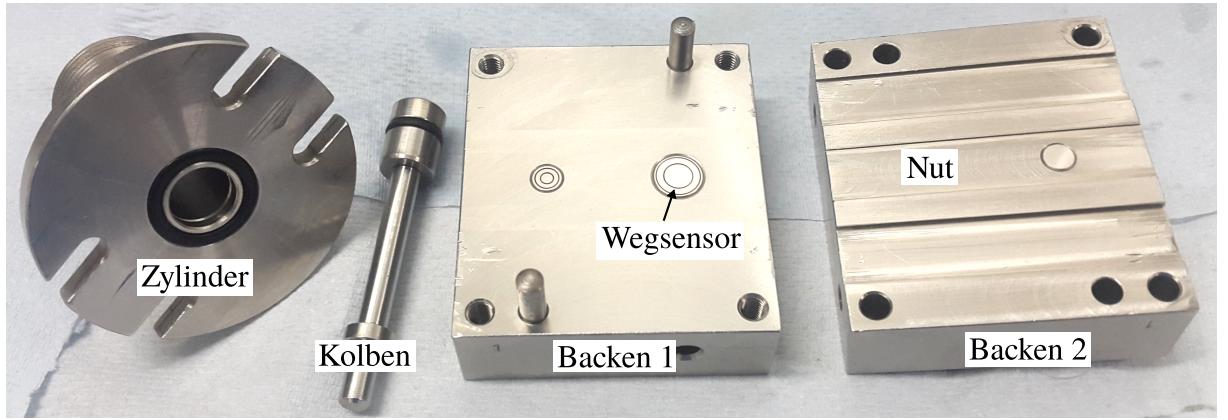


Abbildung 6.2.: Der abgebauten Prüfkopf des Wegmessgeräts

wird die Dielektrizitätskonstante des Öls als das Verhältnis zwischen den Messwegen bei Luft und beim Öl berechnet. Die Messergebnisse für Öle FVA 3 und SHC 320 bei verschiedenen Temperaturen — 40 °C bis 80 °C — werden in Tabelle 6.1 dargestellt.

Medium	Temp [°C]	Weg [µm]	rel. Permittivität
Luft	20	292	1
FVA 3	40	141	2.070
FVA 3	60	142	2.056
FVA 3	80	144	2.027
SHC 320	40	118	2.474
SHC 320	60	120	2.433
SHC 320	80	122	2.393

Tabelle 6.1.: relative Permittivität von Ölen bei unterschiedlichen Temperaturen

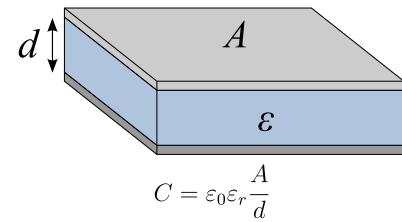


Abbildung 6.3.: Plattenkondensator [39]

6.2. Kapazitive Messgeräte zur Schmierfilmdickenbestimmung

6.2.1. Stromladekurve Messgerät

Im IMKT gibt es ein mobiles Messsystem zur Schmierfilmdickenmessung mittels kapazitiven Messverfahren. Das System besteht aus einem Laptop, der mit *Laderkurve-Software* installiert ist, und einer Messkarte (Typ USB-6211) von der Firma National Instrument (NI). Bei der kapazitiven Messmethode wird der EHD-Kontakt als ein Kondensator C_K betrachtet. Die Aufladung des Kondensators erfolgt durch eine Ladespannung $U_L = 0,2$ V und einen Vorwiderstand $R_V = 1012,7\text{ k}\Omega$. Eine hohe Ladespannung ist unerwünscht, weil dieses zur Ionisierung des Schmierstoffes führt. Das kann die Messergebnisse durch den Durchschlag des Kondensators verfälschen. Mit dieser Konfiguration hat das Gerät eine höchste Auflösung von 0,78 pF. Der schematische Aufbau des mobilen Messsystems wird in Abbildung 6.4 dargestellt.

Der Ladevorgang des Kondensators wird durch eine Zeitkonstante τ charakterisiert und in die Abbildung 6.5 dargestellt. Zur Bestimmung der Zeitkonstante τ kann man durch die Anpassung der Ladekurve mit der Formel 6.1 oder im einen Zeitintervall Δt zwischen den beiden definierten Spannungsgrenzen U_1 und U_2 während des Ladevorgangs mit der Formel 6.2 ermitteln . Bei der

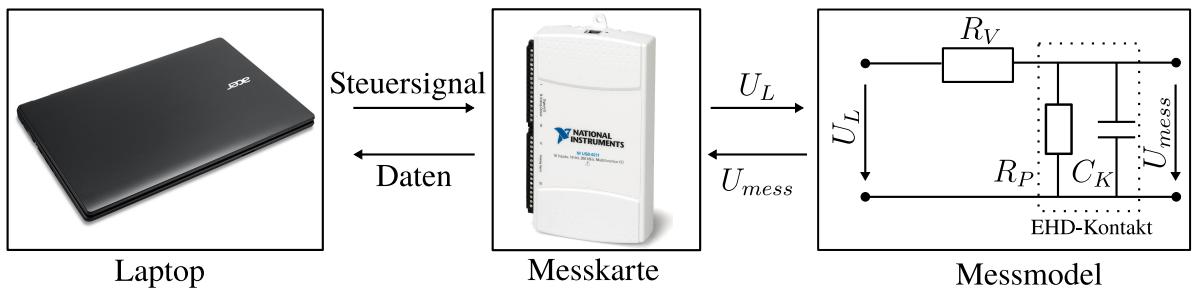


Abbildung 6.4.: Schematischer Aufbau des mobilen Messsystems

Auswertung der Zeitkonstante mit der Formel 6.3 erhält man die Kapazität des EHD-Kontakts.

$$U_C = U_L(1 - e^{-t/\tau}) \quad (6.1) \quad \tau = \frac{\Delta t}{\ln \frac{U_L - U_1}{U_L - U_2}} \quad (6.2) \quad C = \tau / R_V \quad (6.3)$$

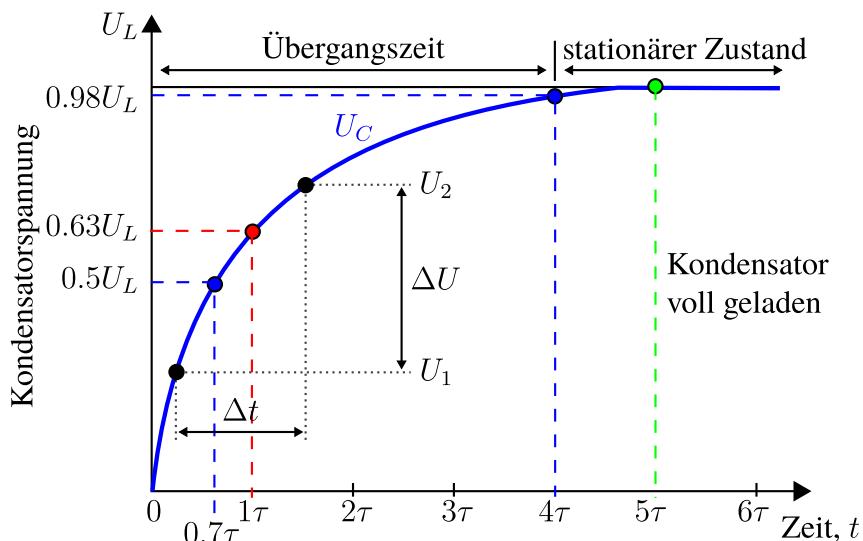


Abbildung 6.5.: Der von Zeitkonstante τ charakterisierte Ladevorgang eines Kondensators

Das ganze Messsystem wird von der *Laderkurve-Software* gesteuert. Sie misst nicht direkt die Kapazität, sondern sie nimmt die Antwort bzw. Ladekurve des “Kondensators” auf. Die Auswertung für die Kapazität bzw. Filmdicke wird später mit einem Skript ausgeführt. Die Software kann die Ladekurve in zwei Modi — *Anzahl der Messwerte* oder *Messung nach Zeit* — aufnehmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Messungen mit dem ersten Modus durchgeführt. Abbildung 6.6 zeigt die Benutzeroberfläche und die Einstellungen der Ladekurve-Software bei einer Testmessung mit einem Referenz-Kondensator (3,3 nF) an.

Die Software ist relativ einfach zu bedienen, allerdings gibt es folgende Punkte, auf die man achten muss:

1. **Die Anzahl der Messwerte** ist die Auflösung der Messungen. Zu niedrige Werte können zu Messfehlern führen und zu hohe Werte können schnell den Speicher füllen. Der Standardwert ist 2500.
2. **Die Anzahl der Ladekurven** ist die Anzahl der Messungen, die nach einander durchgeführt werden. Der Standardwert ist 10.

