

# 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

<b>Nomenklatur</b>	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1. Eigenschaften des Schmiermittels . . . . .	7
2.2. Reibung . . . . .	12
2.2.1. Reibungsarten . . . . .	12
2.2.2. Reibungszustände . . . . .	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
<b>3. Literaturforschung der experimentellen Techniken zur Schmierfilmdickenmessung in EHD-Kontakten</b>	<b>19</b>
3.1. Optische Messung der EHD Schmierfilmdicke . . . . .	19
3.1.1. Licht Interferometrie . . . . .	19
3.1.2. Schmierfilmdickenmessungen mittels Lichtinterferenz . . . . .	20
3.1.3. Variante der optischen Messmethoden . . . . .	21
3.2. Elektrische Messung der EHD Schmierfilmdicke . . . . .	22
3.2.1. Widerstandsmessung . . . . .	22
3.2.2. Kapazitätssmessung . . . . .	23
3.3. Alternative EHD Schmierfilmdicke Messmethoden . . . . .	25
3.3.1. Taktile . . . . .	25
3.3.2. Ultraschall . . . . .	27
3.3.3. Laserinduzierte Fluoreszenz . . . . .	28
<b>4. Aufbau und Funktion des EHD-Messgeräts</b>	<b>29</b>
4.1. PC und Elektronikeinheit . . . . .	29
4.2. Mechanischer Aufbau . . . . .	30
4.3. Messsystem zur Schmierfilmdickemessung . . . . .	31
<b>5. Konstruktive Bearbeitung</b>	<b>33</b>
5.1. Konstruktion der Kugelführung . . . . .	33
5.2. Konstruktion des Kugelsupports . . . . .	34
5.3. Die Glasscheibeabaugruppe . . . . .	35
5.4. Konstruktion des Deckels . . . . .	36
<b>6. Versuche auf dem EHD-Messgerät</b>	<b>38</b>
6.1. Versuchte Öle . . . . .	38
6.2. Kapazitive Messgeräte zur Schmierfilmdickenbestimmung . . . . .	38
6.2.1. Stromladekurve Messgerät . . . . .	38

## *Inhaltsverzeichnis*

6.2.2. LCR Messgerät . . . . .	40
6.3. Versuchdurchführung . . . . .	41
<b>7. Versuchsergebnisse und Diskussion</b>	<b>42</b>
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>43</b>
<b>9. Literaturverzeichnis</b>	<b>44</b>
<b>Appendices</b>	<b>47</b>
<b>A. Öldaten</b>	<b>48</b>
<b>B. PCS EHD-Prüfstand</b>	<b>50</b>
B.1. Vorgehensweise für Schmierfilmdicken-Messungen . . . . .	50
B.2. Procedure for resetting the ball track micrometer . . . . .	51
B.3. PCS EHD-Prüfstand Spezifikationen . . . . .	52
<b>C. Zeichnungen</b>	<b>54</b>

# Notes

■ Update image the glas disc assembly . . . . .	36
■ Update the figure . . . . .	41
■ image of the micrometer . . . . .	52

# Nomenklatur

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a$	m	Halbachse der Kontaktellipse senkrecht zur Bewegungsrichtung
$b$	m	Halbachse der Kontaktellipse parallel zur Bewegungsrichtung
$C$	$\text{Pa}^{-1}$	Kompressibilität
$E$	$\text{N}/\text{m}^2$	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
$u$	$\text{m}/\text{s}$	Wälzgeschwindigkeit im Schmierfilm
$W$	-	Belastungsparameter
$\alpha, \alpha^*$	$\text{Pa}^{-1}$	Druck-Viskosität-Koeffizient
$\beta$	$\text{K}^{-1}$	Temperatur-Viskosität-Koeffizient
$\gamma$	$\text{s}^{-1}$	Schergefälle
$\gamma_1$	°	Neigungswinkel der Rotationsachse der Scheibe
$\gamma_2$	°	Neigungswinkel der Rotationsachse der Kugel
$\eta$	$\text{Pas}$	Viskosität
$\eta_0$	$\text{Pas}$	Viskosität im Kontakteintritt ( $p = 0$ )
$\eta_s$	$\text{Pas}$	Viskosität beim Druck $p$ (Barus)
$\kappa$	-	Verhältnis der Halbachsen der Kontaktellipsen
$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$\nu$	$\text{m}^2/2$	Kinematische Viskosität
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte
$\varphi$	°	Winkel zwischen den Hauptebenen

# 1. Einleitung

Eine Maschine besteht im Allgemein aus beweglichen Teilen. Dabei tritt es zwischen den sich berührenden Oberflächen Reibung und Verschleiß auf. Um diese unerwünschte Effekte gering zu halten, werden diese Teile in Maschine gelagert. Es gibt verschiedene Typen vom Lager, aber ein weit verbreitetes Maschinenelement ist das Wälzlagern. Das Geheimnis bei einem sicheren und langlebigen Betrieb eines Wälzlagers ist die Schmierung. Die kann in Form einer Fettschmierung oder einer Ölschmierung sein.

Im Wälzlager entsteht zwischen den Oberflächen von relativ zu einander beweglichen Teilen einen Schmierfilm. Unter der enormen Belastung im kontraformen Kontakt befindet sich dieser Schmierfilm im Bereich der elastohydrodynamischen Schmierung. Für die Ölschmierung stehen viele Möglichkeiten zur Bestimmung der Schmierfilmdicke, wie zum Beispiel analytische, optische, kapazitive, taktile Methode, etc. Jede Methode hat eigene Vorteile und Nachteile, aber wurden sie aufgrund technischen Aufwands und der Eigenschaften der Test-Maschinenelementen meist separat ausgeführt. Ist es möglich, die Vorteile von verschiedenen Messmethoden, nämlich das optische und elektrische Messverfahren zu kombinieren?

Um diese Frage zu beantworten, wird ein System im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, das beide Aufbauten vereinigt. Die Entwicklung basiert auf einem Kugel-Scheibe-Modellprüfstand. In dem wird zwischen einer rotierenden Glasscheibe und einer Stahlkugel ein Wälzkontakt, der etwa ähnlich mit dem im realen Wälzlagern 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 [1] 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[2]

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 je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger ist es. Ein Modell des Parallelplattenversuchs veranschaulicht das Fließverhalten des Schmierstoffes (Abbildung 2.2).

Für eine Newtonsche Flüssigkeit wird die Viskosität  $\eta$  in einer Beziehung mit der Schubspannung  $\tau$  definiert [3]:

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

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

Die kinematische Viskosität  $\nu$  ergibt sich aus der dynamischen Viskosität  $\eta$  durch die Division mit



**Abbildung 2.2.:** Geschwindigkeitsprofil in einem Parallelplattenversuch[2]

der Dichte des Fluids  $\rho$ . Die wird zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Schmieröle verwendet.

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

Im Si-Einheitensystem hat die dynamische Viskosität  $\eta$  als Einheit  $\text{Ns/m}^2$  oder  $\text{Pas}$  und die kinematische Viskosität  $\nu$  als Einheit  $\text{m}^2/\text{s}$ . Ein Stoff hat die Viskosität  $1 \text{ Ns/m}^2$ , wenn er sich in zwischen zwei Platten, die die Größe von  $1 \text{ m}^2$  und einen Abstand von einander  $1 \text{ m}$  haben, befindet und man braucht  $1 \text{ N}$ , um die zwei Platten gegeneinander mit einer Geschwindigkeit von  $1 \text{ m/s}$  zu verschieben [3].

## Temperatureffekt

Die Temperatur hat eine große Effekt auf die Viskosität aller fließfähigen Stoffe. Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität der Flüssigkeiten ab. Diese Effekt kann experimentell mittels eines Viskosimeters und rechnerisch nach *Crouch* und *Cameron* [4] bestimmt werden.

Die einfachste Gleichung, die beschreibt die Temperatureffekt auf die Viskosität, nach *Reynolds* [5] lautet:

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

wobei  $\eta_s$  die Viskosität des Schmierstoffes bei der Temperatur  $\phi_s$  ist,  $\eta$  ist die Viskosität des Schmierstoffes bei der Temperatur  $\phi$ ,  $\Delta \phi$  ist die Temperaturdifferenz ( $\phi = \phi_s + \Delta \phi$ ) und  $\beta$  ist die thermoviskose Konstante.

## Viskositätsindex

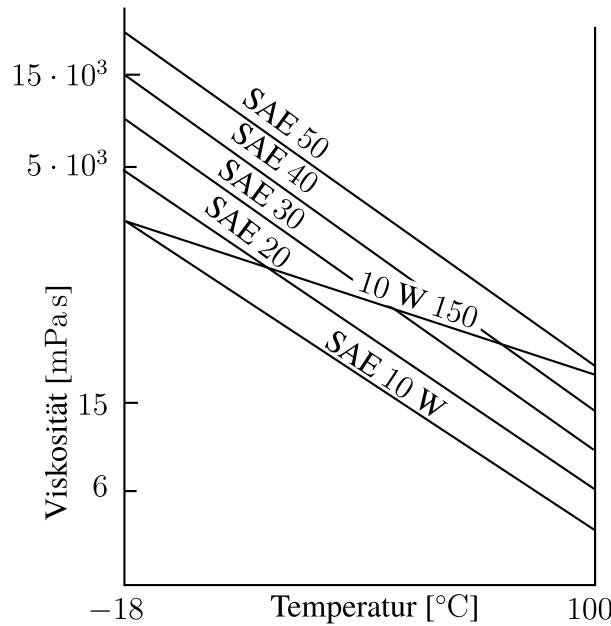
Die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität eines Schmieröls wird von dem Viskositätsindex (VI oder KVI) beschrieben. Der Viskositätsindex basiert auf einem Skala, in der zwei unterschiedliche Öltypen mit deutlich abweichenden Viskositätstemperaturverhalten zugeordnet wurden. Das Öl, das starke Veränderung 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  $100^\circ\text{C}$  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  $\nu$  von der Temperatur  $\theta$  nach *Walther* (*Sánchez-Rubio, et al.*) [6] lautet:

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

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



**Abbildung 2.3.:** Variation der Viskosität mit Temperatur [7]

## 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* [9] kann die Viskosität mit der untenen Formel berechnet werden

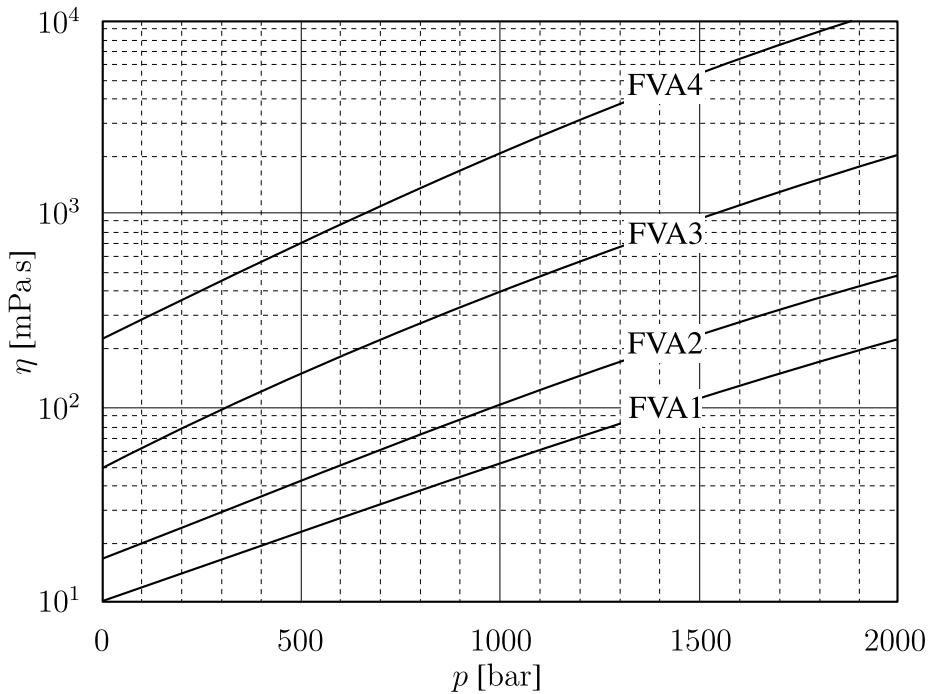
$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad (2.6)$$

wobei  $\eta_0$  die Viskosität beim Atmosphärendruck ( $p = 0$ ) und  $\alpha_p$  der Druck-Viskosität-Koeffizient ist. Für Mineralöle sind diese Parameter ungefähr [2]:

