PolyBioFe: Entwicklung biobasierter Verdickersysteme zur Herstellung von Schmierfetten

Schmierstofftagung, 21.06.2023

Mohammad Vafaei
RWTH Aachen, MSE – Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung | RWTH AACHEN UNIVERSITY | tu technische universität dortmund | BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 Zusammenfassung

Folienübersicht

1 **Einleitung und Problemstellung**

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 Zusammenfassung

Einleitung und Motivation
Stand der Forschung und Problemstellung

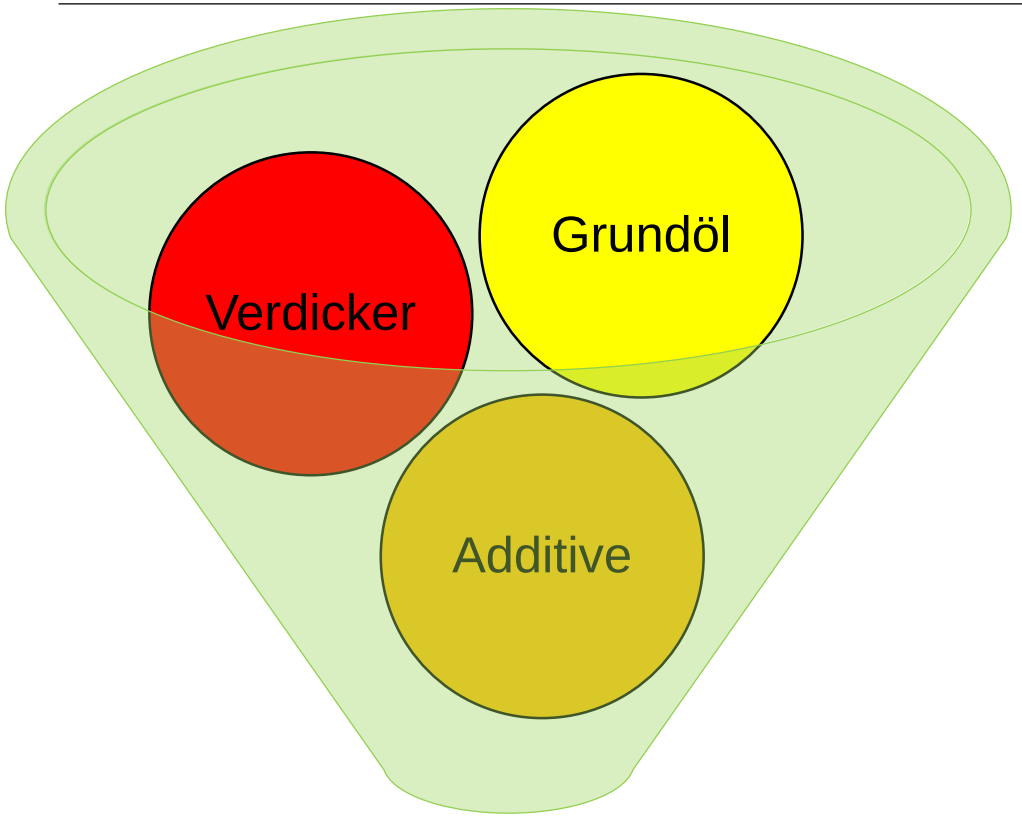
Aktuelle Situation

- Die negativen Einflüsse petrochemischen Materialien auf die Umwelt sind weitgehend bekannt
- Die Herstellung von Schmierstoffen auf der Basis nachwachsender Rohstoffe reduziert den Einsatz petrochemischer Materialien

Fettschmierung in Wälzlagern

- Etwa 90 % der Wälzlager werden mit Schmierfetten geschmiert, die aus petrochemischen Stoffen hergestellt werden
- Um ein vollständig biologisch abbaubares Schmierfett zu entwickeln, müssen das Grundöl und das Verdickungssystem zunächst aus erneuerbaren Materialien hergestellt werden
- Verfügbare biobasierte Fette mit nichtpolymeren Verdickern zeigen im Vergleich zu Fetten mit polymeren Verdickern ein schlechtes tribologisches Verhalten

Einleitung und Motivation
Stand der Forschung



Schmierfett

Marktübliche Schmierfette

Grundöl: 65 – 95%

Mineralöl:
- naphthenisches Öl
- paraffinisches Öl
- aromatisches Öl

Synthetisches Öl:
- Polyalphaolefine
- Organohalogene
- Cycloaliphaten
- Silikone
- Polyester
- Sila-KW

Verdicker: 3 – 30%

- Seifen
- PTFE
- Bentonite
- Silika
- Harnstoffe
- Polyharnstoffe

Additive: 0 – 10%

- Reibungsmodifizierer
- Anti-Verschleiß-Additiv
- Stockpunktverbesserer
- Viskositätsindexverbesser
- Antioxidationtien
- Reinigungsmittel
- Hochdruckadditiv
- Korrosionsinhibitor
- Antioxidationtien
- Antischaummittel
- Dispergiermittel

Zielschmierfette

Biobasierte Basisöle:

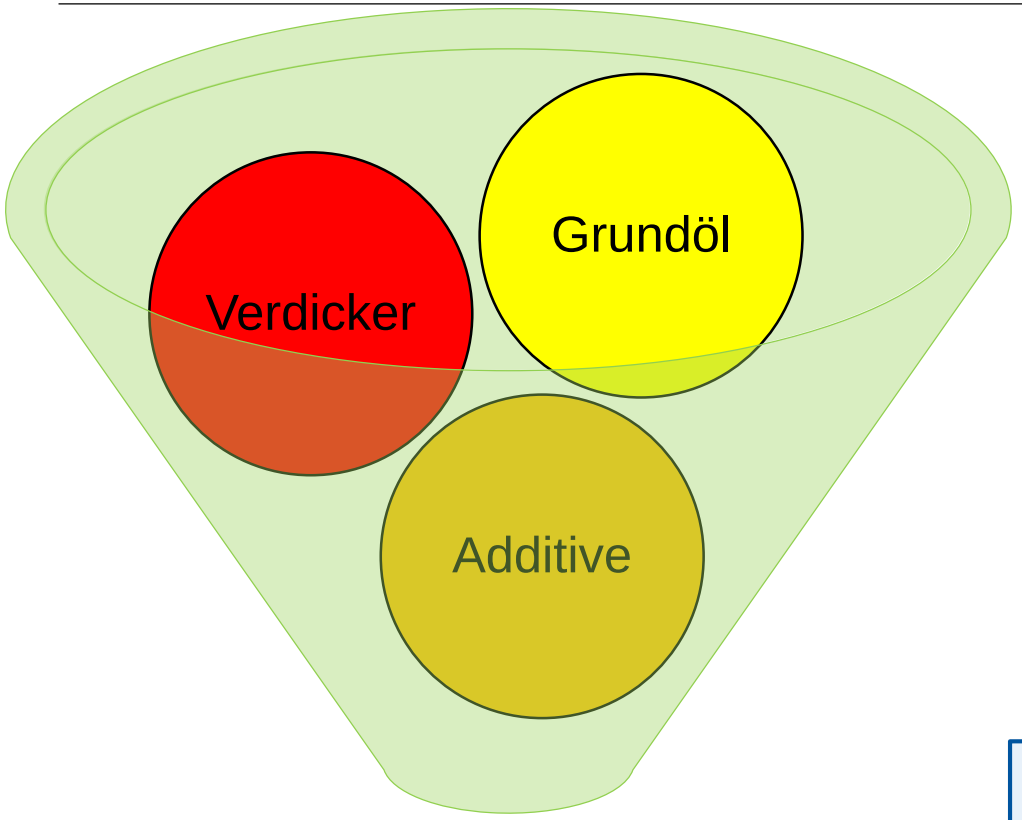
- Rapsöl
- Olivenöl
- Sojabohnenöl
- Sonnenblumenöl
- Rizinusöl

Biobasierte Verdicker:

- Polyharnstoffe
- Polyester
- Polyamide

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung
RWTH AACHEN UNIVERSITY
technische universität dortmund
BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Einleitung und Motivation
Stand der Forschung



Schmierfett

Marktübliche Schmierfette

Grundöl: 65 – 95%

Mineralöl:
- naphthenisches Öl
- paraffinisches Öl
- aromatisches Öl

Synthetisches Öl:
- Polyalphaolefine
- Organohalogene
- Cycloaliphaten
- Silikone
- Polyester
- Sila-KW

Verdicker: 3 – 30%

- Seifen
- PTFE
- Bentonite
- Silika
- Harnstoffe
- Polyharnstoffe

Zielschmierfette

Biobasierte Basisöle:

- Rapsöl
- Olivenöl
- Sojabohnenöl
- Sonnenblumenöl
- Rizinusöl

Biobasierte Verdicker:

- Polyharnstoffe
- Polyester
- Polyamide

Ziele:

- Herstellung biobasierter Verdickersysteme für Schmierfette
- Untersuchung der tribologischer Leistung von biobasierten Schmierfetten mit unterschiedlichen Verdickertypen

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung
RWTH AACHEN UNIVERSITY
tu technische universität dortmund
BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 **Arbeitspakete und Zusammenarbeit**

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 Zusammenfassung

Projektübersicht
Zusammenarbeit

Randbedingung
- Entwicklung eines kompletten biobasierten Fettes mit Grundöl und Verdickersystem, das mit klassischen petrochemischen Fetten vergleichbar ist
- Entwicklung und Synthese stabiler biobasierter Polymer-Verdickersysteme

AK Weberskirch TU Dortmund
- Entwicklung und Produktion von stabilen biobasierten Verdickersystemen
- Rheologische Tests an Fetten und Nachweis der Stabilität

Carl Bechem GmbH
- Schmierstoffcharakterisierung mit Tests am Fette in größere Menge
- Chemische Eigenschaften
- Fettherstellung in größere Menge

MSE RWTH Aachen
- Tribologische Untersuchungen an den biobasierten Fetten, wie z. B. Schmierfilmdicken- und Reibungsmessungen mit dem Kugel-Scheibe-Tribometer

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 Zusammenfassung

Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme
Schmierfettentwicklung an der TU Dortmund

Zirkulationsapparat für die Herstellung von Polyester in einem Quasi-In-Situ-Polymerisationsverfahren

Polyharnstoff

Formulierung des Fetts	NLGI Klasse
PDI-BAMF	2
PDI-MDA	2
PDI-PDA	2

Polyester

Formulierung des Fetts	NLGI Klasse
DDS-BD	4
DDS-PrD	4
BS-BD	3

Polyamide

Formulierung des Fetts	NLGI klasse
AS-MDA	3
DCF-BAMF	3

Apparat zur Herstellung von Polyamiden in einer Polykondensationsreaktion

- 8 Schmierfette mit 3 verschiedenen Verdickersystemen wurden für tribologische Untersuchungen hergestellt

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung
RWTH AACHEN UNIVERSITY
tu technische universität dortmund
BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme
Schmierfettentwicklung an der TU Dortmund

Zirkulationsapparat für die Herstellung von Polyester in einem Quasi-In-Situ-Polymerisationsverfahren

Polyharnstoff

Formulierung des Fetts	LGI asse
PDI-BAMF	4
PDI-MDA	4
PDI-PDA	3

Pol

- 8 Schmie für tribolo

wurden

technische universität dortmund

fakultät für chemie und chemische biologie

Biobasierte, polymere Verdickersysteme zur Herstellung von Schmierfetten für Hochtemperatur- und *Fill-For-Life*-Anwendungen

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

Technische Universität Dortmund
Fakultät für Chemie und Chemische Biologie
Arbeitsgruppe Polymere Hybridsysteme

Vorgelegt von
Max Jopen
aus Mönchengladbach

Dortmund, 2022

Apparat zur Herstellung von Polyamiden in einer Polykondensationsreaktion

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung | RWTH AACHEN UNIVERSITY | technische universität dortmund | BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