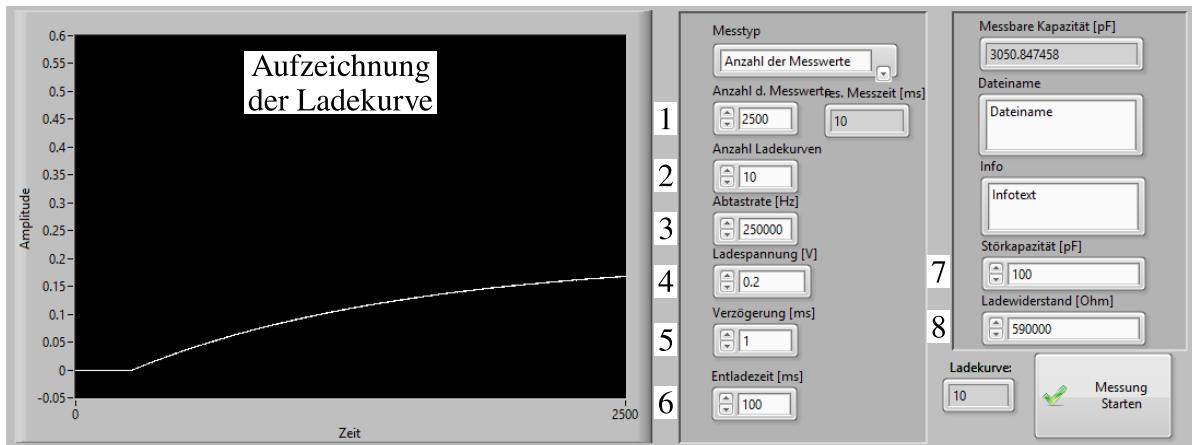


Abbildung 6.6.: Benutzeroberfläche der Laderkurve-Software

3. **Die Abtastrate** ist die Anzahl der Messwerte, die die Messkarte pro Sekunde messen kann. Die USB-6211 Messkarte von NI kann maximal 250 kS/s, das entspricht 2500 Messwerte in einem Zeitraum von 10 ms messen.
4. **Die Ladespannung** ist die Spannung zwischen zwei Terminals des Kondensators. Der Wert sollte im Bereich von 0,2 V bis 0,5 V liegen.
5. **Die Verzögerung** ist die Wartezeit, die die Software benötigt, bevor sie eine Messung ausführen kann. Der Standardwert ist 1 ms.
6. **Die Entladezeit** ist die Zeit zwischen zwei Messungen. Sie ist notwendig, um der Kondensator vollständig vor jeder neuen Messung zu entladen. Der Standardwert ist 100 ms.
7. **Die Störkapazität** ist die externe Störung, wie zum Beispiel von Messkabeln oder statischer Kapazität zwischen Messkörpern. Dieser Wert wird bei der Auswertung der Kontaktkapazität abgezogen.
8. **Der Ladewiderstand** ist der Wert des Vorwiderstands. Er ist nur für den Dokumentationszweck bestimmt und wird in die Messdatei geschrieben.
9. **Das Austecken des Netzteils** ist notwendig, um die Störungen von anderen elektronischen Geräten zu vermeiden.

6.2.2. LCR Messgerät

In der Praxis kann jede Flüssigkeit und jeder Feststoff Strom durchlassen. Wenn das Material von einem Wechselstrom gespeist wird, wird das Verhältnis zwischen der Spannung und dem Strom als Impedanz bezeichnet. Die Veränderung der gemessenen Impedanz durch die Variation der Stromfrequenz ist von der Eigenschaft des Materials abhängig. Das kann auf die physikalische Struktur des Werkstoffes, auf innere chemische Prozesse oder eine Kombination von beiden zurückgeführt werden. Der Zusammenhang zwischen der Impedanz, der Frequenz und der Kapazität von einem mit Wechselstrom angelegten Kondensator wird in der Formel 6.4 [40] dargestellt.

$$Z_C = \frac{v_C(t)}{i_C(t)} = \frac{1}{j\omega C} \quad (6.4)$$

Im Gegenteil zum mobilen Ladekurven-Messsystem, welches die Kapazität über die Antwort einer Ladespannung interpretiert, bietet das LCR-Messgerät ST2826 der Firma Sourcetronic die Möglichkeit, die Kapazität eines EHD-Kontakts direkt zu messen. Abbildung 6.7 zeigt den Aufbau des Messsystems mit dem LCR-Messgerät.

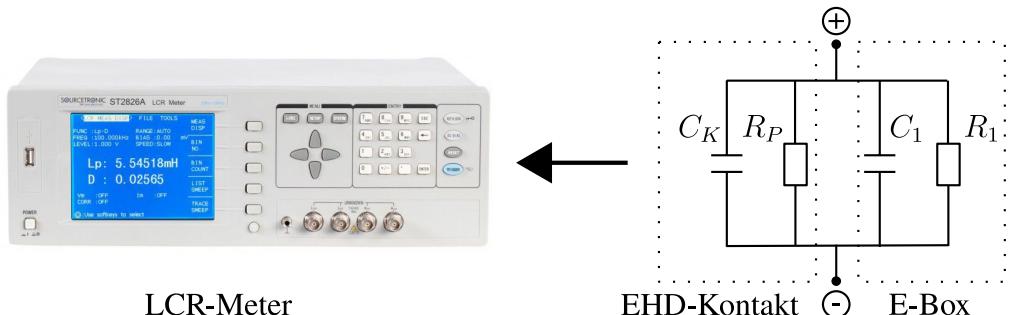


Abbildung 6.7.: Versuchsaufbau zur Kapazitätsmessung mit LCR-Meter

Das LCR-Messgerät bietet einen breiten Frequenzbereich von 20 Hz bis 50 MHz. Dank der Kelvin-Messproben (4-Punkt Messung) hat das Gerät eine sehr gute Genauigkeit von 0,1 % und ermöglicht die Messung auch bei kleinsten Änderungen des Systems. Mit einer Sinuskorrelationstechnik bietet das Gerät eine rauschfreie Analyse. Die Addition des Widerstands R_1 und des Kondensators C_1 ist nötig, um zu sehen, ob der Strom tatsächlich durch den EHD-Kontakt fließt oder in irgendeiner Verbindung verloren geht. Unterschiedliche Werte für R_1 und C_1 werden verwendet, um deren Einfluss auf die gemessene Kapazität zu untersuchen. Eine Erhöhung des Widerstandswertes führt zu einer signifikanten Abnahme der Messergebnisse und umgekehrt. Dieses Phänomen kann durch die Abnahme bzw. Zunahme des Stromflusses durch den EHD-Kontakt erklärt werden. Die Werte $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ und $C_1 = 24 \text{ pF}$ wurden durch Experimente für die Messungen in dieser Arbeit gewählt. Abbildung 6.8 zeigt die Platine des E-Box und seine Kapazitätsmessung beim offenen Zustand mit dem LCR-Messgerät bei verschiedenen Frequenzen an (siehe Abbildung 6.9).

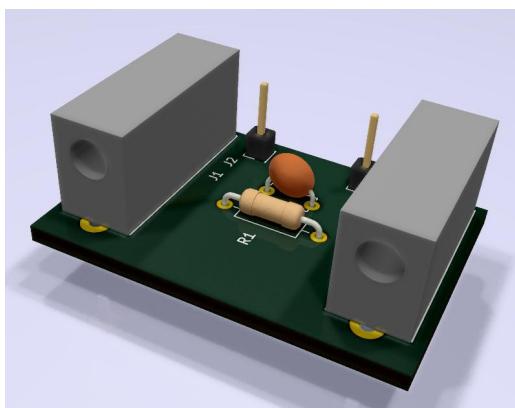


Abbildung 6.8.: E-Box Plattine

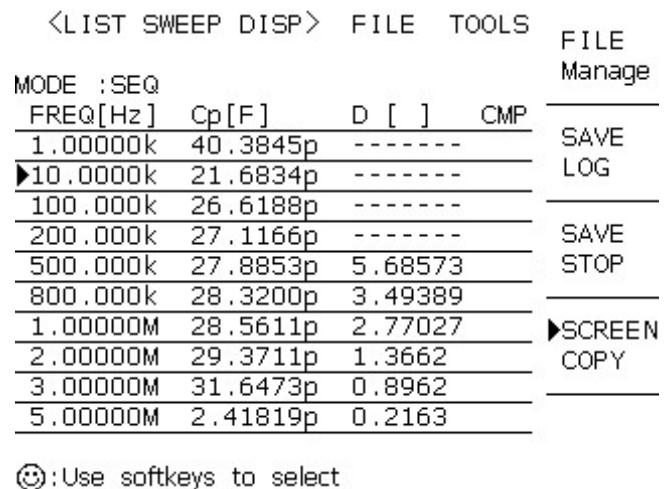


Abbildung 6.9.: Kapazitätsmessung des E-Box

6.3. Versuchsplanung

Bevor die Messung an dem PCS-Messgerät beginnt, wird zuerst der Zusammenhang zwischen der Filmdicke und der Kapazität im EHD-Kontakt bzw. deren Verhalten unter dem Einfluß von

der Geschwindigkeit, der Temperatur, der Last und dem Öl theoretisch analysiert. Anhand dieser Informationen kann man die Testbedingungen, mit denen gute Ergebnisse produziert werden, besser auswählen.

Die Schmierfilmdicke kann nach *Hamrock* und *Dowson* (Abschnitt 2.4) bestimmt werden. Die Kapazität in dem EHD-Kontakt wird nach dem Modell eines Plattenkondensators (Abschnitt 3.2.2) ermittelt.

In Abbildung 6.10 wird die Schmierfilmdicke und die Kapazität des Öls *SHC320* in Abhängigkeit mit der Geschwindigkeit dargestellt. Man kann deutlich sehen, dass während die Filmdicke bei steigender Wälzgeschwindigkeit zunimmt, die Kapazität in dem Kontakt sinkt. Aus diesem Grund ist die kapazitive Messmethode zur Bestimmung eines dickeren Schmierfilm nicht geeignet. Bei niedriger Geschwindigkeit hat man eine besser Auflösung, allerdings besteht die Gefahr, durch die Berührung von Rauheitsspitzen der Oberfläche der Kugel und der Scheibe das Messergebnis verfälscht wird.