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

Leider liefert die Gleichung von *Barus* einen zu großen Wert beim hohen Druck. Eine genauere Gleichung für die Viskosität bei der Temperatur  $\theta$  wurde von *Roelands* [10] 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 [8]

Der *Roelands* Druck-Viskositätskoeffizient  $\alpha^*$  ist eine Funktion der Druck  $p$  und die Temperatur  $\theta$  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  $\theta_0$  [K] der Raumtemperatur und  $p_0 = 1,98 \cdot 10^8$  Pa eine Konstante ist.  $Z$  und  $S_0$  sind die Konstante für alle Öle, unabhängig von Temperatur und Druck und können durch unteren Formeln [7] berechnet werden:

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

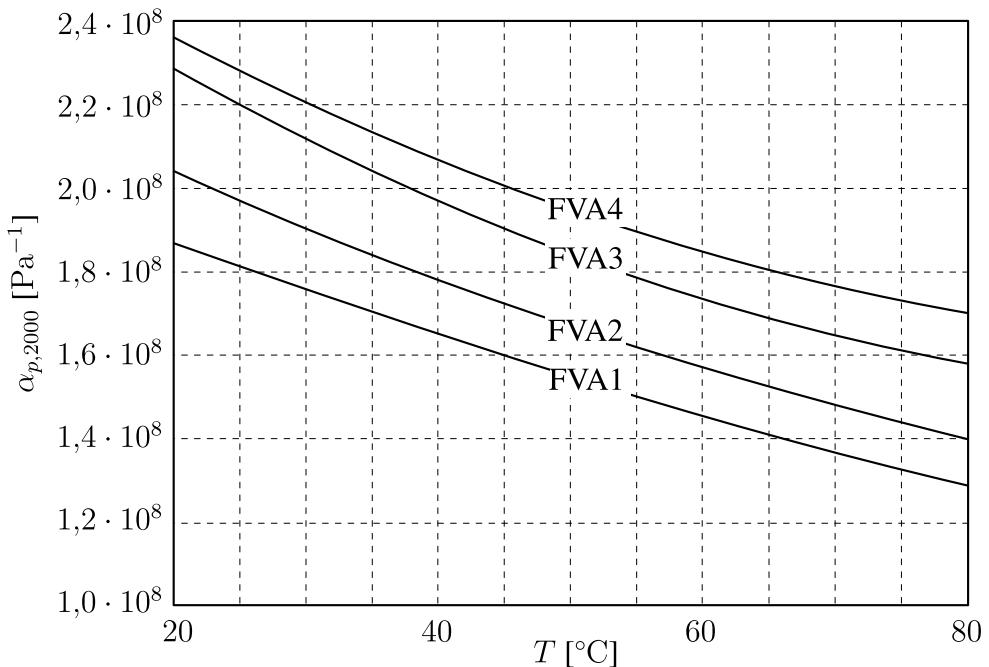
$$S_0 = \frac{\beta(\theta_0 - 138)}{\log(\eta_0) + 9.67} \quad (2.10)$$

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

Der Viskositäts-Druck-Koeffizient  $\alpha$  ist nicht eine 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 verschiedenen Drucken verhält. Die Form des Schmierfilms kann nicht



**Abbildung 2.5.:** Viskositäts-Druck-Koeffizient der FVA-Referenzöle in Abhängigkeit von der Temperatur [8]

richtig berechnet werden, wenn diese Eigenschaft vernachlässigt wird. Die Kompressibilität eines Schmierstoffes  $C$  kann nach *Chu* und *Cameron* [11] 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* [12] mit folgender Formel zu berechnen

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

wobei  $p$  [GPa] und  $\rho_0$  die Dichte beim normalen Luftdruck ( $0,87 \text{ kg/m}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$ ) ist. Abbildung 2.6 zeigt einen Plot der Gleichung 2.12 für ein Mineralöl, das eine Dichte  $\rho_0$  von  $0,85$  bei  $40^\circ\text{C}$  hat. Die Messpunkte  $\triangle$  stammen aus Versuchen von *Hirano et al* [13].

## Brechungsindex

Für die Messverfahren, die auf optischen Interferometrie basieren, braucht man die Abhängigkeit zwischen der Dichte und dem Brechungsindex des Schmierstoffes. Nach *Gohar* [14] 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 c.a 1,51 ist. 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 verschiedenen Drücken [7]

## Wärmeleitfähigkeit

Um die Temperaturerhöhung des Schmierstoffes unter Schubspannung zu schätzen, ist dessen Wärmeleitfähigkeit  $k$  nötig. Nach Cameron [9] kann diese Größe beim normalen Luftdruck mit folgender Formel berechnet werden.

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

wobei  $\theta$  [K] die absolute Temperatur und  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>] die Dichte ist.

## Newtonische Fluide

Wenn die Viskosität eines Fluids von der Schubspannung unabhängig ist, wird das Fluid als newtonsches Fluid bezeichnet - Abbildung 2.7. Flüssigkeiten, deren Viskosität mit steigender Schubspannung zunimmt, nennt man dilatant. Solches Verhalten zeigt häufig Suspensionen, die sind nicht als Schmierstoff geeignet. 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. Man unterscheidet zwischen innerer und äußerer Reibung. Äußere Reibung tritt auf, wo die Flächen der unterschiedlichen Körpern sich berühren. Von innerer Reibung spricht man, wenn die sich berührenden Stoffbereiche einem Körper angehören, z.B im Schmierstoff.

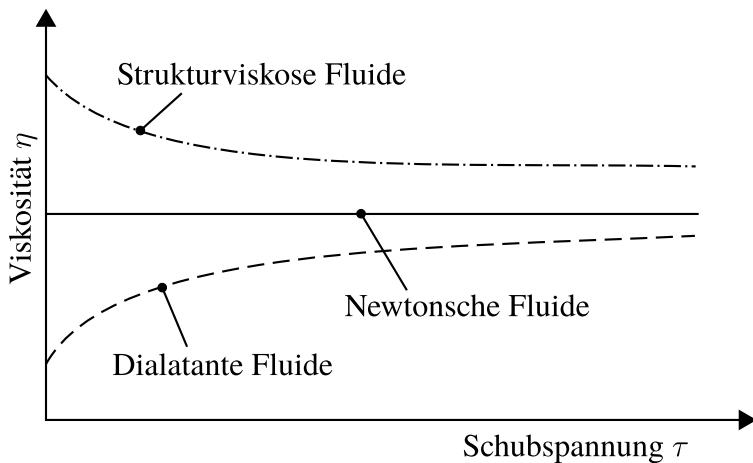


Abbildung 2.7.: Newtonsche und die andere Fluide[2]

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

Reibung wird durch den Reibwert  $\mu$  charakterisiert. Er beschreibt das Verhältnis von der Reibungskraft  $F_R$  und der Normalkraft  $F_N$  [15]:

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

Die Bewegungsreibung kann man in drei Kategorien Gleitreibung, Rollreibung und Bohreibung einteilen (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.

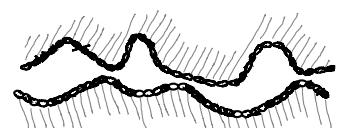
## 2.2.2. Reibungszustände

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 außer Gasreibung eingegangen.

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



**Grenzreibung** Grenzreibung ist von der Festkörperreibung schon sehr 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.



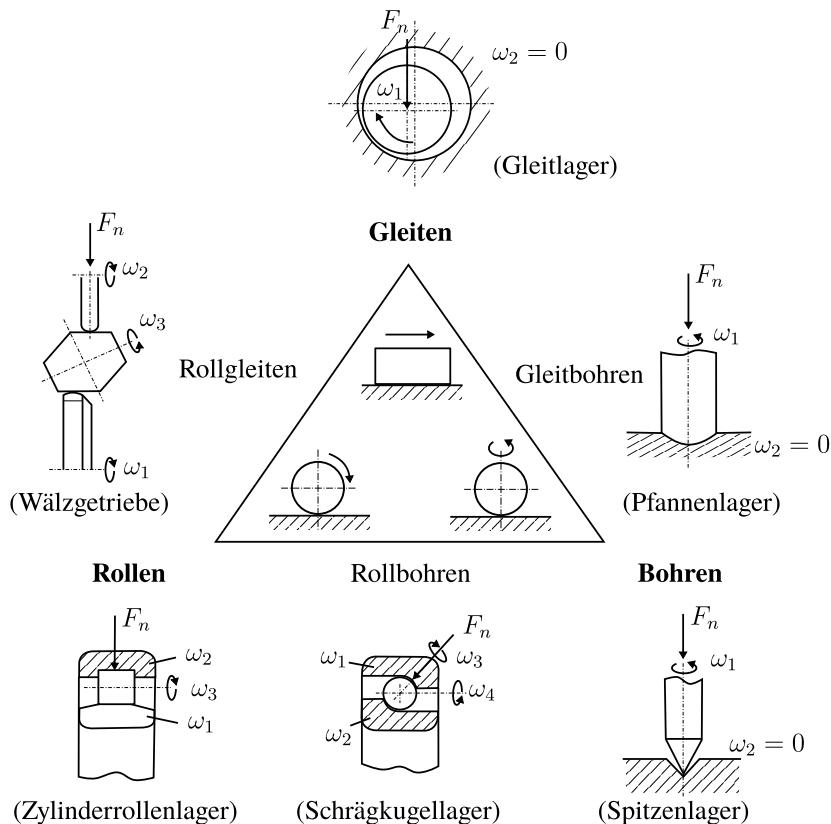
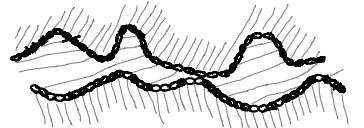
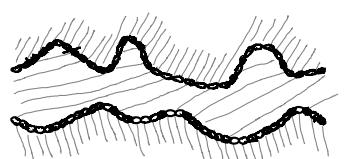


Abbildung 2.8.: Arten der Bewegungsreibung [16]

**Mischreibung** Bei Mischreibung gibt es schon im Reibkontakt ein bisschen Schmierstoff und die Laufflächen werden zum Teil durch einen Schmierfilm getrennt. Leider ist der nicht hoch genug, um ein vollständiges Trennen der beiden Körpern zu erreichen. Es kommt immer noch die 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, bleibt nur noch die innere Reibung, welche durch die Scherbeanspruchung des Schmierstoffs hervorgerufen wird.

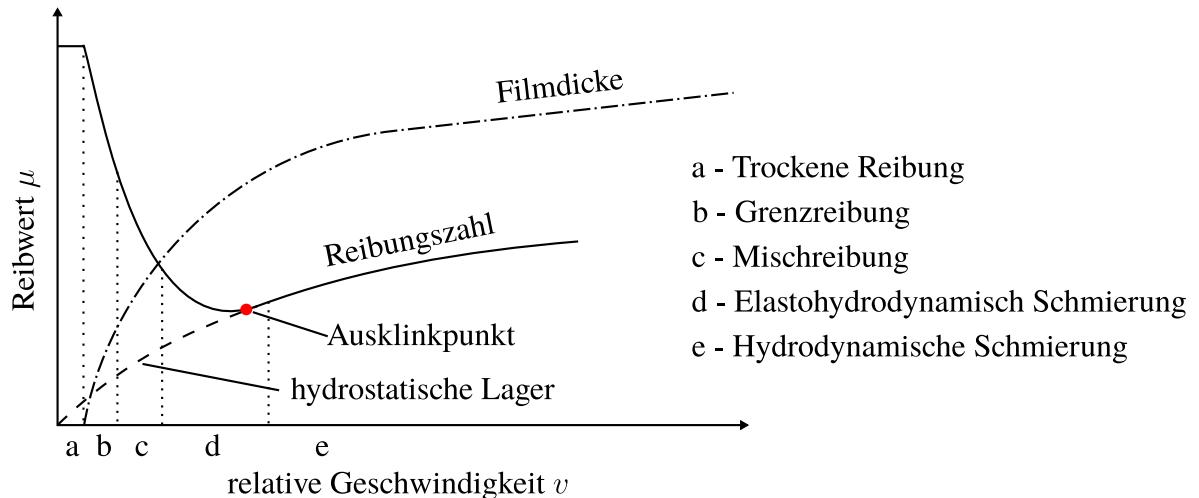


Der Aufbau des Schmierfilms erfolgt hydrodynamisch, elastohydrodynamisch oder hydrostatisch. Hydrostatisch aufgebaute Schmierfilme werden durch externe Aggregate wie zum Beispiel eine Pumpe aufgebaut. Bei der hydrodynamischen Schmierung wird der Schmierfilm durch die Relativbewegung der Reibpartner aufgebaut. Die hydrodynamische Schmierung tritt im Allgemein nur bei konformen Kontaktpaarungen auf. Mit konformen Kontaktpaarungen spricht man von Kontaktkörpern, die sich auf eine 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 Allgemein kontraform. Ihre Flächen berühren sich nur in einem Punkt oder 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.