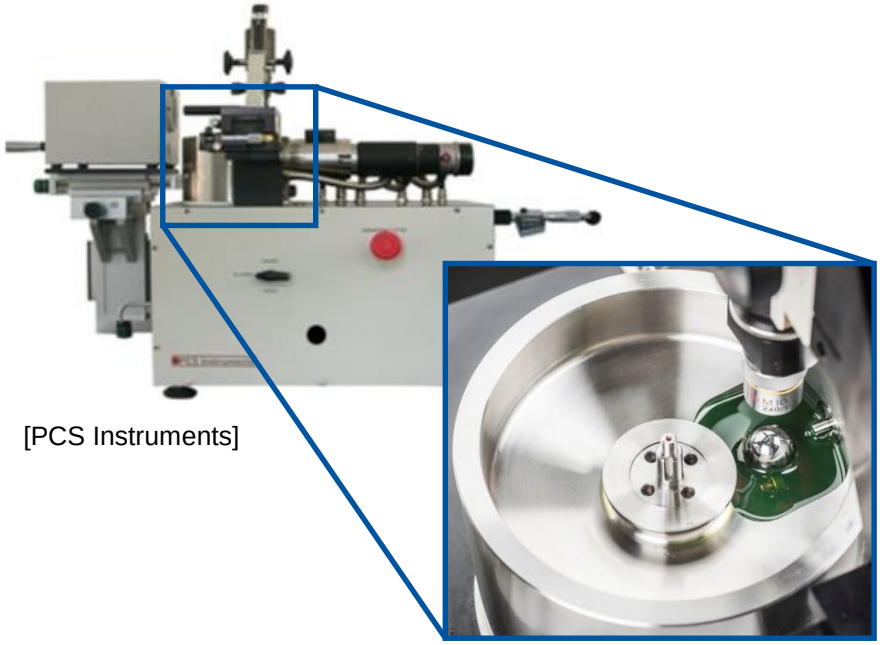
3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

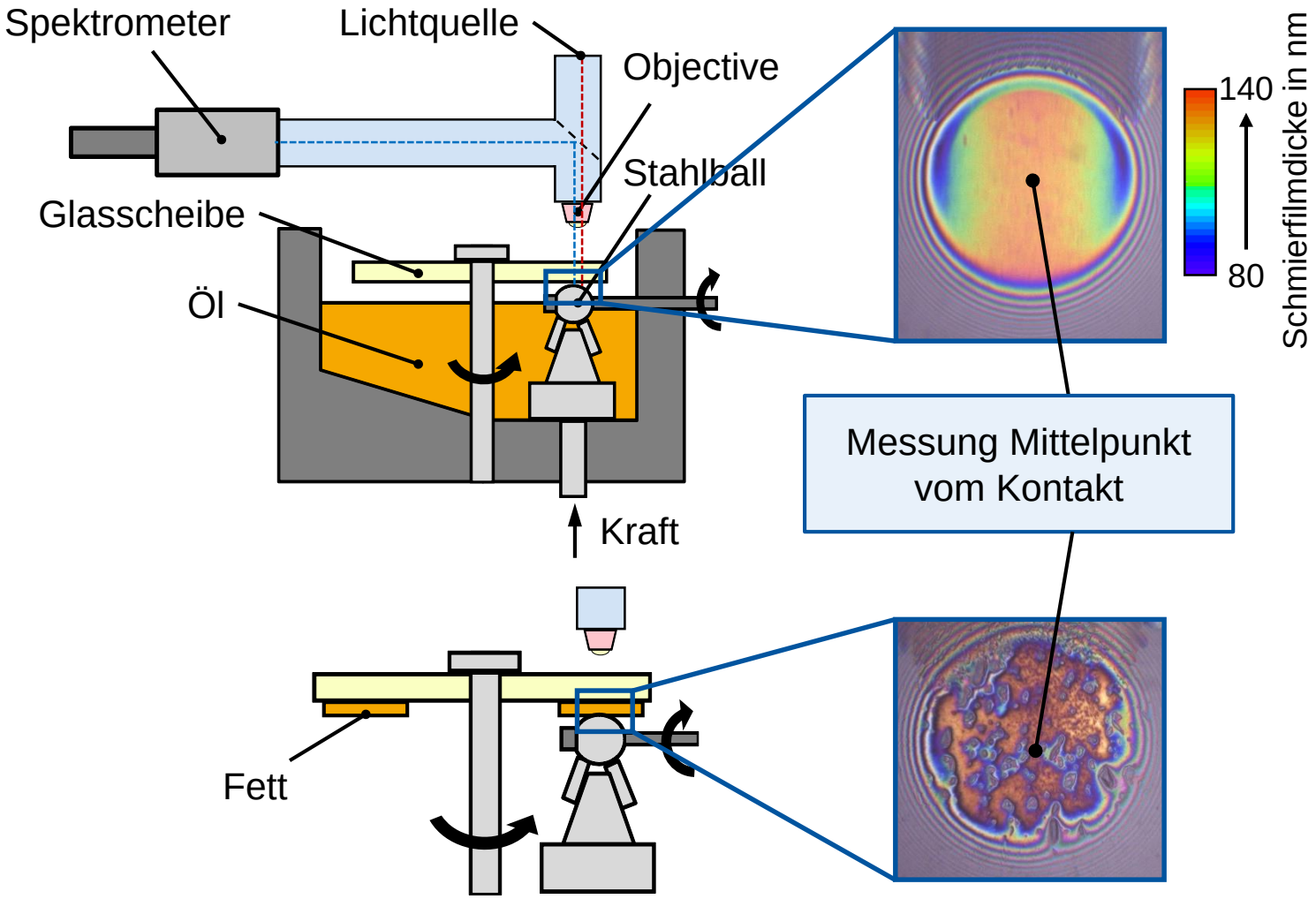
- **4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer**
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 Zusammenfassung

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen auf Kugel-Scheiben-Tribometern
Schmierfilmdickenmessung