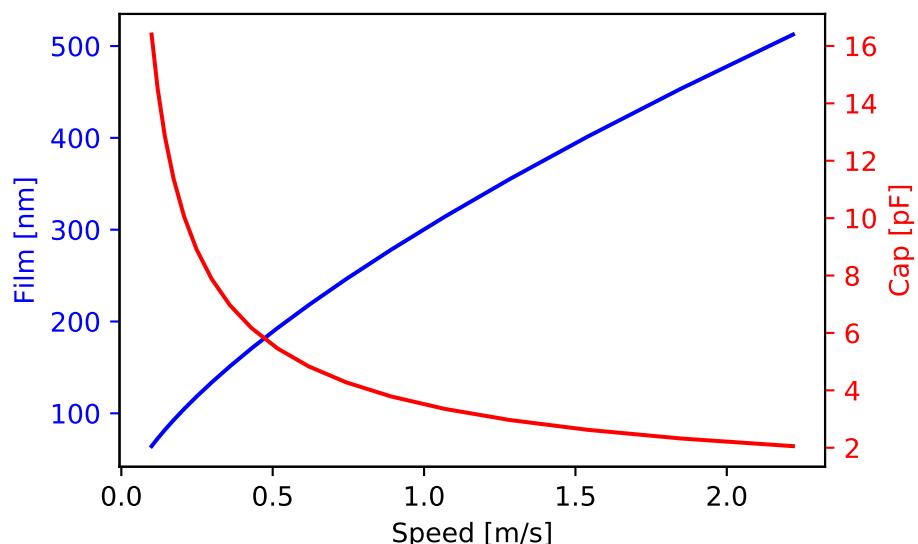


Abbildung 6.10.: Der Zusammenhang zwischen Schmierfilmdicke und Kapazität mit der Geschwindigkeit von dem *SHC 320* bei 80 °C und 40 N

Abbildung 6.11 zeigt, dass die Temperatur und die Last relativ große Wirkung auf die Kapazität haben. Bei hohen Temperaturen sinkt die Viskosität des Öls ab, was infolge eine negative Wirkung auf die Filmdicke hat. Dadurch wird die Kapazität erhöht. Analoges kann man auch für die steigende Last sagen, allerdings hat die Last zum Vergleich mit der Temperatur weniger Einfluß.

Anhand dieser Informationen sollte die Versuche bei niedrigen Geschwindigkeiten, hohen Temperaturen und Lasten durchführen, um eine gute Auflösung der Kapazitätsmessung zu erreichen.

Die Versuche in dieser Arbeit werden wie folgt geplant und durchgeführt:

1. Vergleichsmessungen von neu modifizierten Bauteilen (Kugel, Support, Glasscheibe) mit den von *PCS Instruments*
2. Schmierfilmdickenmessung am EHD-Gerät (optisch)
3. Schmierfilmdickenmessung mit dem mobilen Messsystem von IMKT (elektrisch)
4. Vergleich der theoretischen Schmierfilmdickenbestimmung mit 2. und 3. zur Überprüfung des Messverfahrens

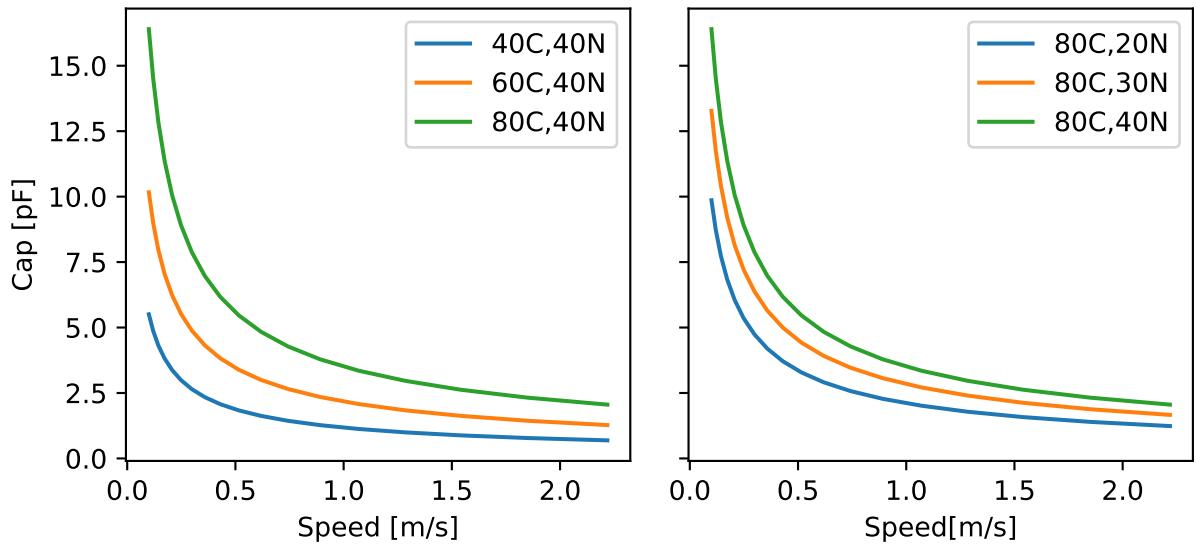


Abbildung 6.11.: Die Veränderung der Kapazität im Komtakt bei verschiedenen Temperaturen und Lasten des Öl SHC 320

6.4. Versuchsdurchführung

Da die Auswertung der Schmierfilmdicke in dieser Arbeit optisch und elektrisch geschieht, ist die Sauberkeit vor dem Beginn einer Messung besonders wichtig. Die Glasscheibe, die Kugel, das Kugelsupport und das Ölreservoir müssen vor jeder Messung mit Waschbenzin oder Isopropanol gereinigt werden und dürfen keine Schlieren aufweisen.

Nach der Reinigung können das Support und die Kugel in das Gerät eingesetzt werden. Die Führung der Kugel wird zuerst in die Ausgangswelle des zweiten Motors eingesteckt und dann auf das Support aufgelegt. Die Kabel sollten Abstand von den Wänden des Reservoirs und der Motorwelle halten, um einen Unfall (Kurzschluss, Verfangen des Kabels) während des Betriebs zu vermeiden. Abbildung 6.12 zeigt den Blick von oben auf den EHD-Prüftopf mit montiertem Support und aufgelegter Kugel bereits für den Versuch vorbereitet.

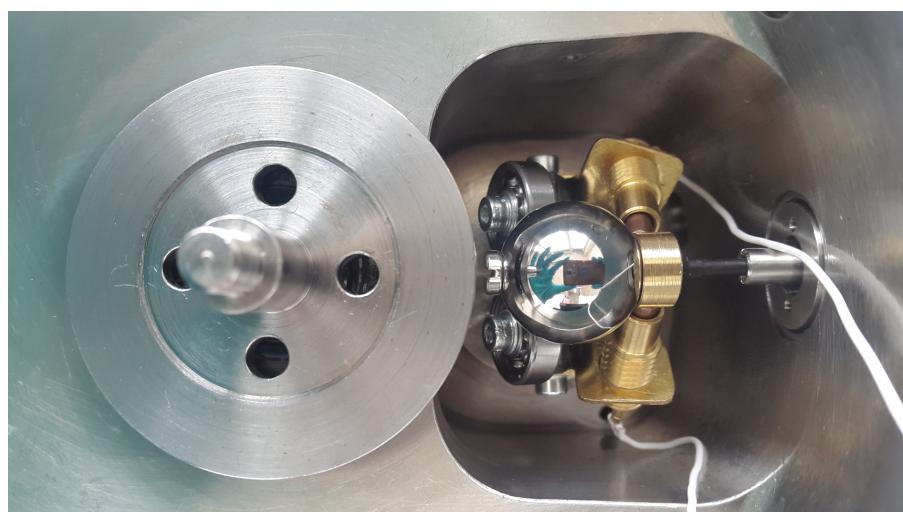


Abbildung 6.12.: Topf des EHD-Geräts mit montiertem neuen Kugelsupport und der modifizierten Kugelführung

Die Bestimmung des Messpunkts für die optische Messung erfolgt zuerst auf der nicht beschichteten

Seite der Scheibe. Danach wird die Scheibe um 180° auf der Cr-Seite gedreht, um den Widerstand der gesamten Messkette (Kabel -> Scheibe -> Kugel -> Kabel) unter einer Last von 20 N zu messen. Der Widerstand ist von dem Radius der Fahrspur abhängig und beträgt ungefähr 17Ω bis 18Ω . Die Suche nach dem Messpunkt findet beim leeren Reservoir statt, weil ein sauberer Kontakt zwischen Scheibe und Kugel für die Bestimmung der Höhe des Spacer-Layers nötig ist. Außerdem darf man das Spurwechseln nur beim leeren Zustand machen, weil das Verlaufen des Öles über die Lasteinheit im mechanischen Baukasten zu Schäden führen kann. Man sollte die Spur von außen nach innen wechseln, um die Entstehung von Inseln, die elektronisch zu den Elektroden (Kupferstreifen) isoliert sind, zu vermeiden. Danach kann man das Öl mit der Hilfe eines Trichters befüllen und den Prüftopf mit dem Deckel schließen. Abbildung 6.13 zeigt die Suche nach einem guten EHD-Kontakt an.