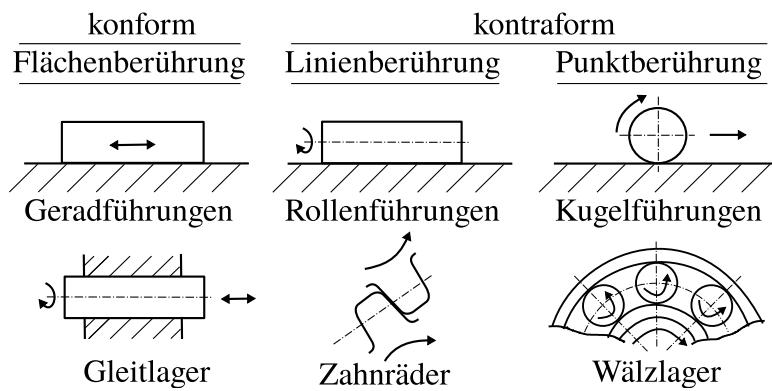
**Abbildung 2.9.:** Stribeck-Kurve eines geschmierten Gleitlagers [17]

Im Stillstand tritt erst einmal reine Haftriebung 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 gefördert. Jetzt nimmt die Reibung weiter ab und es kommt zur Mischreibung. Bei weiter zunehmender Drehzahl sinkt die Reibungszahl ab bzw. steigt der Schmierfilm so weit 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

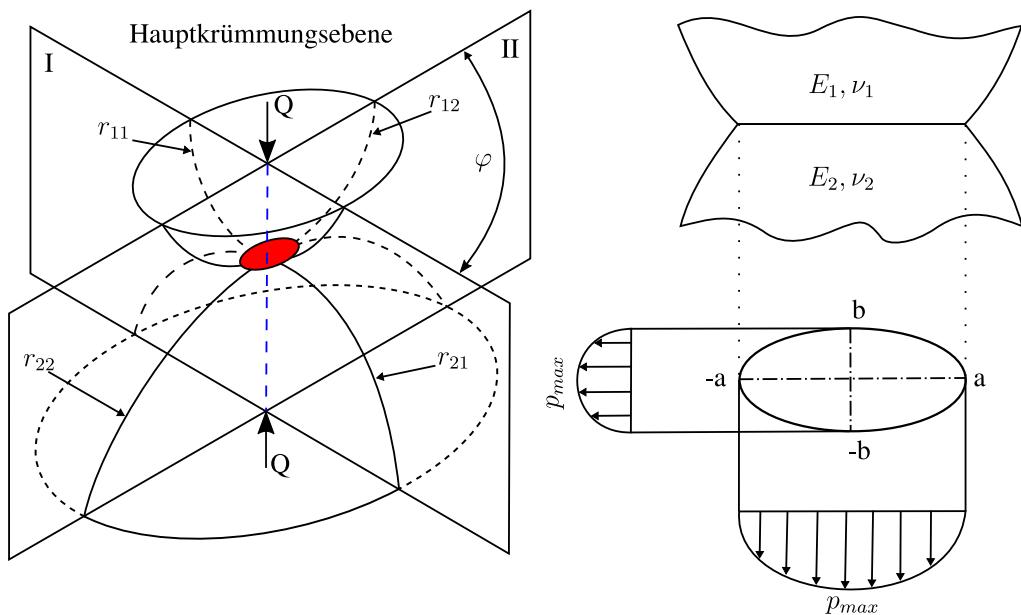
Die Kontaktflächen von Maschinenelementen werden in zwei Grundformen eingeteilt. Dies sind konforme (z.B. Gleitlager) und nichtkonforme Paarungen (z.B. Zahnrad, Reibrad, Nocken-Stößel). Abbildung 2.10 zeigt die Beispiele konforme und nichtkonforme Kontakte. Gegenteil zu den konformen Kontakten, wo die Pressungen in der Größenordnung von 10 MPa auftreten, können in zwischen den Laufflächen nichtkonformer Kontakt die Druckspannungen 0,5 GPa und höher betragen. Durch die enorme, konzentrierte Belastung werden die Flächen an dem Kontaktspunkt elastisch verformt und vergrößert. Im Folgenden soll der Wälzkontakt nach *Wisniewski* [2] näher betrachtet werden.



**Abbildung 2.10.: Konforme und kontraforme Kontakte [16]**

### 2.3.1. Kontakt von beliebig gekrümmten Elementen

Bei der Betrachtung des konzentrischen Kontaktes werden alle Oberflächen als ideal glatt angenommen und durch deren minimalen und maximalen Krümmungen wird die Geometrie des Grundkörpers bzw. des Gegenkörpers beschrieben. Beim konvexen Körper (Index 1) sind die Krümmungsradien ( $r_{11}, r_{12}$ ) positiv und beim konkaven Körper (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  $\varphi$ . In Abbildung 2.11 wird die generelle Kontaktgeometrie bei nicht konformen Festkörpern dargestellt. Im Kontaktbereich bildet sich



**Abbildung 2.11.: Kontaktgeometrie bei nicht konformer Paarungen[18]**

die Kontaktflächen eine Ellipse mit den Halbachsen  $a$  und  $b$ . Zu  $a$  und  $b$  zu bestimmen, braucht man das reduzierte Elastizitätsmodul  $E$ , die Belastung  $P$  und der Krümmungsradius  $R$ .

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

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

Der reduzierte Elastizitätsmodul  $E$  beschreibt die elastische 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  $\nu_x$  die Querkontraktionszahl der Kontaktkörper und  $E_x$  der Elastizitätsmodul der Kontaktkörper ist. Die Druckverteilung  $p$  hat eine Form eines Halbellipsoids und wird so definiert

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

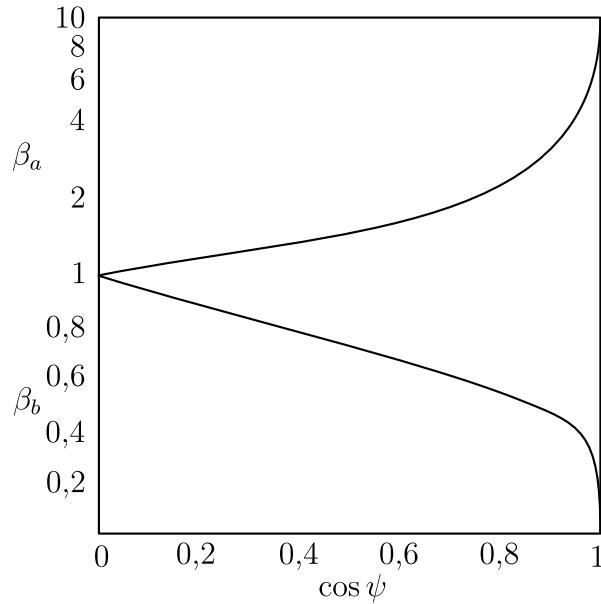
wobei  $x, y$  die Koordinaten in der Ebene und die maximale Pressung  $p_0$  ein Produkt der Belastung  $P$  und der Länge von Halbachsen  $a, b$  sind.

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

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  $\beta_a$  und  $\beta_b$  zur Bestimmung der Berührungsfläche in einem konformen Kontakt kann über den Parameter  $\cos \psi$  aus dem Diagramm 2.12 abgelesen werden.



**Abbildung 2.12.:**  $\beta_a$  und  $\beta_b$  als Funktion von  $\cos \psi$ [2]

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

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

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 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:

Schmierfilmparameter	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R}; \quad H_0 = \frac{h_0}{R}$	(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 [19][20][21][22] 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  $\chi$  das Verhältnis der Halbachsen der Kontaktellipse ist und  $R_x$  bedeutet der Krümmungsradius in der Bewegungsebene. Der Geschwindigkeits-, und Belastungsparameter weichen hier von den verallgemeinerten ab.

Man kann hier erkennen, dass der Geschwindigkeitsparameter  $U_0$  mit einem Exponenten von 0,67 den höchsten Einfluss auf die Schmierfilmdicke hat. Erstaunlicherweise hat die Belastung kaum einen Einfluss.

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

#### 3.1. Optische Messung der EHD Schmierfilmdicke

Viele lichtspezifische Phänomene so wie Spiegelung, Refraktion, Interferenz, etc. kann 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  $\lambda$  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 zum Zeitpunkt  $t$  angibt. Was in der Praxis wichtig ist, ist die Phasendifferenz von zwei Lichtquellen an der gesuchten Stelle zu finden. Wenn Licht in unterschiedlichen Medien durchdringt, wird dessen Geschwindigkeit entsprechend dem Brechungsindex der Medien verändert. Diese Geschwindigkeitsabweichung verursacht einen Pfadunterschied  $\Delta$ , der in Folge zur Phasenabweichung  $\delta$  führt.

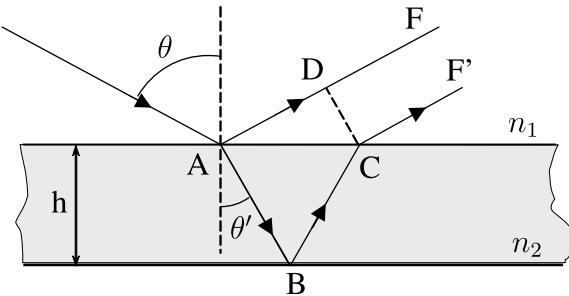
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta \quad (3.2)$$

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

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

Diese Phänomene sind in einem Beispiel (Abbildung 3.1), wo ein Lichtstrahl in die Luft in eine Glasscheibe mit einem Winkel  $\theta$  angeht, dargestellt. Der Brechungsindex der Luft ist  $n_1$  und von der

Glasscheibe ist  $n_2$ . Hier wird der Lichtstrahl an der Grenze der Glasscheibe am Punkt A teilweise zurück reflektiert (Pfad  $ADF$ ) und teilweise durchgelassen (Pfad  $AB$ ). An der Unterseite der Glasscheibe wird er noch mal am Punkt B zurück gespiegelt und am Punkt C in die Luft durchdringt (Pfad  $BCF'$ ). Von einem Lichtstrahl gibt es jetzt zwei Lichtstrahle, die gleiche Wellenlänge sowie der originale aber wegen dem Pfaddifferenz ( $ABCF' > ADF$ ) verschiedene Phasen haben.



**Abbildung 3.1.:** Pfaddifferenz eines Lichstrahles [23]

### 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 geladen ist (Abbildung 3.2). Die berührende Fläche der Scheibe ist mit einer halbdurchsichtigen Schicht (Chrom) beschichtet, so dass ein auf den Kontakt auftreffende Licht (monochrom) zweimal reflektiert wird, erstens an der Glas-Metallschicht-Grenzfläche und zweitens an der Kugel-, Rolleroberfläche.



**Abbildung 3.2.:** Prinzip der optischen Schmierfilmdickenmessung [23]

Bei Rekombinaiton führt die Pfaddifferenz zwischen den reflektierten Strahlen entweder zu einer konstruktiven oder zu einer destruktiven Interferenz. Diese 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* [24] versucht die geringe Auflösung der klassischen Methode zu überwinden. Sein Ansatz bestand darin, eine Abstandsschicht aus Silikat mit fixierter Dicke zu verwenden, die auf der 20nm Chromschicht abgelagert wurde. Die Silikatschicht hat einen Brechungsindex, der ähnlich so wie von Mineralölen ist und wirkt als „festes Öl“. Sie soll die Trennung zwischen den Kontaktflächen erhöhen und dadurch ermöglicht es 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 (Abbildung 3.3). Die Auflösung dieser Technik liegt in der Größenordnung von Nanometern.