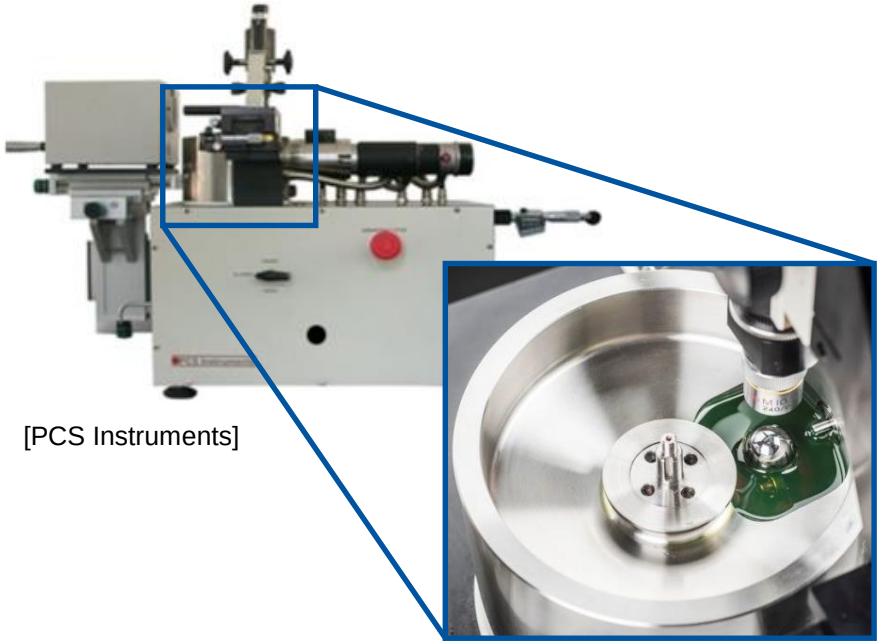


[PCS Instruments]

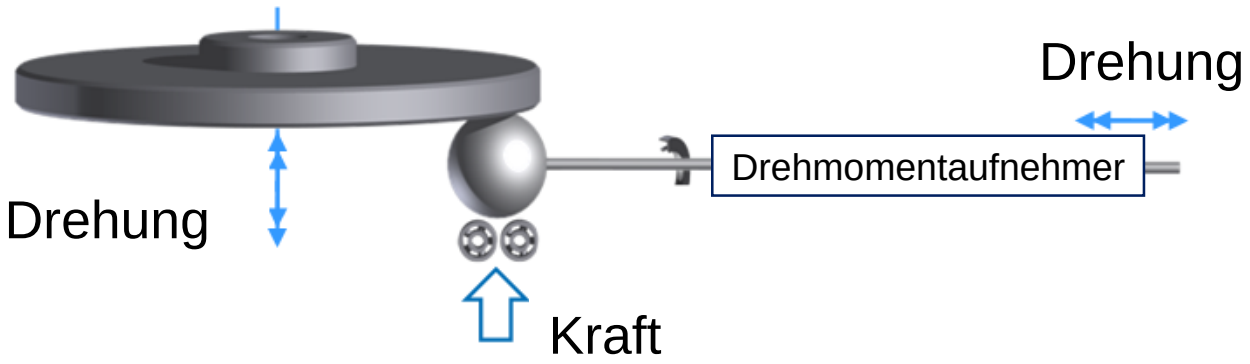


Druck	180 bis 1100 MPa
Temperatur	-15 bis 150 °C
Rollgeschwindigkeit	1 bis 4000 mm/s
Slide-Roll-Ratio (SRR)	0 bis 200 %

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen auf Kugel-Scheiben-Tribometern
Reibungsmessung



[PCS Instruments]



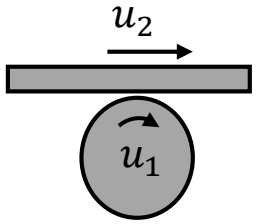
Druck	180 bis 1100 MPa
Temperatur	-15 bis 150 °C
Rollgeschwindigkeit	1 bis 4000 mm/s
Slide-Roll-Ratio (SRR)	0 bis 200 %

- Reibungstest werden mit Stahlkugel und Scheibe durchgeführt
- Rollgeschwindigkeit steigt während der Messung

$$u_{Roll} = \frac{(u_1 + u_2)}{2}$$

- Gleiteffekte werden durch das Slide-Roll-Ratio (SRR) eingestellt und es ist während der Messungen konstant

$$SRR = \frac{u_{sliding}}{u_{rolling}} = 2\left|\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2}\right| \cdot 100\%$$

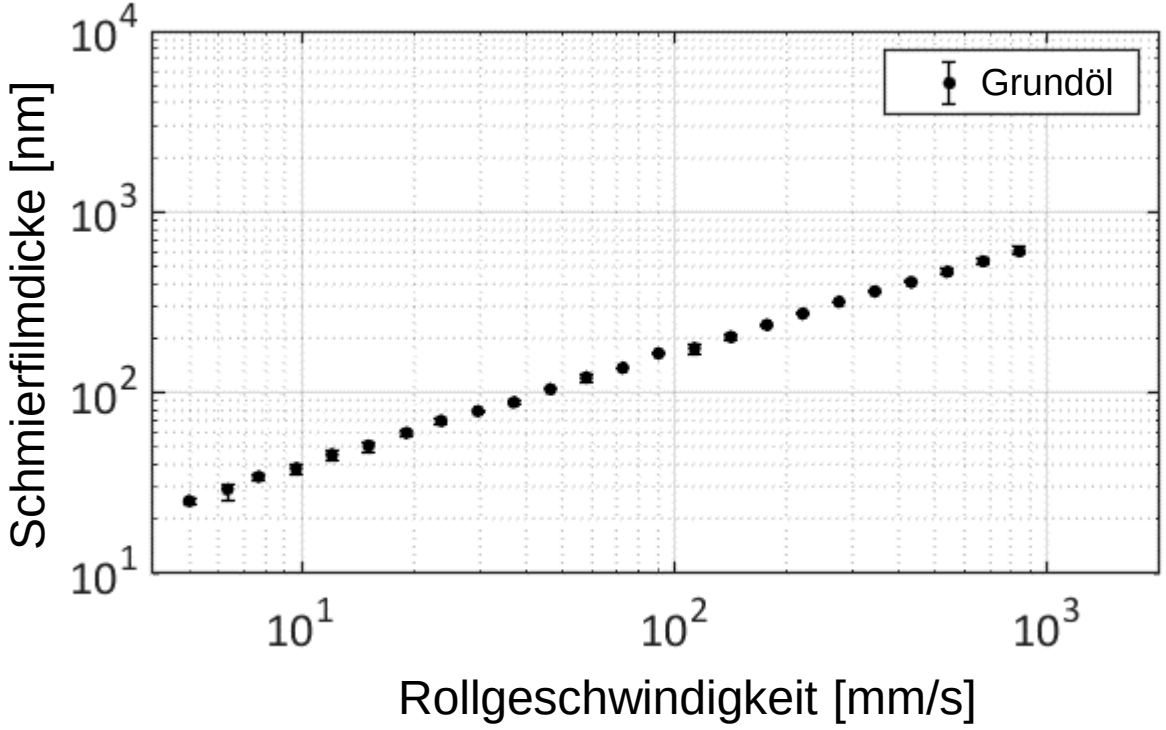


- $u_1 = u_2$
  Rolling, SRR =0
- $u_1 \neq u_2$
  Relative Geschwindigkeit , 0<SRR<200%
- $u_1 \; or \; u_2 = 0$
  Sliding, SRR=200%