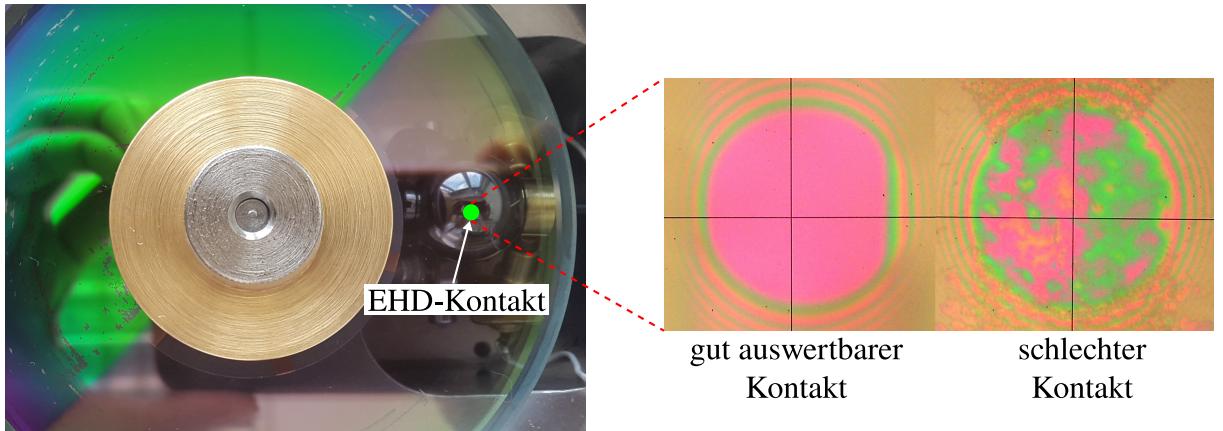


Abbildung 6.13.: Die Suche nach einem gut auswertbaren EHD-Kontakt

Zur Messung bei der Öl-Vollschrägung wird das Ölreservoir bis zur Hälfte der Kugel (ca. 120 ml) gefüllt. Das Ölbad wird vor jeder Messreihe während des Heizvorgangs (bei 40°C , 60°C und 80°C) für ca. 10 min durchmischt, damit beim Versuch eine homogene Temperatur im Ölbad herrscht. Das genaue Vorgehen einer solchen Messung wurde von *Surborg* in seiner Arbeit [1] beschrieben und ist im Anhang zu finden.

Neben dem Widerstand des Kontakts wird auch die Hintergrund-Kapazität des Prüfstands gemessen. Dieser Wert wird als Störkapazität bezeichnet und soll von den Ergebnissen abgezogen werden.

Die Last von 20 N wird in Anlehnung an vorherige Arbeiten gewählt. Nach dem Abschnitt 2.3 lässt sich für den hier betrachteten Fall eines Kugel-Scheibe-Modells eine maximale Pressung im Kontakt $p_0 = 509 \text{ MPa}$ berechnen. Damit liegt der Kontakt im unteren Bereich der EHD-Schrägung. Diese geringe Last ist gut, somit wird die Gefahr von Beschädigungen auf der Scheibe bzw. der Silikatschicht gering gehalten.

Nachdem die Höhe des Spacer-Layers bestimmt wurde, wird die Scheibe ein Stück weiter gedreht und auf etwa 100 mm/s beschleunigt. Während dieser Einlaufphase wird das Live-Bild ständig auf dem SW-Monitor beobachtet. Sobald sich ein klarer, gut messbarer Verlauf abzeichnet, kann mit der Messung begonnen werden (siehe Abbildung 6.14). Wichtig ist, dass man die Messungen zügig macht, um die Beschädigung der Chromschicht und Silikatschicht zu vermeiden.

Tabelle 6.2 und 6.3 fassen die Versuchsparameter und die Einstellungen für das mobile Messsystem von IMKT zur Schmierfilmdickemessung in dieser Arbeit zu.

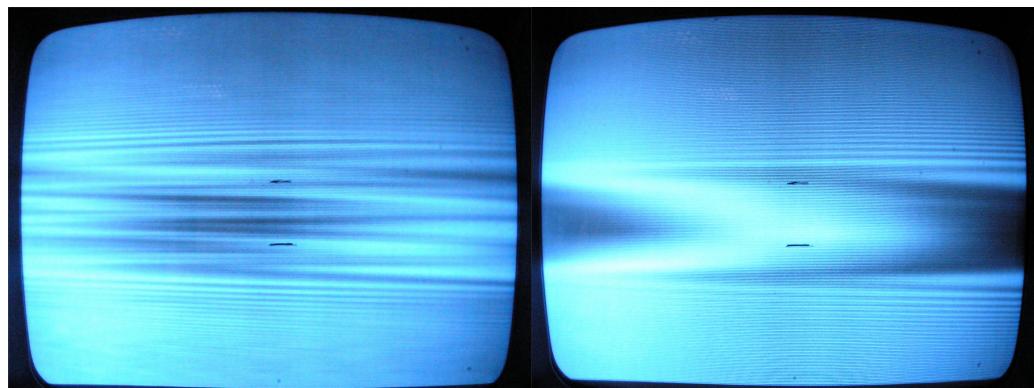


Abbildung 6.14.: Live-Bild: nicht verwertbarer Verlauf (links); guter Verlauf (rechts) [38]

Tabelle 6.2.: Versuchsparameters beim EHD-Prüfstand

Öl	FVA 3, SHC 320
Last [N]	20
Temperatur [°C]	40 – 60 – 80
Geschwindigkeit [m/s]	0,1 m/s bis 1,4 m/s
Geschw. Stufen [%]	40
Schlupf [%]	0

Tabelle 6.3.: Einstellungen des mobilen Messsystems von IMKT

Messtyp	Anzahl der Messwerte
Anzahl der Messwerte [1]	2500
Anzahl der Ladekurven [1]	10
Abtastrate [Hz]	250000
Ladespannung [V]	0.2
Verzögerung [ms]	1
Entladezeit [ms]	100
Ladevorwiderstand [Ω]	1012700
Störkapazität [pF]	0

7. Versuchsergebnisse

7.1. Vergleichsmessung von modifizierten Teilen

Zur Überprüfung der Funktion des neuen Systems, werden die Schmierfilmhöhen gegenübergestellt, die einerseits mit den modifizierten und andererseits mit den originalen Teilen (Kugel + Support) gemessen werden. Außerdem werden diese Messergebnisse mit den von theoretischer Berechnung verglichen.

Die Vergleichsmessung wird mit dem Mineralöl *FVA 3* bei der Temperatur von 40°C und der Last von 20 N durchgeführt (siehe Abbildung 7.1). Man kann hier sehen, dass das neue System gut funktioniert.

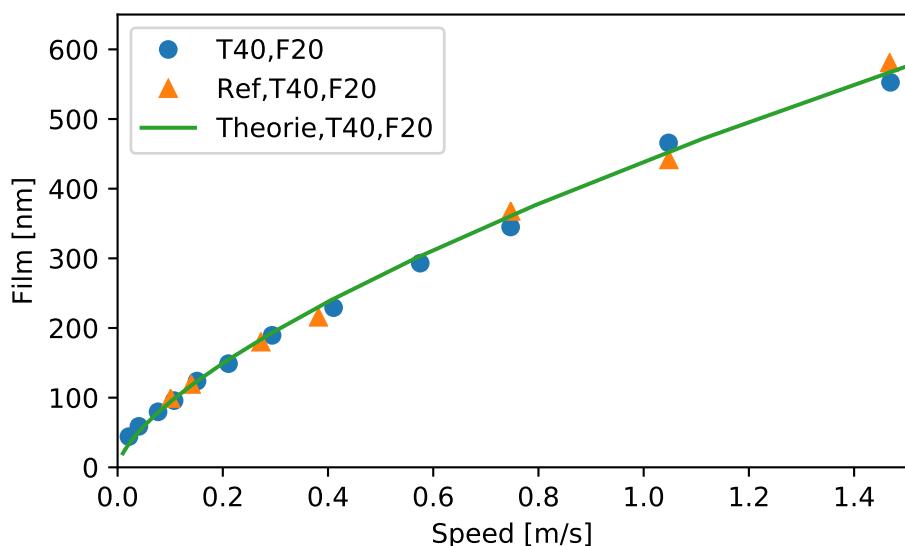


Abbildung 7.1.: Filmdicke von zwei Konfigurationen — neue Kugel + neue Scheibe (rund); originale Teile (dreieckig); rechnerische Filmdicken (gerade) — mit dem Öl *FVA 3* bei $T = 40^{\circ}\text{C}$ und $F = 20 \text{ N}$

7.2. Störkapazitätsmessung

Da die kapazitiven Messungen von elektrischen Störungen, die von Elektrogeräten im Labor entstehen, sehr empfindlich sind, werden die Kabel so kurz wie möglich gehalten. Alle elektronischen Anschlüsse und Bauteile werden nah zu einander auf einer Platine gebaut. Trotz dieser Maßnahmen kann man leider nie die Störungen eliminieren. Aus diesem Grund wird diese ungewünschte Größen bzw. Störkapazität bei stationären Zustand, mit alle benötigten Geräten angemacht werden, gemessen. Diese beträgt ca. 89 pF und wird danach von den Messergebnissen abgezogen. Abbildung 7.1 zeigt die Bestimmung der Störkapazität an.

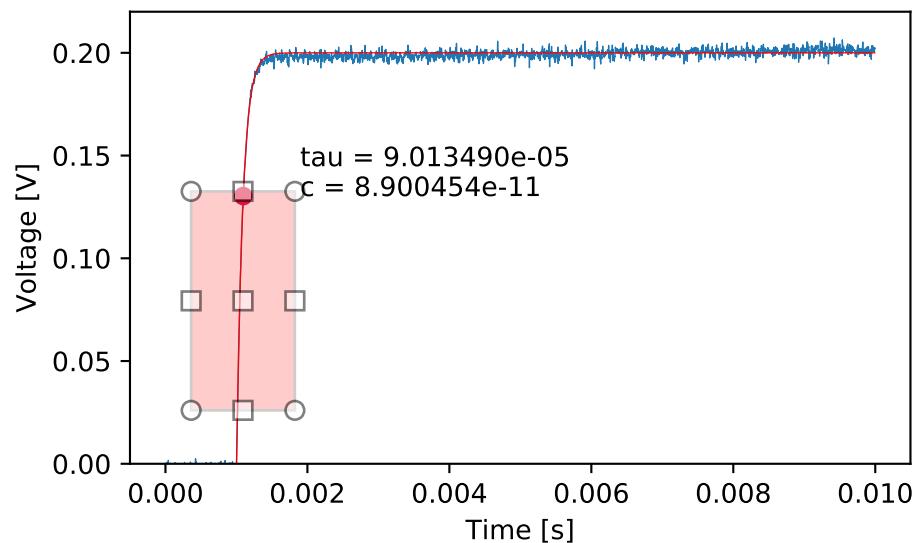


Abbildung 7.2.: Bestimmung der Störkapazität bevor einem Versuch: Messdaten (blau); angepasste Kurve (rot)