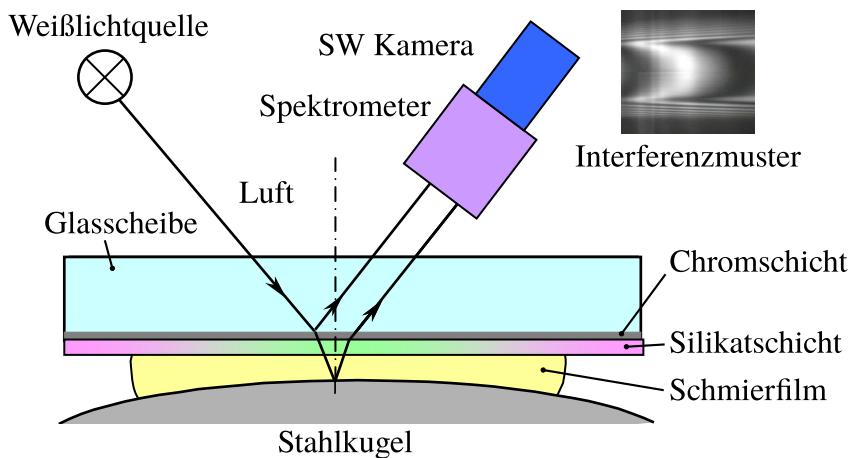


Abbildung 3.3.: Spacer-Layer-Methode [24]

Eine Beschränkung der Technik der Spacer-Layer besteht darin, dass nur eine Messung von der Mitte des Kontakts aufgenommen wird. *Cann et al.* [25] beschrieb die Entwicklung einer neuen Technik, die die Abbildungsfähigkeiten des klassischen optischen Verfahrens mit der UTFI-Methode kombiniert, das *Spacer-Layer-Imaging-Verfahren* (SLIM) (Abbildung 3.4).

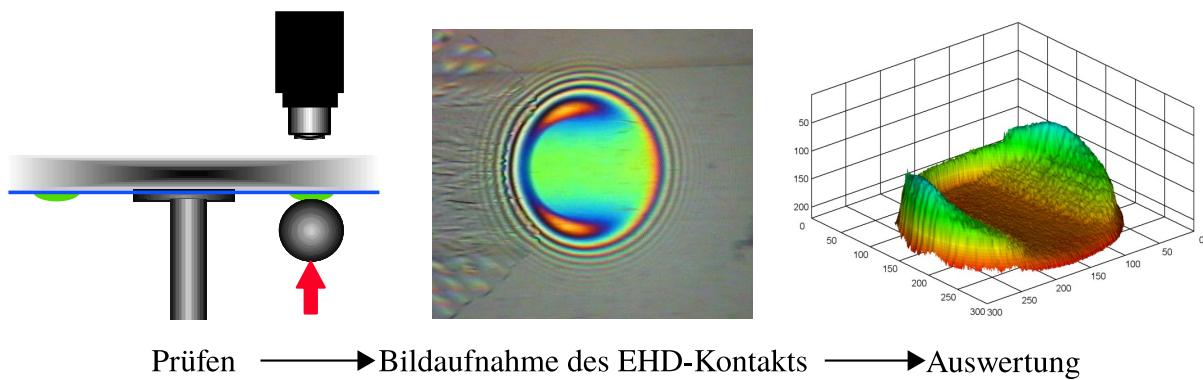


Abbildung 3.4.: SLIM Methode [26]

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 in verschiedenen Bedingungen, wie zum Beispiel Fettschmierung, rauhe Oberflächen, mangelte Schmierung oder additive Grenzschichtbildung.

## 3.2. Elektrische Messung der EHD Schmierfilmdicke

Neben der optischen Messmethoden gibt es noch die elektrische Messmethode zur Untersuchung der EHD-Schmierung, wie zum Beispiel Widerstand, Kapazität, 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, wo die große lokale Verformung stattfindet, ist nur vermutet und stark vereinfacht. Die hat Einfluss auf die Widerstand-, Kapazität-Messergebnisse. Ein anderer Faktor ist die Sauberkeit des Schmierstoffes, welche schwer zu kontrollieren ist. Generell liefern die elektrische Methode nur die mittleren Werte über den Kontaktbereich und gibt leider keine direkte Indikation der Form des Schmierfilms.

Normalerweise werden die elektrische Methoden für folgende Anwendungen verwendet:

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

### 3.2.1. Widerstandsmessung

Die Widerstandmessmethode ist geeignet, um 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.

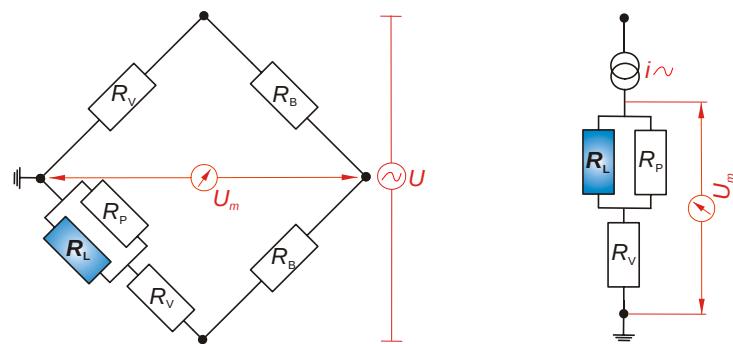
In einem System bestehend aus einer feststehenden Kugel und einem rotierenden Zylinder hat *Furey* [27] das Verhalten des elektrischen Widerstands untersucht. Die Ergebnisse (Abbildung 3.5) zeigten eine große Streuung des Widerstands bei Mischreibung. Zum Beschreiben für einen isolierenden Schmierfilm definiert 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 wird über Intervalle von 10 ms aufgenommen, ausgewertet und das Ergebnis als prozentualer Anteil des direkten Kontakt angegeben. Mit dieser Methode konnte er berechnen, wie groß der Anteil der Festkörperkontakte in jedem Reibungszustand ist.

In seiner Arbeit [28] verwendete *Kuhlmann* zwei unterschiedliche Systeme zur Widerstandsmessung. Ein System basiert auf die *Wheatstonsche* Brückenschaltung (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 bei  $R_L$  mehr als  $1\text{ k}\Omega$  setzte *Kuhlmann* ein direkt



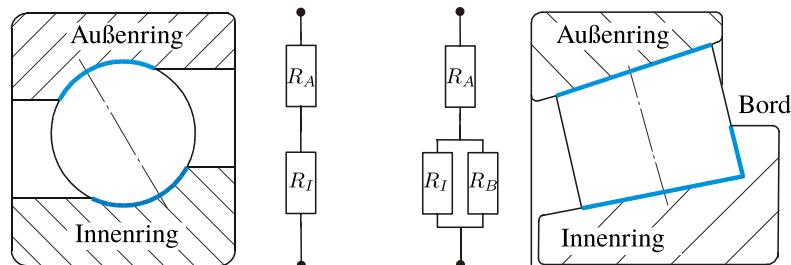
**Abbildung 3.5.:** Der prozentuale Anteil von metallischen Kontakt [27]

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



**Abbildung 3.6.:** Ersatzschaltbild für die Messsysteme [28]

Beide obengenannte Messsysteme wurden von *Kuhlmann* bei Fettuntersuchung mit Schräkgugellagern und Kegelrollenlagern bei niedrigen Betriebstemperatur eingesetzt (Abbildung 3.7). Durch eine 0,4 mm dicke Keramikbeschicht zwischen der Lagersitze und der Welle konnte er den Widerstand für beide Lager separat messen. Abbildung 3.7 zeigt die elektrische 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-Einzelkontaktees [28]

### 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 quantitative Schmierfilmdickenmessung durchzuführen, welche bei resistiver Methode schwer oder unmöglich ist.

Auf Basis der Konstantstromladung hat *Barz* [29] 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* [30] beschrieben.



Abbildung 3.8.: Kapazitives Modell eines EHD-Kontaktes [29]

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 dieser Annahmen kann man die Kontaktkapazität so berechnen:

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

Aufgrund dem großen Einfluss und der linearen Proportional von der  $C_{\text{Hertz}}$  mit der  $C_K$  vereinfachte *Barz* die Kontaktkapazität als:

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

$$C_{\text{Hertz}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_{\text{Hertz}}}{h_0} \quad (3.5)$$

wobei  $A_{\text{Hertz}}$  die Größe der Hertzschener Kontaktfläche,  $h_0$  die zentrale Schmierfilmdicke,  $\varepsilon_0$  die elektrische Feldkonstante ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-15} \text{ A s/V m}$ ) und  $\varepsilon_r$  die relative Dielektrizitätskonstante ist. In der Gleichung 3.5 definierte *Barz* definierte einen Umrechnungsfaktor  $k_C$ , welcher die  $C_{\text{Einlauf}}$  und die  $C_{\text{Auslauf}}$  berücksichtigt. Er ist von den Betriebsbedingungen, dem Lager, dem Schmierstoff, der Laufzeit etc. abhängig. Selbst ist er von der Schmierfilmdicke abhängig, da das Verhältnis zwischen  $C_{\text{Einlauf}}$  und  $C_{\text{Auslauf}}$  bei der Änderung der Schmierfilmdicke nicht konstant bleibt. Für den betrachten Fall mit axial belasteten Spindellagern hat *Barz* mit dem 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 der

beiden Ringen ein. Der ist das Verhältnis von den nach EHD-Theorie berechneten Schmierfilmdicken am Innenring  $h_{EHD,i}$  und am Außenring  $h_{EHD,a}$  und berechnet sich unter einer 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, hat Walbeck in seiner Arbeit [31] einen modifizierten FE8-Prüfkopf (FE8-SDM) benutzt (Abbildung 3.9).

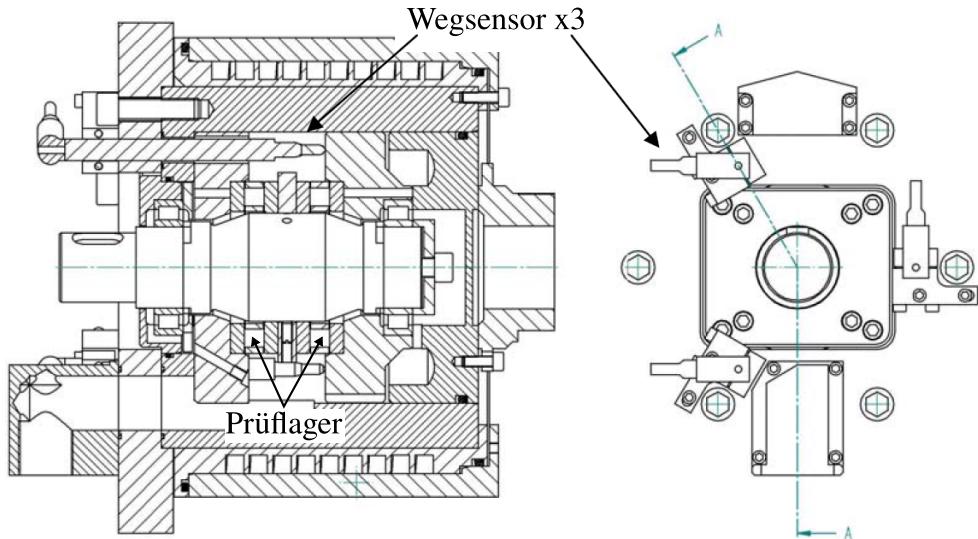


Abbildung 3.9.: FE8-SDM Prüfkopf [31]

In der neben einander Anordnung sollen die Schmierfilme in zwei Prüflagern eine Gesamtverschiebung von  $x_{ges} = 4h_0$  verursachen. Zur Messkette, die mit einem maximalen Messfehler von  $0,9 \mu\text{m}$  aufweist, gehören die drei hochauflösende induktiv Wegaufnehmer. Wird es auf den einzelnen Schmierspalt bezogen, reduziert sich der maximal mögliche Fehler auf  $0,23 \mu\text{m}$ . Da die Erwärmung