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

Schmierfilmdicke und Auftreten von Starvation im EHD-Kontakt

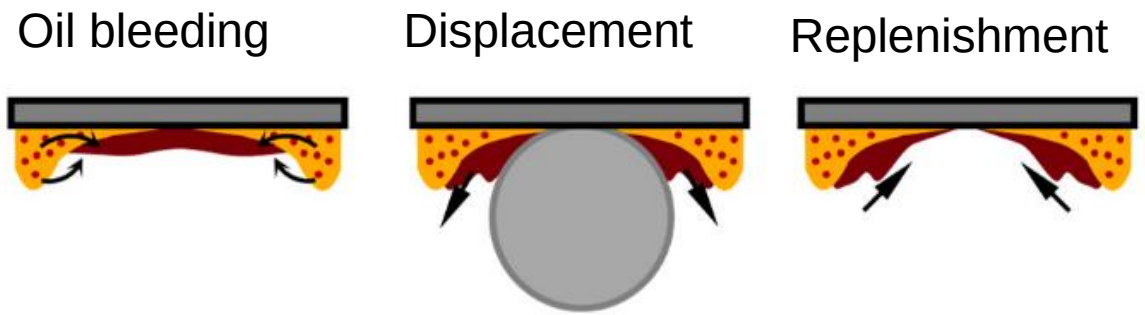
Schmierstoffeigenschaften	
Schmierfett	-
Verdicker	-
Gründöl	Rizinusöl
Viskosität (40 °C)	240 mm²/s
Betriebsbedingung	
Temperatur	40 °C
Druck	700 MPa



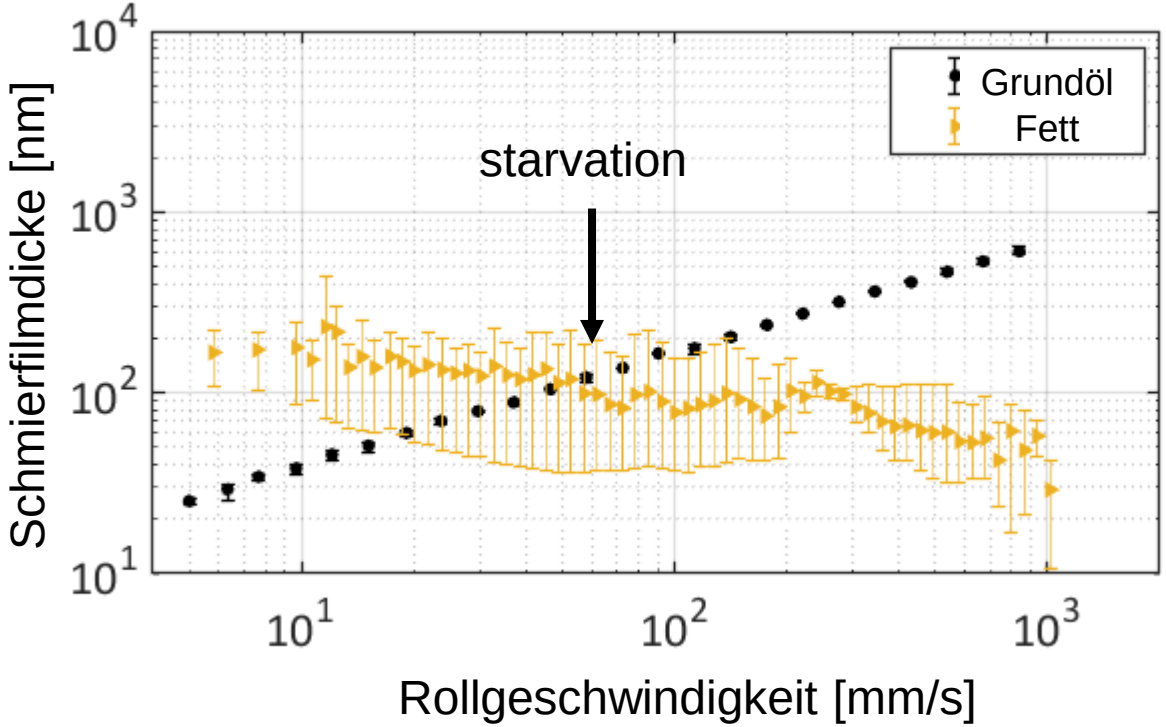
Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

Schmierfilmdicke und Auftreten von Starvation im EHD-Kontakt

Schmierstoffeigenschaften	
Schmierfett	DDS-Bd
Verdicker	Polyester
Gründöl	Rizinusöl
Viskosität (40 °C)	240 mm²/s
Betriebsbedingung	
Temperatur	40 °C
Druck	700 MPa