7.3. Kapazitätsmessung für EHD-Punktkontakt

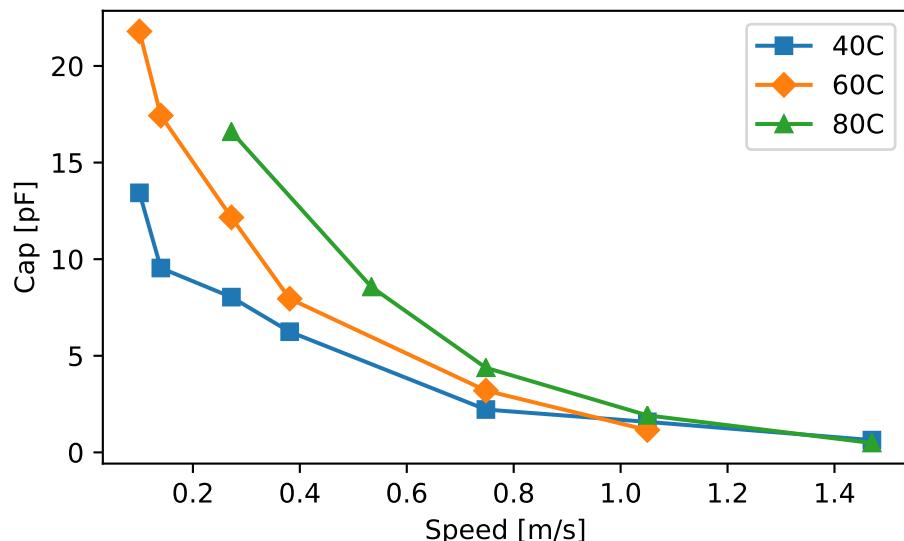


Abbildung 7.3.: Kapazitätsmessung für das Mineralöl FVA 3 bei unterschiedlichen Temperaturen und einer Last von 20 N

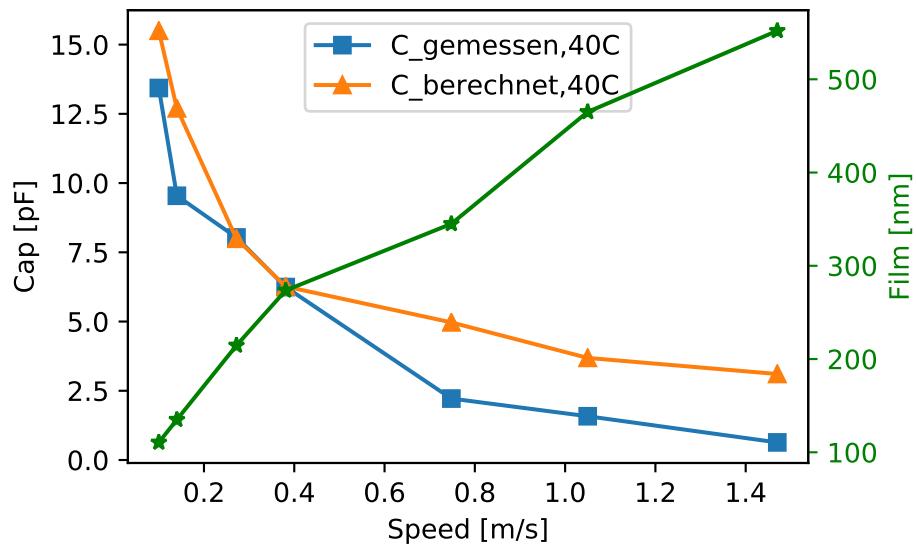


Abbildung 7.4.: gemessenen Kapazitäten im Vergleich mit rechnerischen bei aufgenommen Filmhöhen von dem Öl FVA 3 bei $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $F = 20\text{ N}$

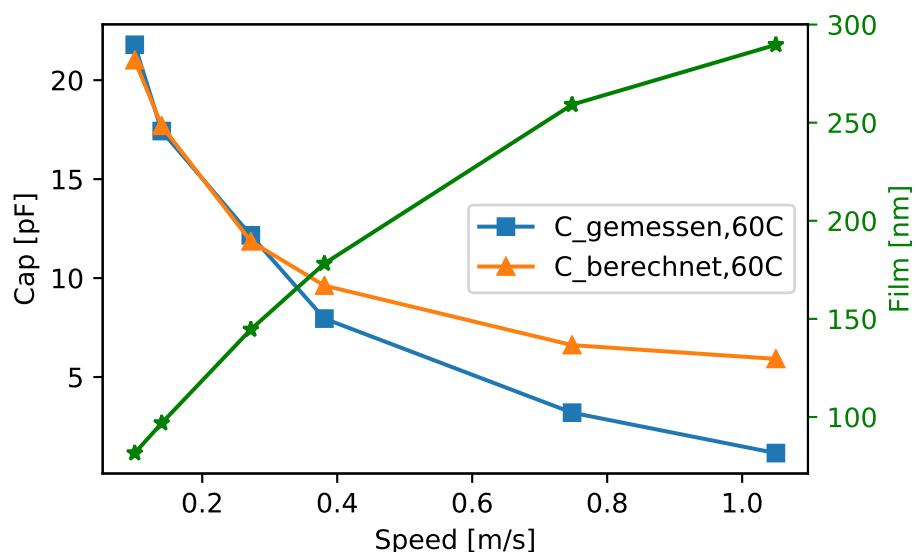


Abbildung 7.5.: gemessenen Kapazitäten im Vergleich mit rechnerischen bei aufgenommen Filmhöhen von dem Öl FVA 3 bei $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $F = 20\text{ N}$

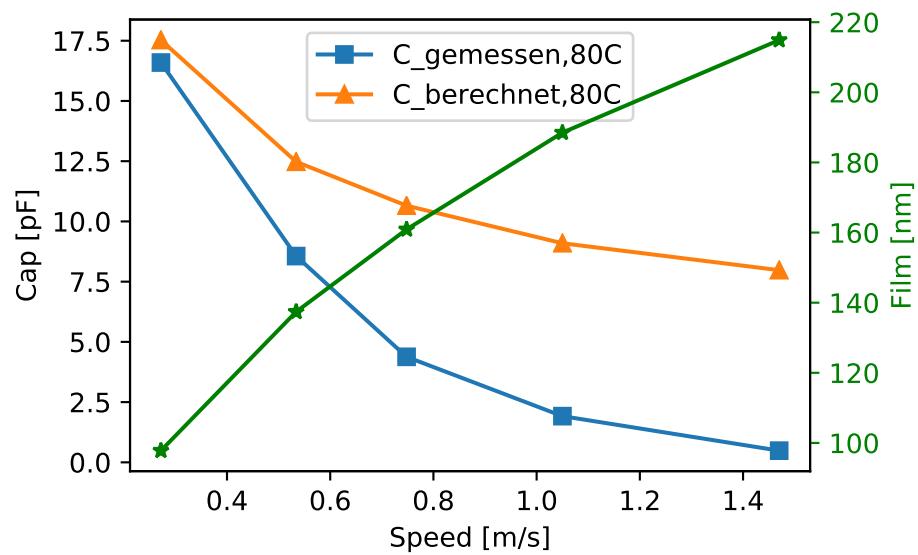


Abbildung 7.6.: gemessenen Kapazitäten im Vergleich mit rechnerischen bei aufgenommen Filmhöhen von dem Öl FVA 3 bei $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $F = 20\text{ N}$

8. Zusammenfassung und Ausblick

- Die Wichtigkeit von der Schmierfilmdickenmessung?
- Ziel dieser Arbeit? (Vergleich optische mit kapazitiver Messmethode. Einfluß der Testparameters auf Messergebnisse)
- Was wurde gemacht, um diesen Versuch möglich auszuführen? (konstruktive Bearbeitung)
- Versuchsdurchführung
- Wie waren die Messergebnisse?
- Was kann man bei dem System verbessern? Ist es möglich das System mit Öl zu verwenden?
- Der Ausblick. Was können die Ergebnisse von dieser Arbeit sagen?

Die Qualität des Schmierfilms spielt eine große Rolle in der Lebensdauer der Komponenten in einer Maschine. Je größer diese ist, desto langlebiger ist die Maschine. Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur, der Geschwindigkeit, der Belastung etc. auf den Aufbau des Schmierfilms in einem EHD-Kontakt wurden verschiedenen Versuche an einem Modellprüfstand durchgeführt. Dabei wird zwischen einer rotierenden Glasscheibe und einer Stahlkugel ein Kontakt im Bereich der elastohydrodynamischen Schmierung erzeugt. Der Modellprüfstand bildet reale Maschinenelemente nur eingeschränkt ab, bietet allerdings gute Möglichkeiten zur Untersuchung des Verhaltens des Schmierstoffes unter unterschiedliche Betriebsbedingungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues System entwickelt, das die Messungen mit einer optischen und elektrischen Methode gleichzeitig durchführen kann. Dafür mussten die Prüflinge (Kugel, Glasscheibe) modifiziert werden. Da die *Spacer-Layer-Glasscheibe* den Strom nicht leitet, wurde sie auf einer Hälfte für den elektrischen Versuch mit einer stromleitenden Chromschicht beschichtet. Das Kugelsupport wurde neu konstruiert, um die Übertragung der elektronischen Signalen von der Kugel zum Messgerät zu realisieren. Durch parallele Versuche konnte die Funktion des neuen Messsystems, das die beide Aufbauten — optisch und elektrisch — in einem vereinigt, überprüft werden.

Die Korrelation von beiden Messmethoden unter verschiedenen Testparameter?