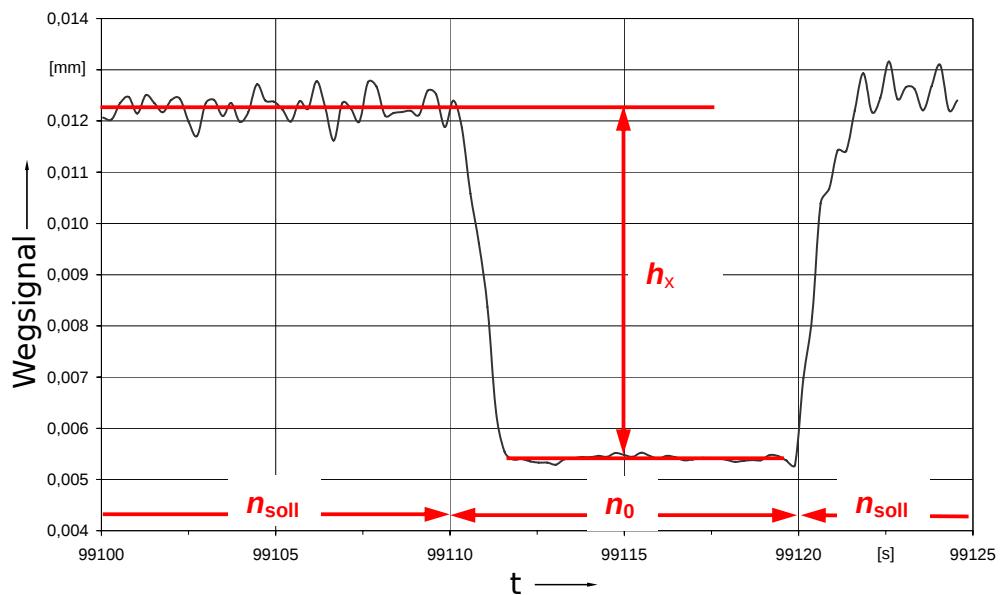
im Schmierspalt kann zum Messfehler verursachen, führte *Walbeck* die Messungen bei relativ geringen Kontaktpressungen (419 MPa bis 593 MPa) durch. Allerdings ist die Wärmeentwicklung durch Lagerreibung nicht vermeidbar und dadurch ist eine absolute Schmierfilmdickenmessung wegen Wärmedehnung in Bauteilen nicht möglich. Abhilfe zählt hier die Differenzmessung der Verschiebung zwischen Stillstand und Betriebsdrehzahl. Um die thermische Effekte auf die Messergebnisse gering zu halten, soll die Drehzahländerung innerhalb einer halben Sekunde dauern. Zusätzlich wurde die Wegmessungen von Winkelstellung der Welle getriggert, um der Fehler wegen Formtoleranzen der Lagerscheiben zu vermeiden.

Ein ähnliches System wurde von *Kuhlmann* [28] zur Schmierfilmdickenmessung in Schräkgugel- und Kegelrollenlagern eingesetzt. Wegen der Geometriedifferenz zwischen zwei Lagerbauarten und dem Axialzylinderrollenlager ist die axial Verschiebung in diesem Fall eine Funktion von dem Druckwinkel  $\alpha$ . Für das Kegelrollenlager muss zusätzlich den Kontakt zwischen Rollenstirnfläche und Innenringbord berücksichtigt werden.



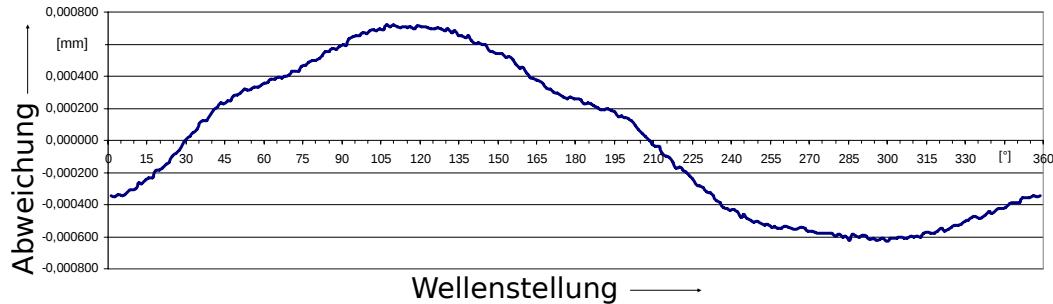
**Abbildung 3.10.:** Schmierfilme im Kegelrollenlager [28]

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 (Abbildung 3.11).



**Abbildung 3.11.:** Messung während eines Abbremsvorgangs [28]

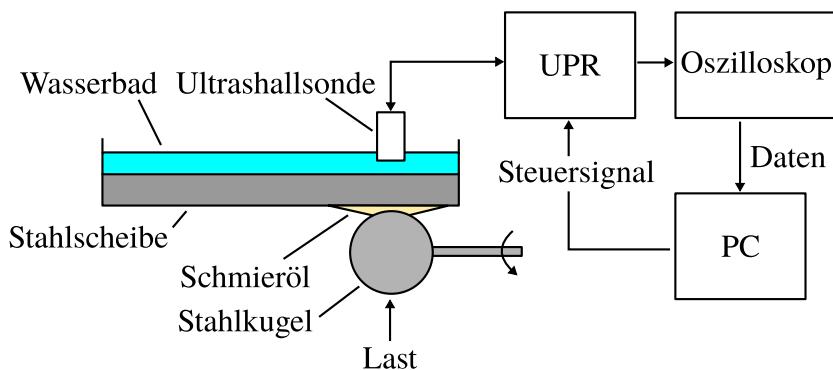
Anstatt von der Winkelstellung der Welle getriggert wurde vor jedem Versuch eine Kalibrierkurve der Wegsensoren, in die die gemittelten Planlaufabweichungen zwischen den Lagern und der Prüfwelle in Abhängigkeit mit der Wellenstellung dargestellt werden, bei der Drehzahl  $n_0$  aufgenommen (Abbildung 3.12). Bei der Auswertung der Schmierfilmdicke bei einer Betriebsdrehzahl findet eine Korrektur der gemessenen Verschiebung an der jeweiligen Wellenposition anhand der Kalibrierkurve statt.



**Abbildung 3.12.:** Kalibrierkurve [28]

### 3.3.2. Ultraschall

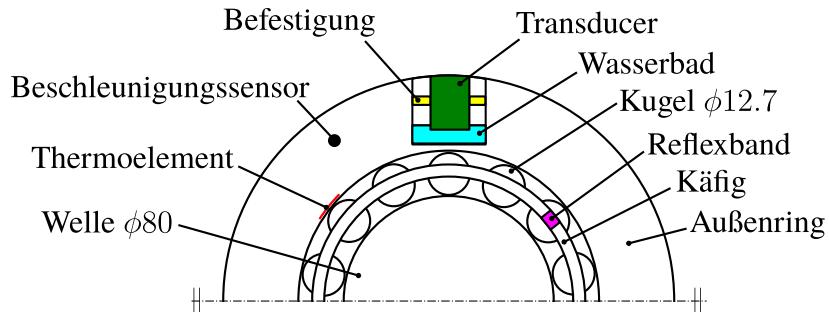
Dwyer-Joyce et al. [32] beschrieben ein neues Verfahren zur Dickenmessung einer zwischen einer Stahlkugel und einer Stahlscheibe liegende Flüssigkeitsschicht mittels der Reflektion des Ultrashalls. Diese Reflektion hängt von der Ultraschallfrequenz, den akustischen Eigenschaften der Flüssigkeit bzw. 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 Steifigkeit der Schicht bestimmt. Wenn die Wellenlänge ähnlich sowie die Schichtdicke ist, wird die Wechselwirkung vom Ultraschall mit der Flüssigkeit durch sein Resonanzverhalten gesteuert. Durch das Vergleich des Frequenzspektrums des reflektierten Impulses mit dem des gesendeten Impulses ermöglicht die Bestimmung der Schmierfilmdicke. 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 nehmen.



**Abbildung 3.13.:** Schematischer Aufbau der Ultraschall-Prüfstand [32]

Ein Schmierfilm-Überwachungssystem an einem Rillenkugellager mittels Ultraschall wurde von Zhang et al. in seine Arbeit [33] beschrieben (Abbildung 3.14). Eine Hochfrequenz-Ultraschallsonde ist am statischen Außenring des Lagers montiert. Die Sonde ist auf die Kugel-Laufbahn fokussiert und wird verwendet, um die Reflektion-Koeffizienten des Schmierstoffes in der Kontaktellipse wischen

Lagerkomponenten zu messen. Der Reflektion-Koeffizient kennzeichnet den Schmierfilm und kann daraus 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 gegeben, um das Versagen des Lagers zu initiieren. Diese Zugabe simuliert allgemeine Fehlermechanismen, die unter realen Bedingungen auftreten können. Alle Ergebnisse, wie zum Beispiel die Schwingung, die Temperatur, die Ultraschall-Reflektion-Koeffizienten wurden unter diesen drei Fehlerszenarien aufgenommen und die lieferten wertvolle diagnostische Informationen über die Fehler sowie Frühschadenmeldung.



**Abbildung 3.14.:** Schmierfilm-Überwachungssystem mittels Ultraschall [33]

### 3.3.3. Laserinduzierte Fluoreszenz

Jones *et al.* beschrieb in seiner Arbeit [34] die Kalibrierung einer Technik, die auf Basis der Laserinduzierten Fluoreszenz zur quantitativen Messungen 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 aufgebracht. Mit einem optischen Profilometer mittels Lasertriangulation wurden 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 zehnfach reduziert. Die Kalibrierung lieferte gute Ergebnisse, die in Übereinstimmung mit den aus Volumenmessung im Beschichtungsprozess geschätzten Filmdicken sind.



**Abbildung 3.15.:** Schematische Aufbau der Kalibrierung mit Profilometer (links) und deren Scan-Ergebnis (Dickenkarte) (rechts) [34]

## 4. Aufbau und Funktion des EHD-Messgeräts

Zur Schmierfilmdickenmessung wurde ein “EHL Ultra Thin Film Measurement System” der Firma PCS-Instrument genutzt (Abbildung 4.1). Es basiert auf dem Kugel-Scheibe-Modell und 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 [35]

### 4.1. PC und Elektronikeinheit

Zur Bedienung des Prüfstands steht einen 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 beim 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 temperiert werden. Der elastohydrodynamische Schmierfilm wird durch einen Kugel-Scheibe-Kontakt erzeugt.



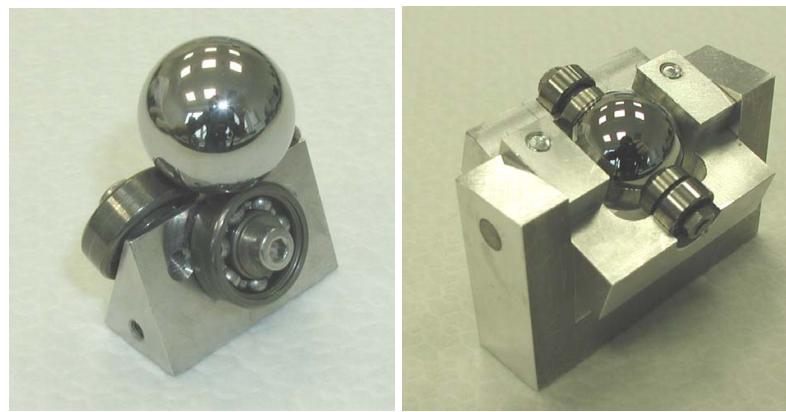
**Abbildung 4.2.:** Schematischer Aufbau des EHL-Prüfstands [35]

Die Kugel ist hochglanzpoliert, aus 100Cr6 Stahl und hat einen Durchmesser von 19,05 mm. Es gibt zwei Variationen der Kugel, normal und durchgebohrt. 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 sich einen maximalen Druck von 0,7 GPa im Kontaktspur. Die Glasscheibe hat einen Durchmesser von 100 mm und ist an der Unterseite mit einer durchlässigen Chromschicht und einer Silikatschicht zu versehen. Es gibt insgesamt 21 befahrbaren Spuren ( $R = 34 \rightarrow 44$  mm) auf der Scheibe durch die axiale Verschiebung des Kugel-Supports. 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, geführte Achse von Wittek [36] steht auch zur Verfügung (Abbildung 4.3).

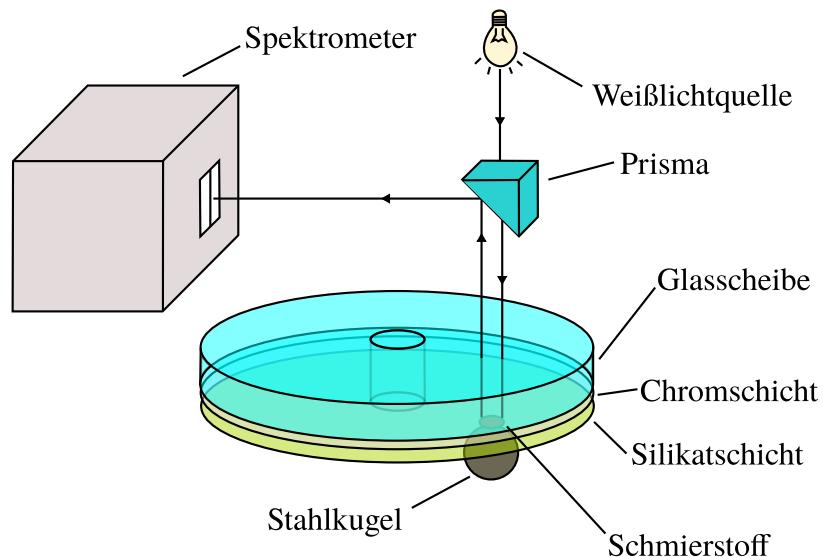
In Tabelle B.1 sind die Spezifikationen des Prüfstands von PCS zusammengefasst.