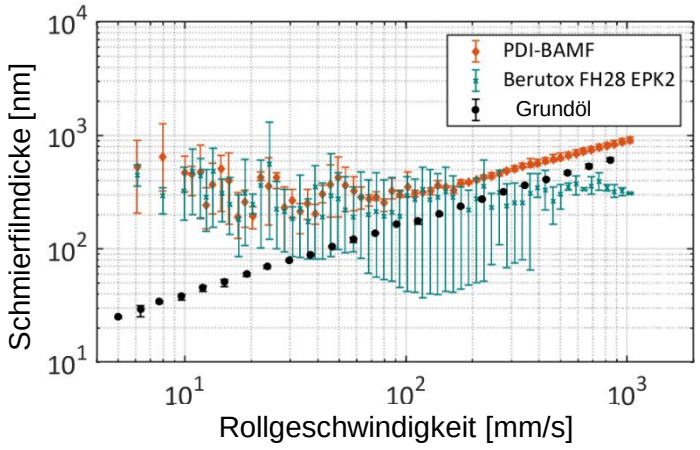
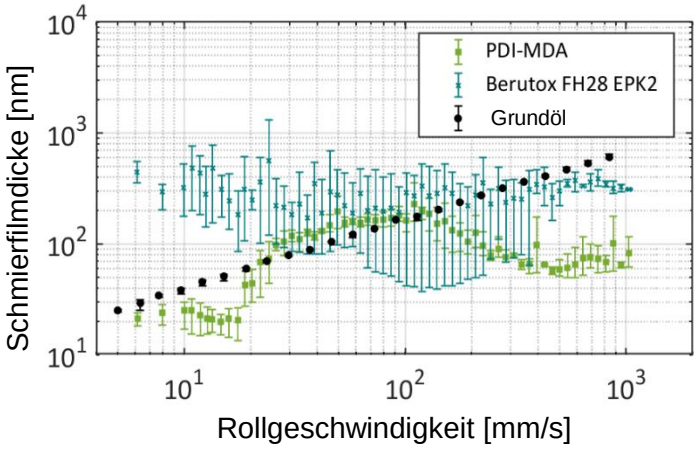
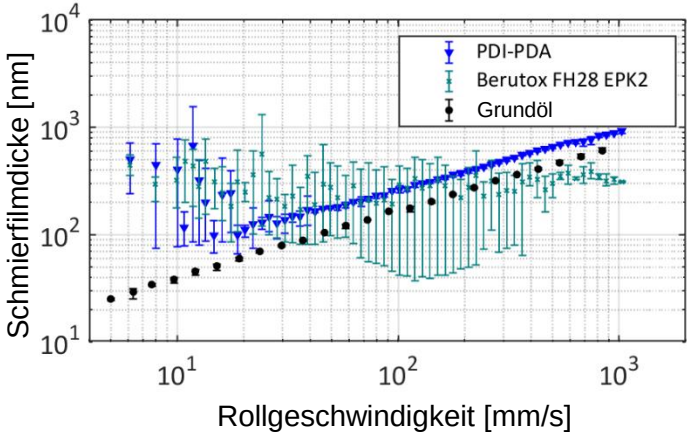
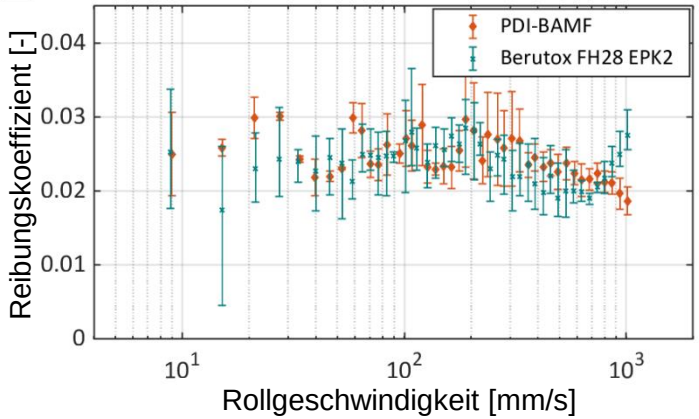
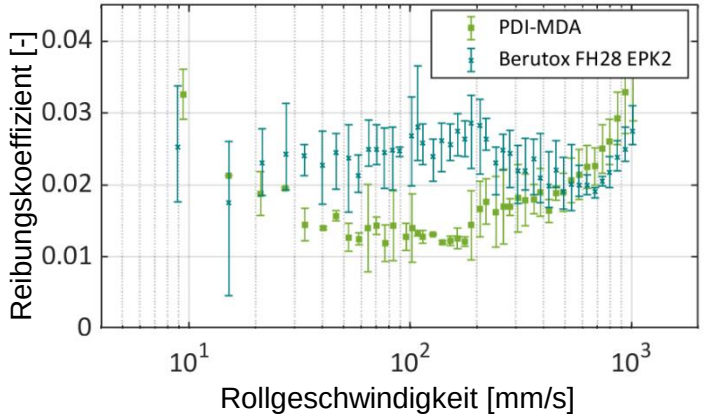
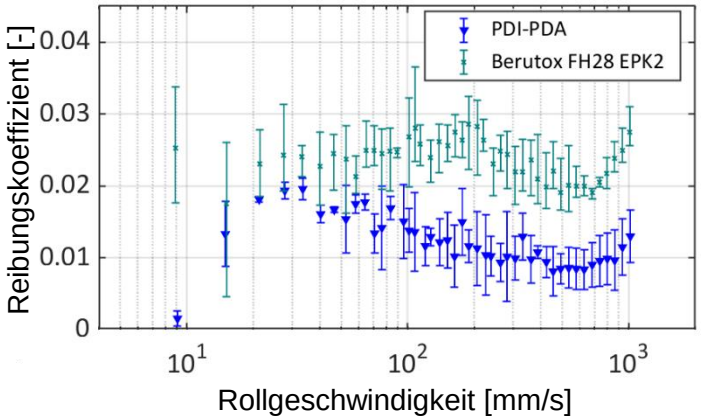


Feed and loss mechanisms [Fischer18]



Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

Schmierfilmdicke und Reibungsmessung im EHD-Kontakt (Polyharnstoffe)