Für weiterführende Arbeiten ist es sinnvoll, die Messungen bei Fettschmierung mit Variationen von Temperatur, Druck oder Geschwindigkeit durchzuführen. Zu diesem Zweck ist es nötig, eine Kammer zur Isolierung des Prüfraums mit der Umgebung zu konstruieren.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Surborg H. Einfluss verschiedener grundölarten gleicher viskosität auf die schmierfilmdicke, 2007.
- [2] Bartz W. J und Möller U. J. *Expert Praxis-Lexikon Tribologie Plus*. Expert Verlag, Renningen, 2000.
- [3] Marek Wisniewski. *Elastohydrodynamische Schmierung*, volume 1. Expert Verlag, 2000.
- [4] Viskosität. <https://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>. Zugriff: 2018-04-19.
- [5] R. F Crouch and A Cameron. Viscosity-temperature equations for lubrications. *Journal of the Institute of Petroleum*, 47:307–313, 1961.
- [6] O Reynolds. On the theory of lubrication and its application to mr. beauchamp tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 177:157–234, 1886.
- [7] M. Sánchez-Rubio; F. Chinas-Castillo; F. Ruiz-Aquino and J. Lara-Romero. A new focus on the walther equation for lubricant viscosity determination. *Lubrication Science*, 18:95–107, 2006.
- [8] Ramsey Gohar. *Elastohydrodynamics*. Imperial College Press, 1988.
- [9] M Schilling. Referenzöle für wälz- und gleitlager-, zahnrad- und kupplungsversuche : Datensammlung für mineralöle, 1985.
- [10] A Cameron. *Principles of Lubrication*, volume 1. Longman, 1966.
- [11] C. J. A. Roelands. *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils*. PhD thesis, Technische Hogeschool Delft, Netherlands, 1966.
- [12] P. S. Y Chu and A Cameron. Pressure-viscosity characteristic of lubricating oils. *Journal of the Institute of Petroleum*, 48:147–155, 1962.
- [13] D. Dowson and G. R. Higginson. *Elastohydrodynamic Lubrication*. Pergamon Press, 1966.
- [14] N Hirano, F. Kuwano and N Ohno. Oberservation of solidification of oils under high pressure, 1985.
- [15] R. Gohar. *Oil films under ehl conditions*. PhD thesis, University of London, 1966.
- [16] Reibung. <https://de.wikipedia.org/wiki/Reibung>. Zugriff: 2018-04-17.
- [17] Steinhilper W. und Sauer B. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Springer Verlag, Berlin, 2008.

- [18] Ckw-freie produktion von kupferrohren. <https://www.ikz.de/ikz-archiv/1996/05/9605148.php>. Zugriff: 2018-03-07.
- [19] Lexikon der kunststoffprüfung - polymer service gmbh merseburg. https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/HERTZ%C2%B4sche_Pressung. Zugriff: 2018-01-24.
- [20] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. i - theoretical formulation. Technical report, Lewis research center, 1976.
- [21] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. ii - ellipticity parameter results. Technical report, Lewis research center, 1976.
- [22] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. iii - fully flooded results. Technical report, Lewis research center, 1977.
- [23] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. iv - starvation results. Technical report, Lewis research center, 1977.
- [24] Marian Dumitru Furtuna. *Study of Film Formation in EHD Contacts Using a Novel Method Based on Electrical Capacitance*. PhD thesis, Brunel University West London, 2011.
- [25] R. Wayte G. J. Johnston and H. A. Spikes. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contacts. *Tribology Transactions*, pages 187–194, 1991.
- [26] J. Hutchinson Philippa Cann and H. A. Spikes. The development of a spacer layer imaging method (slim) for mapping elastohydrodynamic contacts. *Tribology Transactions*, pages 915–921, 1996.
- [27] Ehd2 - ultra thin film measurement system. <http://pcs-instruments.com/wp-content/uploads/2014/03/EHD2-Brochure2017.pdf>. Zugriff: 2018-03-12.
- [28] M. J. Furey. Metallic contact and friction between sliding surface. *ASLE Transactions*, 4, 1961.
- [29] Jens Kuhlmann. *Tribologische Eigenschaften von Wälzlagerschmierfetten bei dauerhaft niedrigen Betriebstemperaturen*. PhD thesis, Leibniz Universität Hannover, 2009.
- [30] Matthias Barz. *Die Schmierfilmdilbung in fettgeschmierten schnelllaufenden Spindellagern*. PhD thesis, Leibniz Universität Hannover, 1996.
- [31] Peter Brüser. *Untersuchungen über die Elastohydrodynamische Schmierfilmdicke bei elliptischen Hertzschnen Kontaktflächen*. PhD thesis, Technische Universität Braunschweig, 1972.
- [32] Thomas Walbeck. *Das Viskositätsverhalten und die Schmierfilmbildung von Schmierstoffen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur*. PhD thesis, RWTH Aachen, 2004.
- [33] T Dwyer-Joyce, R. S; Reddyhoff and J Zhu. Ultrasonic measurement for film thickness and solid contact in elastohydrodynamic lubrication. *Journal of Tribology*, (133 (3). 031501), 2011.
- [34] Bruce W. Drinkwater Jie Zhang and Rob S. Dwyer-Joyce. Monitoring of lubricant film failure in a ball bearing using ultrasond. *ASME*, 128(612), 2006.
- [35] Jones A. C; Millington M; Muhl J and De Freitas J M. Calibration of an optical fluorescence method for film thickness measurement. *Meas. Sci. Technol*, 12(23), 2001.

- [36] PCS Instrument. *EHL Ultra Thin Film Measurement System - User Manual*, 1999.
- [37] Eike Christian Wittek. Untersuchung des einflusses von bohrschlupf auf die ausbildung das schmierfilm in einem ehd-wälzkontakt. Technical report, Leibniz Universität Hannover, 2007.
- [38] Jan-Niklas Mach. Schmierfilmhöhenmessung mit einem ehl-schmierfilmhöhenmessgerät. Technical report, Leibniz Universität Hannover, 2008.
- [39] Kondensator (elektrotechnik). https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensator_Elektrotechnik. Zugriff: 2018-05-14.
- [40] Electrical impedance. https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance. Zugriff: 2018-04-11.
- [41] ESDU Internaltional Ltd. Film thickness in lubricated hertzian contacts (ehl). part 1, 1985.

Appendices

A. Öldaten

FVA - Referenzöle

	FVA 1		FVA 2		FVA 3		FVA 4		Norm
	Spez.	Ch1/97	Spez.	Ch1/97	Spez.	Ch1/97	Spez.	Ch1/97	
Farbe		0,5		0,5		0,5		4	DIN ISO 2049
Dichte, 15°C kg/m³	855 - 865	861	866 - 876	870	875 - 885	879	892 - 912	902	DIN 51 757
kin. Vis., 20°C mm²/s		34		82					DIN 51 562
kin. Vis., 40°C mm²/s	14 - 16	15	30 - 34	32	90 - 100	95	414 - 500	480	DIN 51562
kin. Vis., 100°C mm²/s	3,2 - 3,6	3,36	5 - 5,5	5,35	10,2 - 11,2	10,7	30 - 32	31,5	DIN 51 562
VI			≥ 96	97	≥ 94	95	≥ 94	95	DIN ISO 2909
Visk.-Dichte-Konstante		0,818		0,815		0,807		0,826	DIN 51 378
ISO-VG	15		32		100		460		DIN 51 519
pourpoint, °C	≤ -12	-18	≤ -12	-15	≤ -12	-12	≤ -9	-9	DIN ISO 3016
Flp COC, °C	≥ 180	200	≥ 215	225	≥ 250	265	≥ 290	310	DIN ISO 2592
Neutralisationszahl, mg KOH/g	≤ 0,05	0,01	≤ 0,05	0,01	≤ 0,05	0,01	≤ 0,05	0,01	DIN 51 558-1
Conradson-Koks, % m/m	≤ 0,05	< 0,01	≤ 0,05	< 0,01	≤ 0,05	0,02	≤ 0,9	0,6	DIN 51 551
Aromaten C _A %	≤ 6	3	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 10	7	DIN 51 378-U
Paraffine C _P %		62		63		66		66	DIN 51 378-U
Naphthene C _N %		35		35		32		27	DIN 51 378-U
Schwefel, % m/m	≤ 0,3	0,1	≤ 0,5	0,1	≤ 0,5	0,1	≤ 2,0	1,0	DIN 51 400-6
Berechnungsindex		1,473		1,477		1,482		1,497	DIN 51 423-2
Polycycl. Aromaten % m/m	< 3	0,7	< 3	0,4	< 3	0,1	< 3	1,9	IP 346
Mittl. Mol.-Gew. g/mol		350		400		500		720	ASTM-D 2502

Alle Öle sind nicht additivierte paraffinbasische Solventraffinate.