**Abbildung 4.3.:** Originaler PCS-Support (links) und modifizierter Support (rechts) [36]

### 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 das Glasscheibe beleuchtet und das zurück reflektierende Bild wird von einem Spektrometer bewertet. Die Messeinrichtung wird in Abbildung 4.4 angezeigt.

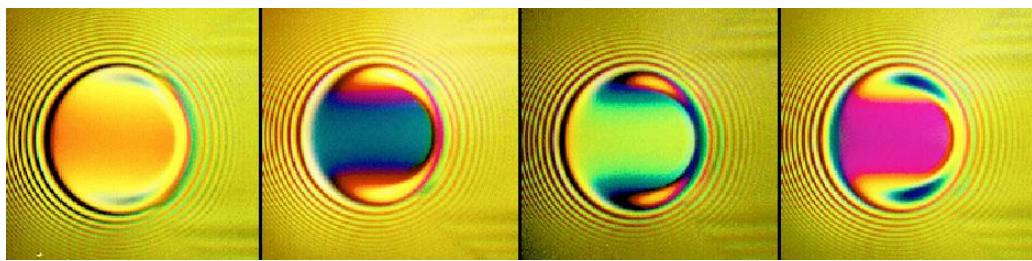


**Abbildung 4.4.:** Messprinzip des EHD-Prüfstand von PCS [37]

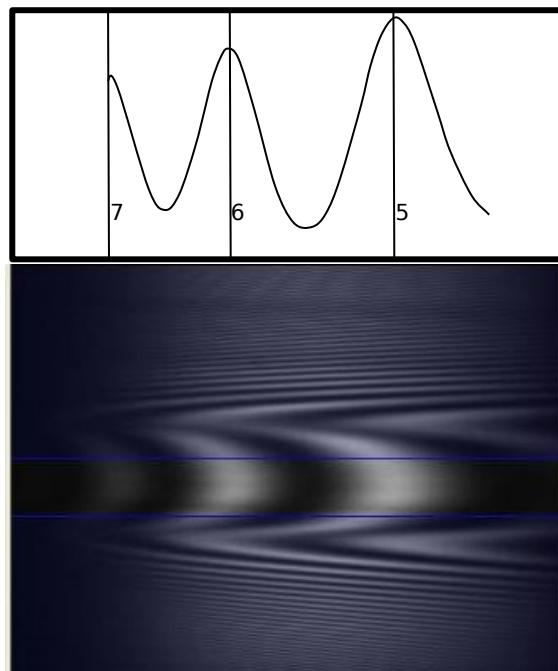
Die Glasscheibe hat nicht nur eine Chromschicht, sondern auch eine Silikatschicht (Spacer-Layer) darauf. Diese hat die Funktion wie ein Harter-Ölfilm, der immer da ist. Das heißt, dass es auch im Stillstand Interferenzen gibt. Interferenzmuster im Auge des Betrachters sind fabelhafte Bilder (Abbildung 4.5) und aus ihrer Farben kann die Schmierfilmdicke bei bekannter Silikatschichtdicke berechnet werden.

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

Der senkrechte, weiße Balken im Interferenzmuster sind die Maxima, wo die konstruktive Inter-



**Abbildung 4.5.:** Interferenzmuster eines Punktkontaktes bei zunehmenden Geschwindigkeiten [26]



**Abbildung 4.6.:** Interferenzmuster im Spektrometer [26]

ferenzen stattfinden und gibt dabei die Wellenlänge an. Wandern diese Balken nach rechts, nimmt die Wellenlänge bzw. Schmierfilmdicke zu. Mit Hilfe des Ultra-Softwarepakets kann man aus dem Interferenzmuster die genaue Schmierfilmdicke berechnet werden.

# 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 modular Messsystem auf Basis des EHD-Prüfstands von PCS entwickelt werden. Dies System soll die optische und elektrische (kapazitive) Messung gleichzeitig erlauben. Für solches System gibt es die folgende Anforderungen, die durch konstruktive Bearbeitung in nächsten Abschnitten gelöst werden.

- Elektrische Isolierung der Glasscheibe und der Kugel mit dem gesamten System.
- Elektrische Zugänge für die Messproben an der Scheibe und der Kugel.
- Beschichtung auf der Scheibe, die elektrische und optische Messung gleichzeitig erlaubt.

## 5.1. Konstruktion der Kugelführung

Da das modifizierte Kugelsupport mit einstellbarer Achse von *E. Wittek* [36] wegen Rundlaufabweichung nur bis Wälzgeschwindigkeit von c.a 0,7 m/s einsetzbar ist, wird die originale Kugelführung der PCS Firma im Rahmen dieser Arbeit modifizierte und weiter benutzt. Bei der standardmäßigen Kugelführung wird eine durchgebohrte Kugel in einem Adapter eingeklemmt, welche dann 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 mit den zu Signal übertragenden Kohlebürsten zu reduzieren. Die Abbildung 5.1 zeigt den Zusammenbau der neuen Kugelführung.

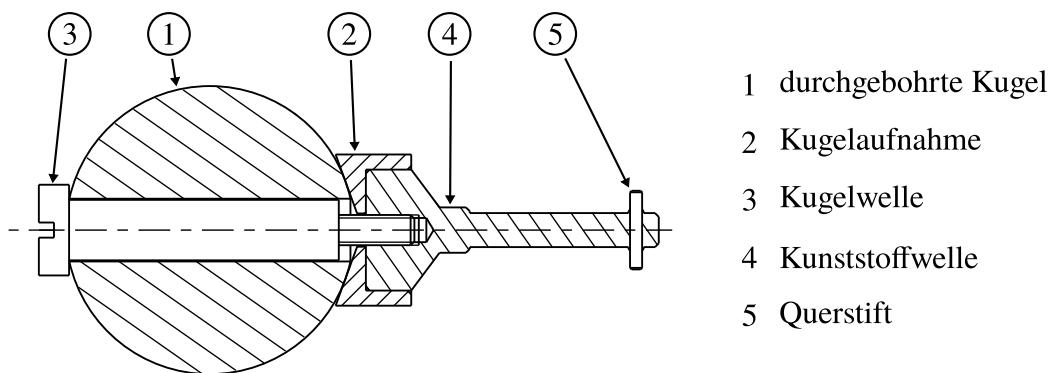


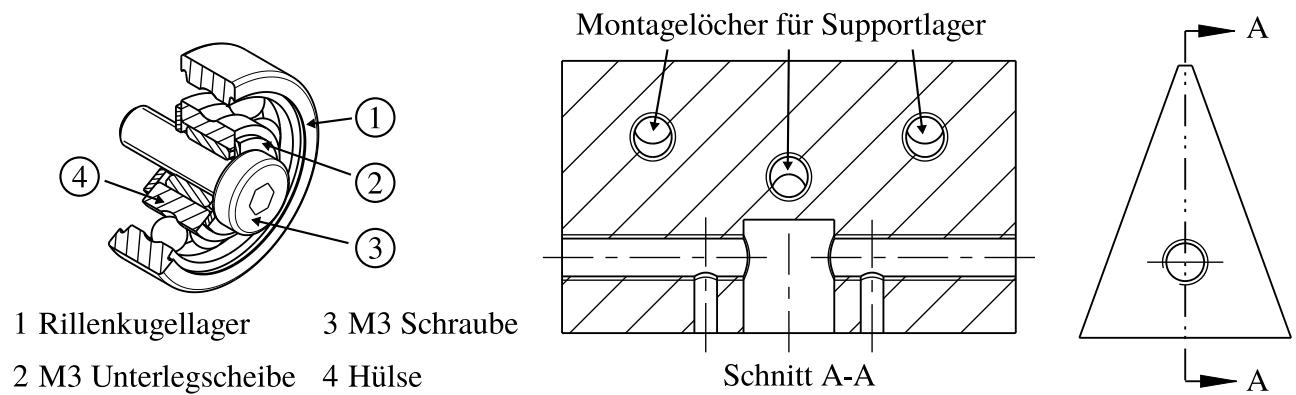
Abbildung 5.1.: Aufbau der neuen Kugelführung

Die geführte Kugelachse ermöglicht die Versuche mit Schlupf und verhindert auch das unkontrollierte Einbringen 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.

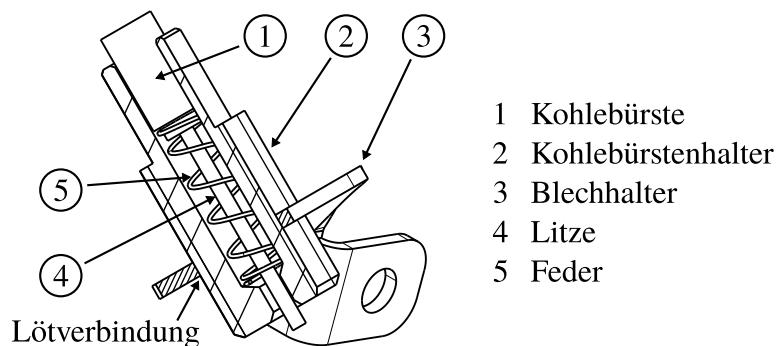
## 5.2. Konstruktion des Kugelsupports

Das neue Kugelsupport besteht aus drei Rillenkugellager, die durch drei M3 Schrauben auf einem dreieckigen Sockel befestigt werden (Abbildung 5.2). Die Kugel wird von den drei Lagern sicher von unten gegen der Glasscheibe gestützt. 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 den Stiften der Lasteinheit arretiert werden, dadurch wird die Position des Kugelsupports während Versuche sicher gestellt. 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, zu versehen. Bei der Versuchen mit Fett ist dort auch möglich, die Befettungsvorrichtung zu montieren.



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

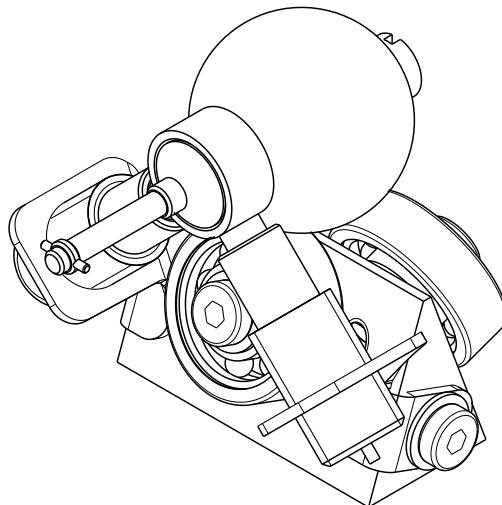
Der Kohlebürstenhalter ist aus Messing, hat eine zylindrische Form und wird mit einem Blechhalter, welcher an der Seite des Supports angeschraubt wird, gelötet. Die Kohlebürste Typ KK399 wurden von der Firma *Schmidthammer* gekauft. Dank dem hohen Kupferanteil (98 %) hat sie sehr geringen Kontaktwiderstand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



**Abbildung 5.3.:** Die Baugruppe des Kohlebürstenhalters

Um der elektrische Kontakt zwischen der Kugel und der Messprobe während der Versuche geringe

Störungen zu halten, sind zwei Kohlebürsten für die Kugel zu versehen. Abbildung 5.4 zeigt das komplette Supports mit der neuen Kugelführung.