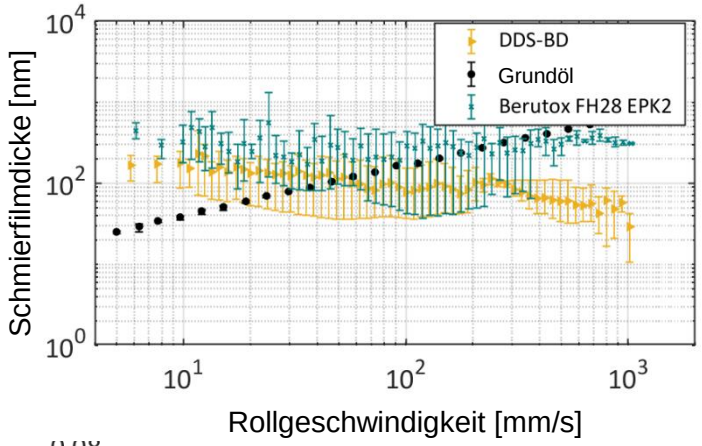
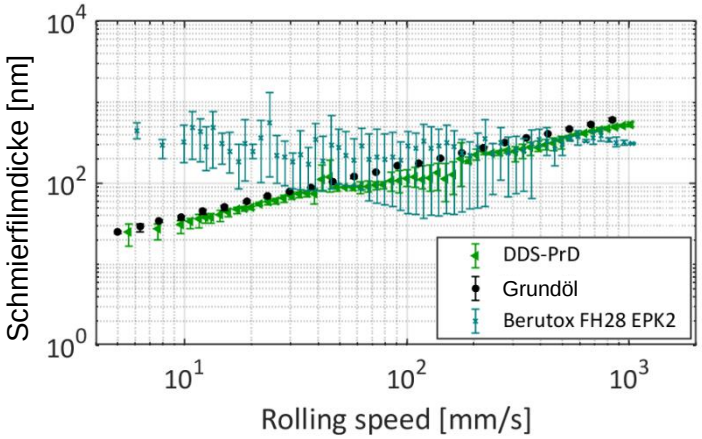
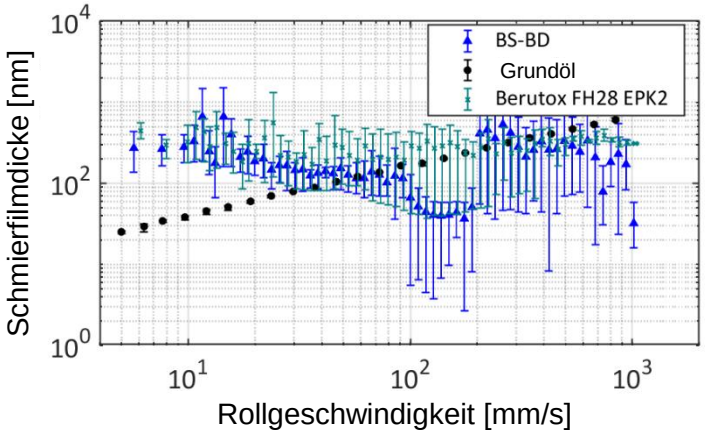
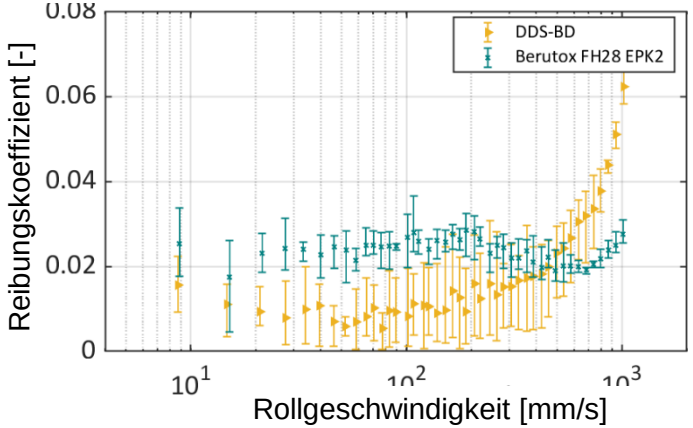
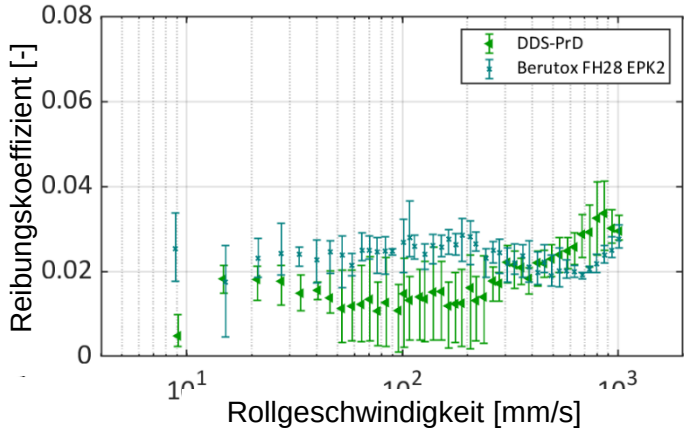
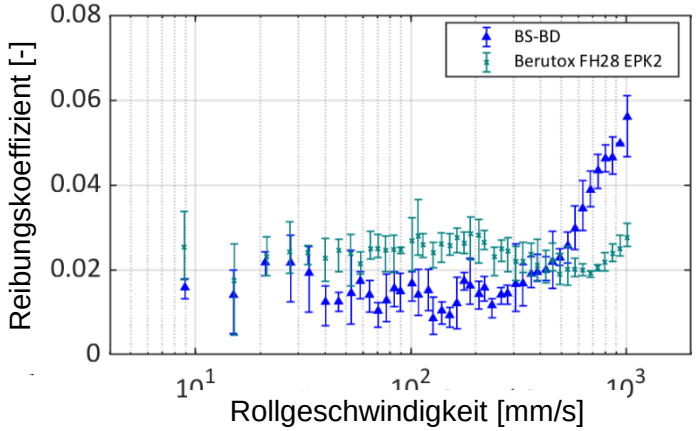
	Bio-basierte Polyharnstoff 1	Bio-basierte Polyharnstoff 2	Bio-basierte Polyharnstoff 3
Schmierfilmdicke			
Reibung			

➢ PDI-PDA kann als das am besten geeignete Fett unter den Polyharnstoffproben ausgewählt werden

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung | RWTH AACHEN UNIVERSITY | tu technische universität dortmund | BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

Schmierfilmdicke und Reibungsmessung im EHD-Kontakt (Polyester)

	Bio-basierte Polyester 1	Bio-basierte Polyester 2	Bio-basierte Polyester 3
Schmierfilmdicke			
Reibung			

➢ DDS-PrD kann als das am besten geeignete Fett unter den Polyesterproben ausgewählt werden