Abbildung A.1.: Chemische Eigenschaften von Referenzölen [9]

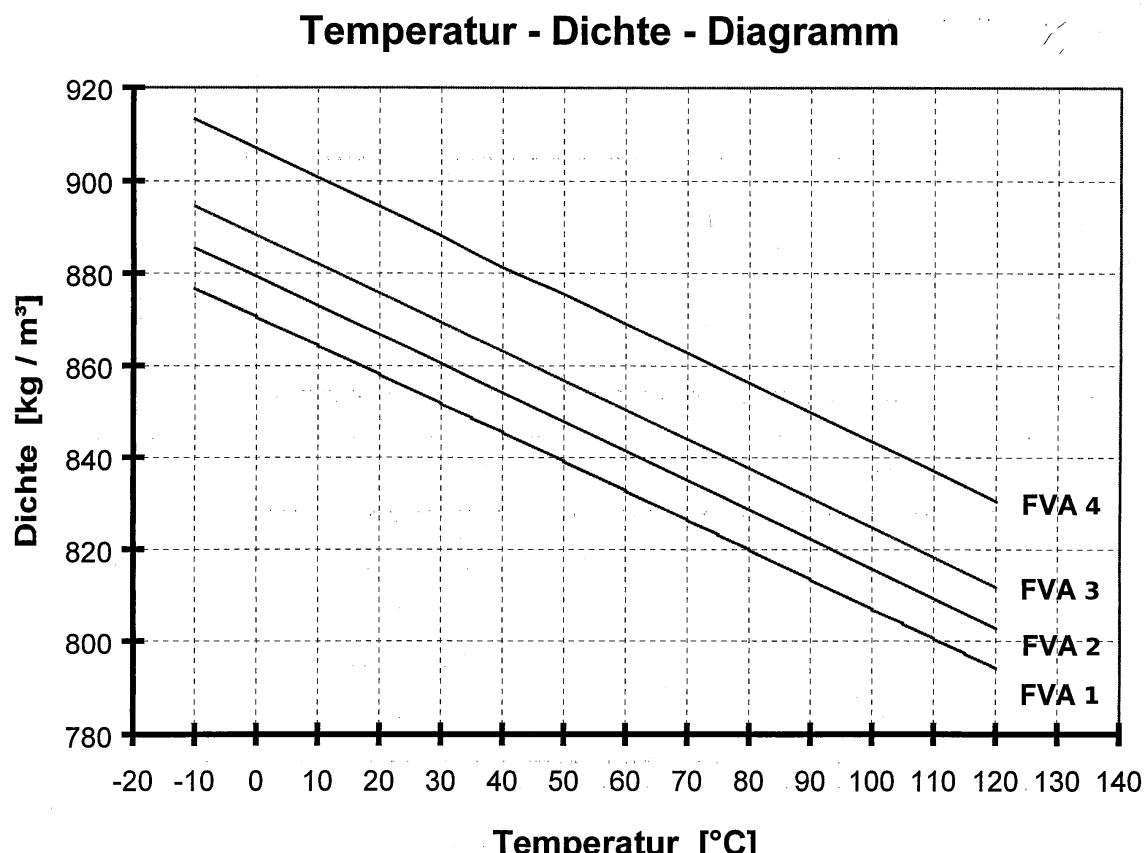


Abbildung A.2.: Dichte-Temperatur von Referenzölen [9]

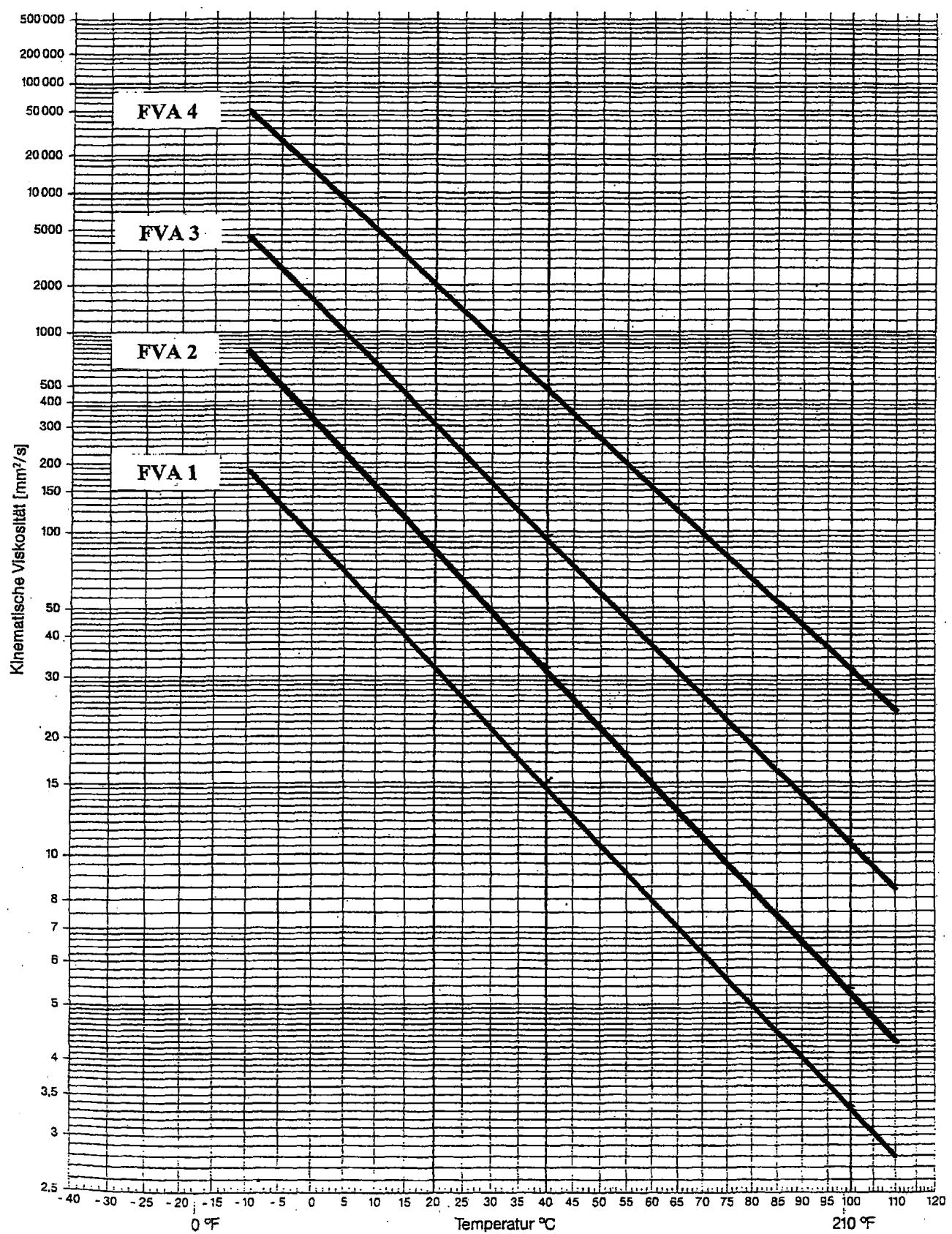


Abbildung A.3.: Kinematische Viskosität-Temperatur von Referenzölen [9]

Tabelle A.1.: Dynamische Viskosität und Druck-Viskositätskoeffizient der Ölen [41]

MINERAL OILS	Nearest ISO VG	KVI	Dynamic viscosity, η , measured at atmospheric pressure ($10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$)			Pressure exponent, α ($10^{-9} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)		
			30 °C	60 °C	100 °C	30 °C	60 °C	100 °C
<u>High VI oils</u>								
Light machine oil	32	108	38	12.1	5.3	–	18.4	13.4
Heavy machine oil	100	96	153	34	9.1	23.7	20.5	15.8
Heavy machine oil	150	96	250	50.5	12.6	25.0	21.3	17.6
Cylinder oil	460	96	810	135	26.8	34	28	22
<u>Medium VI oils</u>								
Spindle oil	15	–	18.6	6.3	2.4	20	16	13
Light machine oil	32	68	45	12	3.9	28	20	16
Medicinal white oil	68	63	107	23.3	6.4	29.6	22.8	17.8
Heavy machine oil	75	84	122	26.3	7.3	27.0	21.6	17.5
Heavy machine oil	100	38	171	31	7.5	28	23	18
<u>Low VI oils</u>								
Spindle oil	22	–6	30.7	8.6	3.1	25.7	20.3	15.4
Heavy machine oil	100	–7	165	30.0	6.8	33.0	23.8	16.0
Heavy machine oil	150	8	310	44.2	9.4	34.6	26.3	19.5
Cylinder oil	1000	–	2000	180	24	41.5	29.4	25.0

OTHER LUBRICANTS	Dynamic viscosity, η , measured at atmospheric pressure ($10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$)			Pressure exponent, α ($10^{-9} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)		
	30 °C	60 °C	100 °C	30 °C	60 °C	100 °C
Water	0.80	0.47	0.28	0	0	0
Ethylene oxide-propylene oxide copolymer	204	62.5	22.5	17.6	14.3	12.2
Castor oil	360	80	18.0	15.9	14.4	12.3
Di(2-ethylhexyl) phthalate	43.5	11.6	4.05	20.8	16.6	13.5
Glycerol (glycerine)	535	73	13.9	5.9	5.5	3.6
Polypropylene glycol 750	82.3	–	–	17.8	–	–
Polypropylene glycol 1500	177	–	–	17.4	–	–
Hyvis 05	91.1	–	–	29.3	–	–
Hyvis 07	211	–	–	30.2	–	–
Santotrac 40	30	–	–	34.5	–	–
Tri-arylphosphate ester	25.5	–	–	31.6	–	–
Di(2-ethylhexyl) sebacate	14.7	–	–	9.3	–	–

These tables have been compiled from published data. New data continually become available and the user should always consult the manufacturer of the particular lubricant.