**Abbildung 5.4.:** Zusammenbau des neuen Supports mit der Kugel

### 5.3. Die Glasscheibebebaugruppe

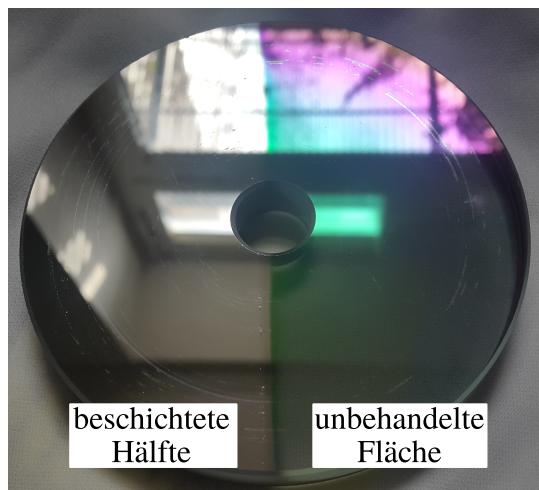
Um die elektrische Messung bei dem vorhandenen Prüfstand durchzuführen, müssen die folgende Maßnahmen gemacht werden:

- 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 monochrom Lichtquelle notwendig, es fehlt bei dem vorhandenen Prüfstand diesen Apparat. Nicht zuletzt ist das *Ultra-Softwarepaket* von PCS nicht in der Lage solche Messung durchzuführen bzw. auszuwerten. Letzten ist der Eigenwiderstand der Chromschicht wegen ihrer extrem dünnen Dicke sehr hoch (größer als  $1\text{ k}\Omega$ ). Das macht die optische und elektrische Messung bei der Chrom-Glasscheibe ungünstig.

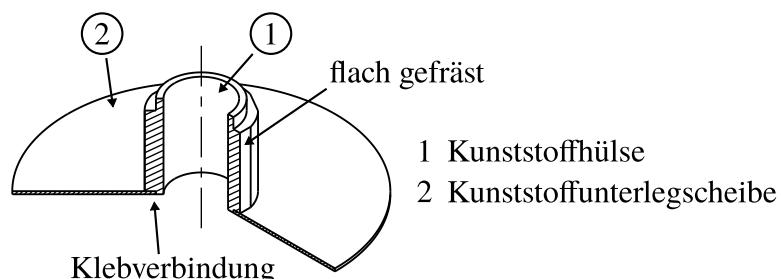
Eine andere Option ist die *Spacer-Layer-Scheibe* zu benutzen. Da die Silikatschicht nicht Strom leitend ist, wird die Hälfte der Scheibe mit einer dickeren Chromschicht (ca 300 nm) beschichtet (Abbildung 5.5). Durch die Erhöhung der Beschichtungsdicke wird der Eigenwiderstand reduziert. Ein paar Widerstandsmessung mit einem Multimeter lieferten den maximalen Wert von  $8\Omega$  und den minimalen Wert von  $2,4\Omega$ . Die unbehandelte Hälfte kann man wie normal mit der *Spacer-Layer-Methode* benutzen, um die Schmierfilmdicke zu bestimmen.

Der nächste Schritt ist die behandelte Glasscheibe mit dem gesamten Testsystem isolieren. Das erfolgt durch die Verwendung einer Kunststoff-Unterlegscheibe und einer Kunststoffhülse, die Unterseite der Scheibe mit der Welle des 1. Motors trennen (Abbildung 5.6) Beide Teile sind aus *Polypropylen*,



**Abbildung 5.5.:** Die neue Spacer-Layer-Glasscheibe mit sichtbarer beschichteten Hälfte

welcher bis 80 °C beständig ist und die Unterlegscheibe ist nur 0,5 mm dick. Da die Lasteinheit nicht nur in die horizontale sondern auch in die vertikale Richtung sich bewegen kann, ist diese minimale Höheänderung der Glasscheibe kein Problem. Die äußere Oberfläche der Hülse wurden an sechs Positionen flach gefräst. Die bilden sich 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 wurde mit der Hülse mit dem *Plastix* Klebe von Pattex geklebt, diese Verbindung ist gegen dem Wegrutschen der beiden Teilen während Betriebs zu sichern.



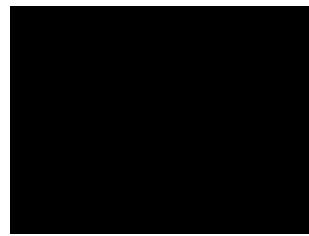
**Abbildung 5.6.:** Isolierung der Glasscheibe

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 der Oberkante der Hülse und einer Mitnehmerscheibe geklemmt und dadurch ist die elektrische Verbindung zwischen beiden Seite Scheibe hergestellt. Die von oben geschraubt Sicherungsmutter sichert die ganze Baugruppe fest. Die Abbildung 5.7 zeigt die ganze Baugruppe der Glasscheibe an.

Update image the glas disc assembly

## 5.4. Konstruktion des Deckels

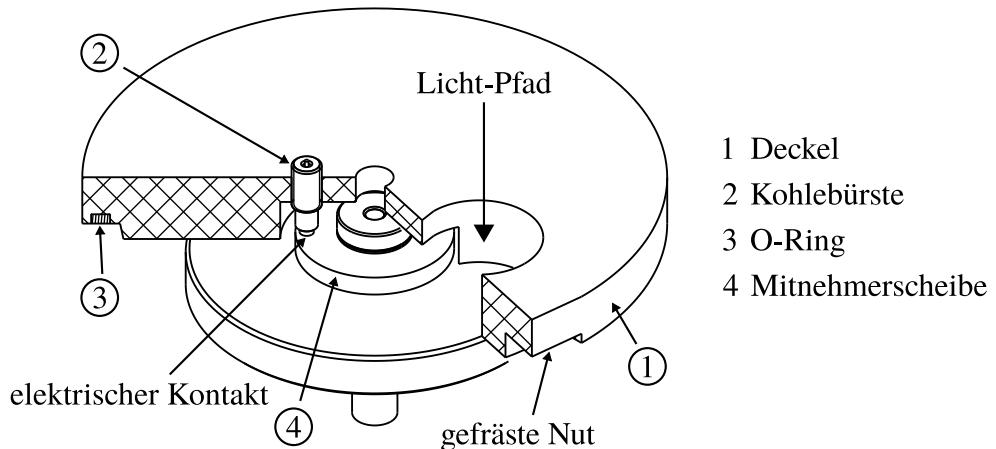
Der originale Deckel des EHD-Prüfstands von PCS hat zwei wichtige Aufgabe. Erste soll er das Spritzöl vom Ölreservoir auf der Oberseite der Glasscheibe und in die Linsen der Lichtquelle schützen. Zweite,



**Abbildung 5.7.:** Glasscheibe-Baugruppe

da es nur eine Öffnung für die Lichtquelle auf dem Deckel gibt, soll er die Störungen wegen Streulicht aus der Umgebung in den EHD-Kontakt bei der Messung reduzieren.

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



**Abbildung 5.8.:** Der neue Deckel mit der integrierten Kohlebüste

# 6. Versuche auf dem EHD-Messgerät

## 6.1. Versuchte Öle

Um die Funktionsfähigkeit des neuen Messsystems zu überprüfen, wird es mit verschiedenen Schmierstoffen getestet.

### Schmierstoff 1

- Firma
- Grund für das Öl
- Anwendungsbereiche
- technische Daten, kinematische Viskosität bei 40 und 100 Grad Celsius

### Schmierstoff 2

- Firma
- Grund für das Öl
- Anwendungsbereiche
- technische Daten, kinematische Viskosität bei 40 und 100 Grad Celsius

## 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, und einer Messkarte (Typ USB-6211) von der Firma National Instrument (NI).

Bei kapazitiver Messmethode wird der EHD-Kontakt als ein Kondensator ( $C_K$ ) betrachtet. Die Auflade des Kondensators erfolgt durch eine Ladespannung  $U_L$  (0,2 V bis 0,5 V) und einen Vorwiderstand  $R_V$  ( $1012,7\text{ k}\Omega$ ). Eine unendliche Erhöhung der Ladespannung ist aber unerwünscht, weil die zur Ionisierung des Schmierstoffes bei hohen Spannung verursacht und das kann die Messergebnisse

verfälschen. Abbildung 6.1 zeigt das Prinzip des mobilen Messsystems zur Schmierfilmdickenmessung bei IMKT an.

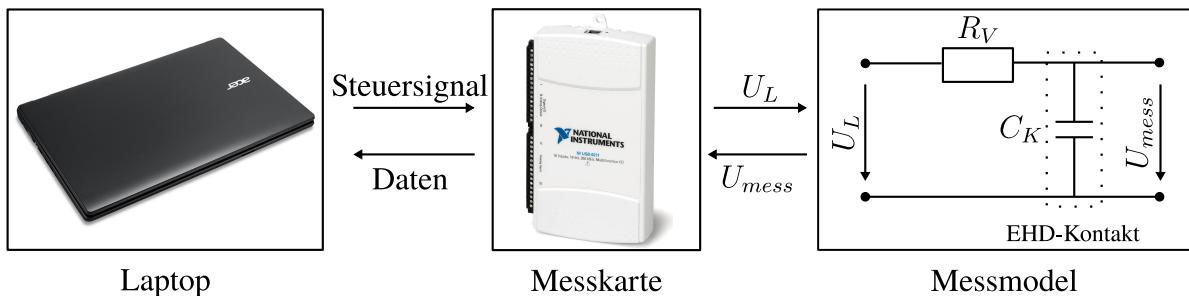


Abbildung 6.1.: Schematischer Aufbau des mobilen Messsystems

Das ganze Messsystem wird von der *Laderkurve-Software* gesteuert. Sie miss nicht direkt die Kapazität, sondern nimmt sie die Antwort bzw. Ladekurve des “Kondensators” auf, danach wird die Auswertung mit einem Matlab-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 gemacht. Abbildung 6.2 zeigt die Benutzeroberfläche der Ladekurve-Software bei einer Testmessung mit einem Referenz-Kondensator (3,3 nF) an.

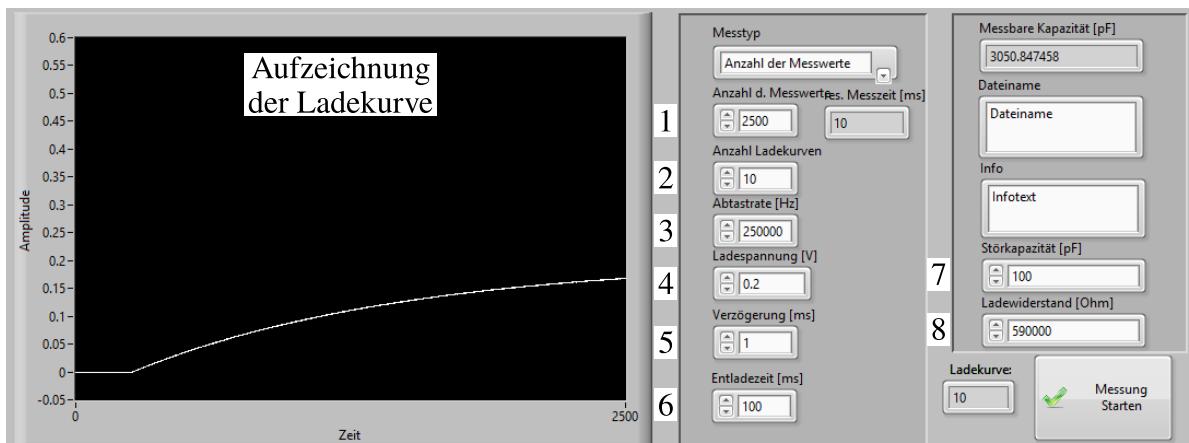


Abbildung 6.2.: Benutzeroberfläche der Laderkurve-Software

Die Software ist relative einfach zu bedienen, allerdings gibt es folgende Punkte, auf die man beachten muss.

- 1. Anzahl der Messwerte** ist die Auflösung der Messung. Zu niedriger Wert kann zum Messfehler führen und zu hohen Wert kann es schnell den Speicher voll machen, außerdem ist sie auch von der Abtastrate der Messkarte beschränkt. Der Standardwert ist 2500.
- 2. Anzahl der Ladekurven** ist die Anzahl der Messungen, die nach einander durchgeführt werden. ist die Anzahl der Messungen, die nach einander durchgeführt werden. Der Standardwert ist 10.
- 3. Abtastrate** ist die Anzahl der Messwerte, 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.
- 4. Ladespannung** ist die Spannung zwischen zwei Terminal des Kondensators. Der Wert sollte im Bereich von 0,2 V bis 0,5 V liegen.

5. **Verzögerung** ist die Wartezeit, die die Software warten muss, bevor sie eine Messung ausführt. Der Standardwert ist 1 ms.
6. **Entladezeit** ist die Zeit zwischen zwei Messungen. Sie ist notwendig, um der Kondensator komplett leer bevor jeder neuen Messung zu entladen. Der Standardwert ist 100 ms.
7. **Ladewiderstand** ist der Wert des Vorwiderstands. Er ist nur für den Dokumentationszweck und wird in der Messdatei geschrieben.
8. **Störkapazität** ist die externe Störung, wie zum Beispiel von Messkabel oder statische Kapazität zwischen Messkörpern. Dieser Wert wird für die spätere Auswertung verwendet.
9. **Austecken des Netzteils** ist notwendig, um die Störungen von anderen elektronischen Geräte 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 die innere chemische Prozesse oder eine Kombination von beiden zurückführen. Der Zusammenhang zwischen der Impedanz, der Frequenz und der Kapazität von einem mit Wechselstrom angelegten Kondensators wird in der Formel 6.1 [38] dargestellt.

$$Z_C = \frac{v_C(t)}{i_C(t)} = \frac{1}{j\omega C} \quad (6.1)$$

Im Gegenteil zum mobilen Ladekurve-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 6.3 zeigt den Aufbau des Messsystems mit dem LCR-Messgerät.

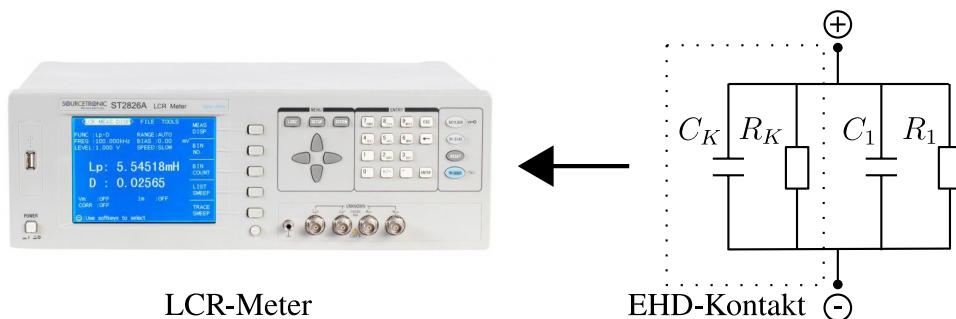
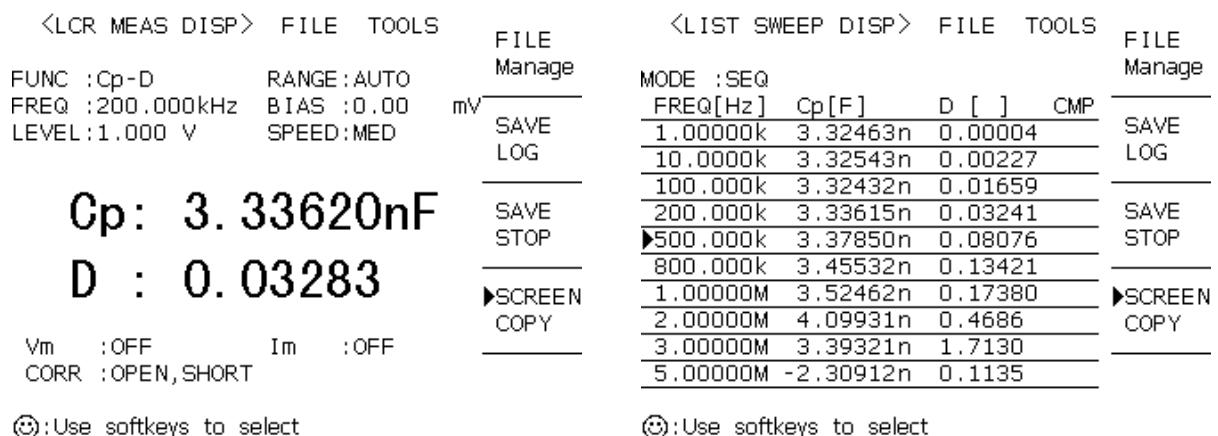


Abbildung 6.3.: Versuchsaufbau zur Kapazitätsmessung mit LCR-Meter

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  $C_1$  sind benötigt, um zu sehen, ob der Strom tatsächlich durch den EHD-Kontakt fließt oder in irgendeiner

Verbindung verloren geht. Unterschiedliche Werte für  $R_1$  und  $C_1$  wurden verwendet, um deren Einfluß auf die gemessene Kapazität zu untersuchen. Ein Erhöhung des Widerstandwertes 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 Experiment für weitere Messungen in dieser Arbeit gewählt. Abbildung 6.4 zeigt das Messergebnis beim Referenz-Kondensator ( $3,3 \text{ nF}$ ) mit dem LCR-Messgerät bei verschiedenen Frequenzen.



**Abbildung 6.4.:** Messergebnis eines Referenz-Kondensators mit dem LCR-Messgerät

Update the figure

### 6.3. Versuchdurchführung

Kapazitätsmessung der Messkette (Kabel -> Kugel, Scheibe) mit LCR-Meter

Hintergrund-Kapazitätsmessung, um die Störung von anderen elektronischen Geräten zu bestimmen.

Test parameters für das Ladekurve-System.

Test parameters für den LCR-Meter

Test parameters für den EHD-Prüfstand (Geschwindigkeit, Last, Temperatur). Berechnung der Pressung im Kontakt

Ziel des Versuchs?

- Korrelation zwischen optischer und kapazitiver Messmethode
- Einfluß von Temperatur, Geschwindigkeit und Schlupf auf die Messwerte

## **7. Versuchsergebnisse und Diskussion**

## **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 dieser Versuch möglich auszuführen? (konstruktive Bearbeitung)
- Versuchdurchführung
- Wie war die Messergebnisse?
- Was kann man bei dem System verbessern? Ist es möglich das System mit Öl zu verwenden?

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] Bartz W. J und Möller U. J. *Expert Praxis-Lexikon Tribologie Plus*. Expert Verlag, Renningen, 2000.
- [2] Marek Wisniewski. *Elastohydrodynamische Schmierung*, volume 1. Expert Verlag, 2000.
- [3] Viskosität. <https://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>. Zugriff: 2018-04-19.
- [4] R. F Crouch and A Cameron. Viscosity-temperature equations for lubrications. *Journal of the Institute of Petroleum*, 47:307–313, 1961.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Ramsey Gohar. *Elastohydrodynamics*. Imperial College Press, 1988.
- [8] M Schilling. Referenzöle für wälz- und gleitlager-, zahnrad- und kupplungsversuche : Datensammlung für mineralöle, 1985.
- [9] A Cameron. *Principles of Lubrication*, volume 1. Longman, 1966.
- [10] C. J. A. Roelands. *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils*. PhD thesis, Technische Hogeschool Delft, Netherlands, 1966.
- [11] P. S. Y Chu and A Cameron. Pressure-viscosity characteristic of lubricating oils. *Journal of the Institute of Petroleum*, 48:147–155, 1962.
- [12] D. Dowson and G. R. Higginson. *Elastohydrodynamic Lubrication*. Pergamon Press, 1966.
- [13] N Hirano, F. Kuwano and N Ohno. Oberservation of solidification of oils under high pressure, 1985.
- [14] R. Gohar. *Oil films under ehl conditions*. PhD thesis, University of London, 1966.
- [15] Reibung. <https://de.wikipedia.org/wiki/Reibung>. Zugriff: 2018-04-17.
- [16] Steinhilper W. und Sauer B. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [17] Ckw-freie produktion von kupferrohren. <https://www.ikz.de/ikz-archiv/1996/05/9605148.php>. Zugriff: 2018-03-07.

## 9. Literaturverzeichnis

- [18] Lexikon der kunststoffprüfung - polymer service gmbh merseburg. [https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/HERTZ%C2%B4sche\\_Pressung](https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/HERTZ%C2%B4sche_Pressung). Zugriff: 2018-01-24.
- [19] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. i - theoretical formulation. Technical report, Lewis research center, 1976.
- [20] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. ii - ellipticity parameter results. Technical report, Lewis research center, 1976.
- [21] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. iii - fully flooded results. Technical report, Lewis research center, 1977.
- [22] Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. iv - starvation results. Technical report, Lewis research center, 1977.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Ehd2 - ultra thin film measurement system. <http://pcs-instruments.com/wp-content/uploads/2014/03/EHD2-Brochure2017.pdf>. Zugriff: 2018-03-12.
- [27] M. J. Furey. Metallic contact and friction between sliding surface. *ASLE Transactions*, 4, 1961.
- [28] Jens Kuhlmann. *Tribologische Eigenschaften von Wälzlagerschmierfetten bei dauerhaft niedrigen Betriebstemperaturen*. PhD thesis, Leibniz Universität Hannover, 2009.
- [29] Matthias Barz. *Die Schmierfilmdilbung in fettgeschmierten schnelllaufenden Spindellagern*. PhD thesis, Leibniz Universität Hannover, 1996.
- [30] Peter Brüser. *Untersuchungen über die Elastohydrodynamische Schmierfilmdicke bei elliptischen Hertzschnen Kontaktflächen*. PhD thesis, Technische Universität Braunschweig, 1972.
- [31] Thomas Walbeck. *Das Viskositätsverhalten und die Schmierfilmbildung von Schmierstoffen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur*. PhD thesis, RWTH Aachen, 2004.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] PCS Instrument. *EHL Ultra Thin Film Measurement System - User Manual*, 1999.
- [36] Eike Christian Wittek. Untersuchung des einflusses von bohrschlupf auf die ausbildung das

## 9. Literaturverzeichnis

- schmierfilm in einem ehd-wälzkontakt. Technical report, Leibniz Universität Hannover, 2007.
- [37] Jan-Niklas Mach. Schmierfilmhöhenmessung mit einem ehl-schmierfilmhöhenmessgerät. Technical report, Leibniz Universität Hannover, 2008.
- [38] Electrical impedance. [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_impedance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance). Zugriff: 2018-04-11.
- [39] ESDU International Ltd. Film thickness in lubricated hertzian contacts (ehl). part 1, 1985.

# **Appendices**

## **A. Öldaten**

**Tabelle A.1.: Dynamische Viskosität und Druck-Viskositätskoeffizient der Ölen [39]**

MINERAL OILS	Nearest ISO VG	KVI	Dynamic viscosity, $\eta$ , measured at atmospheric pressure ( $10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ )			Pressure exponent, $\alpha$ ( $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ )		
			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, $\eta$ , measured at atmospheric pressure ( $10^{-3} \text{ N s m}^{-2}$ )			Pressure exponent, $\alpha$ ( $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ )		
	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. 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.

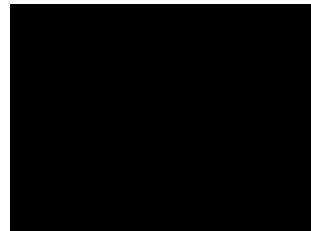
Press and hold down the preset button, the display will change to show 0,000. Continue to hold down the button until the second digit begins to flash and then release the button. Press and release the button repeatedly. The second digit should count up one each time the button is pressed. When the number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

image of the micrometer



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

### B.3. PCS EHD-Prüfstand Spezifikationen

**Tabelle B.1.: EHL-Prüfstand Spezifikationen [35]**

<b>Kugel</b>	
Material	Stahl (100Cr6)
Durchmesser	$\phi 19,05 \text{ mm}$
Rauheit Rq	$0,0235 \mu\text{m}$
<b>Glasscheibe</b>	
Material	Glas
Durchmesser	$\phi 100 \text{ mm}$
Rauheit Rq	$0,033 \mu\text{m}$
Spuren	21
Befahrbarer Radius	$34 \text{ mm} \rightarrow 44 \text{ mm}$
Beschichtung	Chrom, Silikat
<b>Motoren</b>	
Geschwindigkeit	$1 \text{ mm/s} \rightarrow 5 \text{ m/s}$
Geschwindigkeit Sprung	$0 \% \rightarrow 100 \%$
Schlupf (Kugel-Scheibe)	$0 \% \rightarrow 200 \%$
<b>Belastung</b>	
Last	$0 \text{ N} \rightarrow 50 \text{ N}$
max. Pressung	$1,1 \text{ GPa (Stahl); } 0,7 \text{ GPa (Glas)}$
<b>Ölreservoir</b>	
Volumen	120 ml
Temperierung	$T_{\text{Raum}} \rightarrow 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$
<b>Messsystem</b>	
Schmierfilmdicke	$0 \text{ nm} \rightarrow 1000 \text{ nm}$
Genauigkeit	$\pm 1 \text{ nm}$

## **C. Zeichnungen**