B. PCS EHD-Prüfstand

B.1. Vorgehensweise für Schmierfilmdicken-Messungen [1]

1. PC, Monitor und Bildschirm einschalten
2. Ultra.exe starten
3. Elektronikeinheit und Lichtquelle einschalten
4. Positionen der Temperatursensoren überprüfen
5. Messtemperatur aktivieren und einstellen:
Control -> Temperature (Regelung auf Pot)
6. gereinigte Kugel und Scheibe einsetzen und mit Rändelschraube sichern
7. Spritzschutzdeckel auf dem Topf positionieren
8. Linse des Mikroskops auf Verschmutzung überprüfen
9. Mikroskop zusammen mit der Lichtquelle montieren
10. Last aufbringen (20 N)
11. grünen Kontaktpunkt im Lichtkreis scharf gestellt und zentriert auf den Spalt ausrichten
12. *Live* aktivieren
13. Bild auf dem Bildschirm scharf stellen und dann ausrichten (Z-Achse)
14. wenn kein Schaden auf der Spur erkennbar ist, den Messpunkt festlegen:
Set -> Trigger Point -> Set Trigger Here
15. Messband festlegen: *Set -> Averaging Band*
16. Testparameter eingeben: *Set -> Test Parameter*
17. Maximum der 3. Ordnung an den linken Bildschirmrand bringen (Mikrometer ca. 0,15)
18. Mikrometereinstellung und Ordnung in die Software eingeben
19. *Smooth, Peak Fit, Multiple* und *Auto Add* aktivieren und *Multiple* auf 3 Wiederholung setzen
20. Geschwindigkeitsschritte auf 20 % setzen: *Control -> Speed*

21. *Immed* drücken
22. Silikatschicht bestimmen: *Set -> Zero Film*, angezeichten Wert notieren
23. Last entfernen
24. die Scheibe ein Stück weiterdrehen: *Set -> Trigger Point -> Jog* (ca. 5x)
25. verminderte Last aufbringen (je nach Öl, ca. 10 N)
26. auf 1,1 m/s beschleunigen und Öl 15 min durchmischen lassen
27. Geschwindigkeit verringern und auf 0,02 m/s einstellen
28. Last auf 20 N erhöhen
29. mit *Trigger* erste Messung beginnen
30. nach Ermittlung des ersten Wertes wird die Protokoll-Datei angelegt (Name und Speicherort wählen)
31. mit *Trigger* von 0,02 m/s bis 4,77 m/s zügig weitere Messwerte ermitteln
32. erreicht die Ordnung die rechte Bildschirmseite, dann mit Hilfe des Mikrometers zurückschieben oder die nächste Ordnung wählen
33. übliche Bereich sind:

0 nm bis 100 nm	3. Ordnung, Mikrometer 0,15
100 nm bis 150 nm	3. Ordnung, Mikrometer 0,16
ab 150 nm	4. Ordnung, Mikrometer 0,14
	4. Ordnung, Mikrometer 0,16
	5. Ordnung, Mikrometer 0,15
34. nach der letzten Messung Geschwindigkeit auf 0 m/s bringen und Last entfernen
35. Scheibe zur Überprüfung des Messpunkts ausrichten:
Set Trigger Point -> Go To Trigger Point
36. Last aufbringen (20 N)
37. mit *Immed* den Nullfilm bestimmen und den Wert notieren

B.2. Procedure for resetting the ball track micrometer

The first requirement is to set the 'preset' position on the micrometer to 39,000 mm (the ball track mid position). Do this as follows:

Ensure the micrometer is operating with the mm scale, press the in/mm button if necessary.

Press and hold down the preset button, the display will change to show 0,000. Continue to hold down the button until the second digit begins to flash and then release the button. Press and release the button repeatedly. The second digit should count up one each time the button is pressed. When the number 3

is reached, press and hold down the button until the third digit starts flashing. Now repeatedly press and release the button until the number 9 is reached. Press and hold down the preset button, so that the fourth, fifth and sixth digit flash in turn and then finally the letter *p* at the top of the display begins to flash. Now release the button, press and release briefly. The micrometer should now read 39,000 mm.

The micrometer should now be adjusted to the ball track mid position. To do this slacken the loading system lock and gently screw in the ball track micrometer until the ball carriage (bellows assembly) reaches its inner most position. Note the reading on the micrometer. Now fully unscrew the micrometer, pull out the load system locking bar to ensure the ball carriage is at its most outer position. Tighten the loading system lock and gently screw in the ball track micrometer until it makes contact with the ball carriage slide. Note the reading on the micrometer, it should be approximately 10 mm greater than the previous reading. Now add the two readings together and divide by two, this value *X* will correspond to the ball track mid position. Adjust the micrometer until it reads *X*. Press and hold down the preset button until 39,000 appears with the *p* flashing. Release the button, press again and release.

The micrometer should now be reading 39,000 mm in the ball track mid position. This completes the setting of the micrometer.



Abbildung B.1.: Micrometer to set ball assembly's position

B.3. Rauheitsmessung der halben beschichteten Glasscheibe

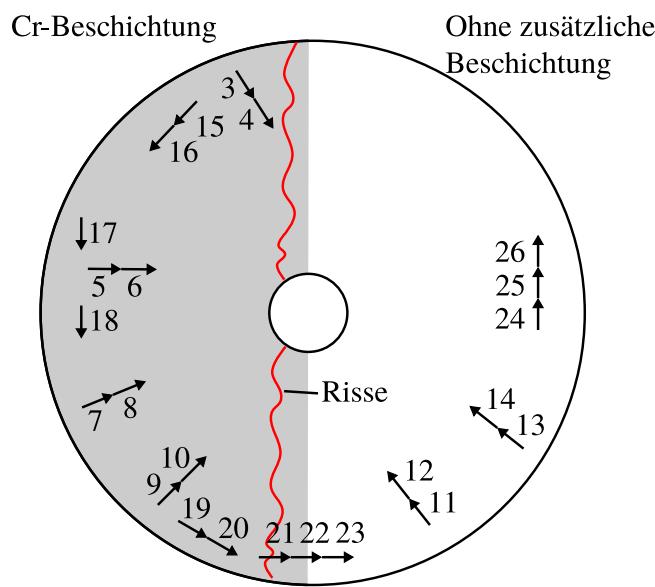


Abbildung B.2.: Messstelle zur Rauheitsbestimmung

Nr	Ra[µm]	Rq[µm]	Nr	Ra[µm]	Rq[µm]
3	0.08	0.13	15	0.02	0.02
4	0.12	0.14	16	0.04	0.06
5	0.02	0.03	17	0.02	0.03
6	0.04	0.05	18	0.11	0.15
7	0.04	0.05	19	0.02	0.12
8	0.03	0.04	20	0.03	0.03
9	0.05	0.06	21	0.05	0.07
10	0.02	0.03	22	0.02	0.02
11	0.07	0.08	23	0.02	0.02
12	0.02	0.02	24	0.01	0.02
13	0.02	0.02	25	0.02	0.02
14	0.01	0.02	26	0.01	0.02

Tabelle B.1.: Rauheit der Scheibe

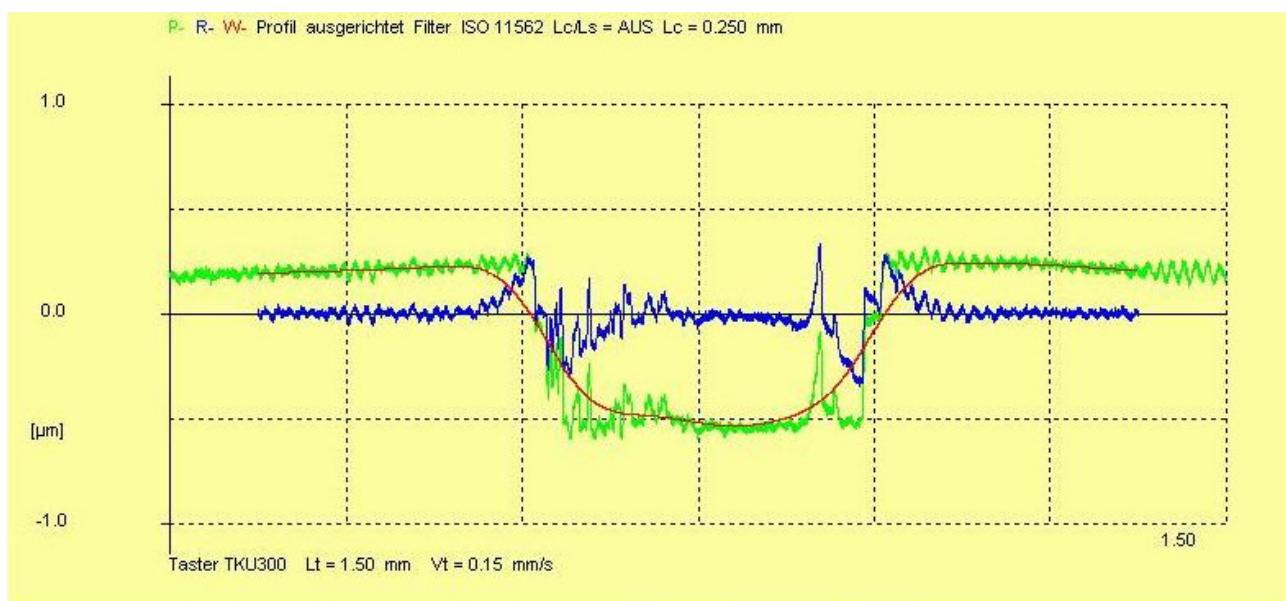


Abbildung B.3.: Rauheitsmessung über die Risse zur Bestimmung der Dicke der Cr-Beschichtung

B.4. PCS EHD-Prüfstand Spezifikationen

Kugel	
Material	Stahl (100Cr6)
Durchmesser	$\phi 19,05$ mm
Rauheit Rq	0,0235 μm
Glasscheibe	
Material	Glas
Durchmesser	$\phi 100$ mm
Rauheit Rq	0,033 μm
Spuren	21
Befahrbarer Radius	34 mm \rightarrow 44 mm
Beschichtung	Silikat
Motoren	
Geschwindigkeit	1 mm/s \rightarrow 4 m/s
Geschwindigkeit Sprung	0 % \rightarrow 100 %
Schlupf (Kugel-Scheibe)	0 % \rightarrow 200 %
Belastung	
Last	0 N \rightarrow 50 N
max. Pressung	1,1 GPa (Stahl); 0,7 GPa (Glas)
Ölreservoir	
Volumen	120 ml
Temperierung	$T_{\text{Raum}} \rightarrow 150$ °C
Messsystem	
Schmierfilmdicke	0 nm \rightarrow 1000 nm
Genauigkeit	± 1 nm

Tabelle B.2.: EHL-Prüfstand Spezifikationen [36]

C. Zeichnungen