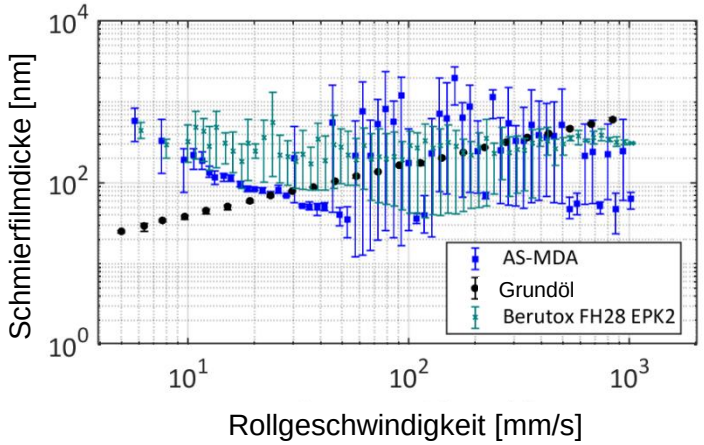
MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung | RWTH AACHEN UNIVERSITY | tu technische universität dortmund | BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

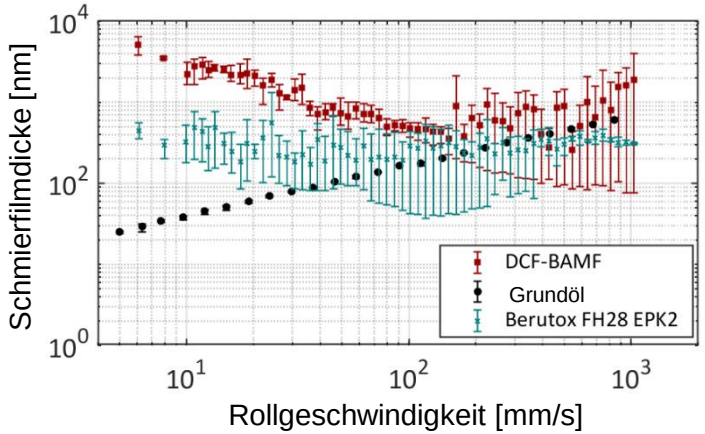
Schmierfilmdicke und Reibungsmessung im EHD-Kontakt (Polyamide)

Schmierfilmdicke

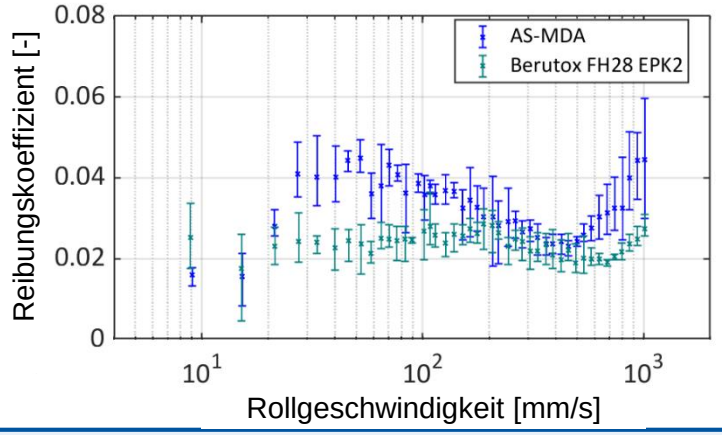
Bio-basierte Polyamide 1

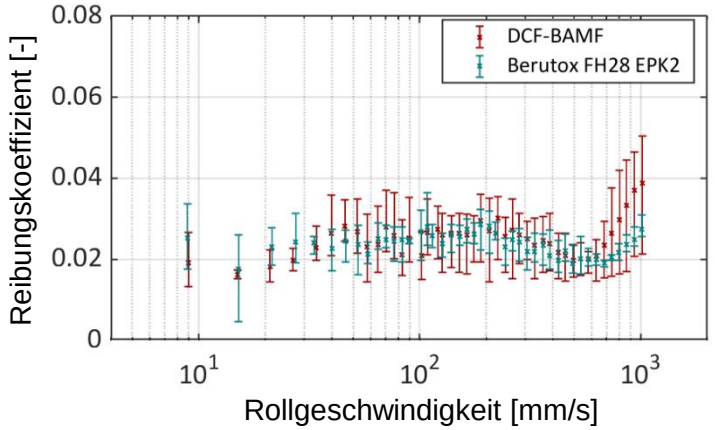


Bio-basierte Polyamide 2



Reibung

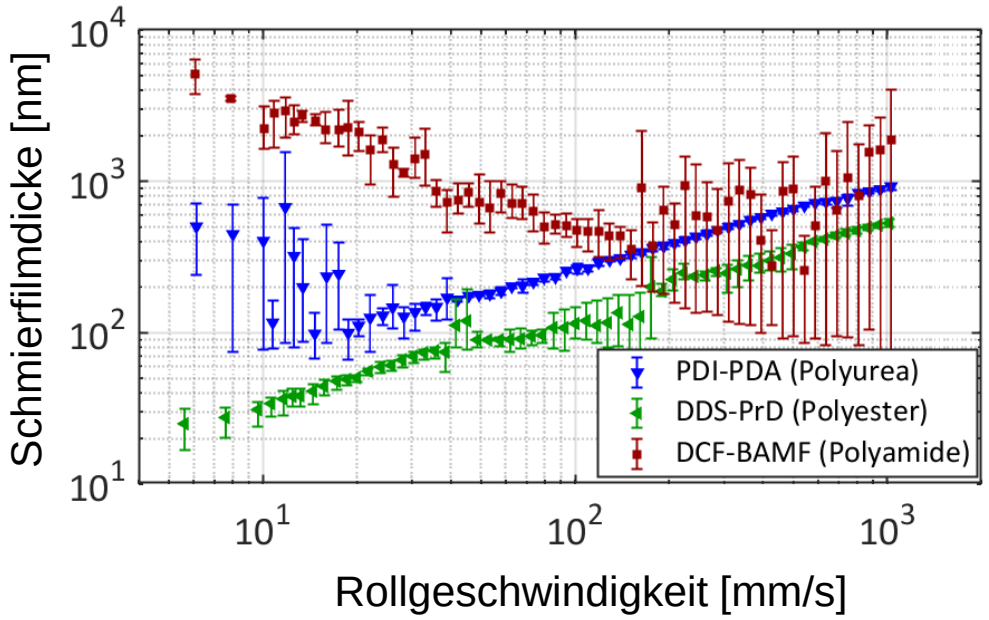




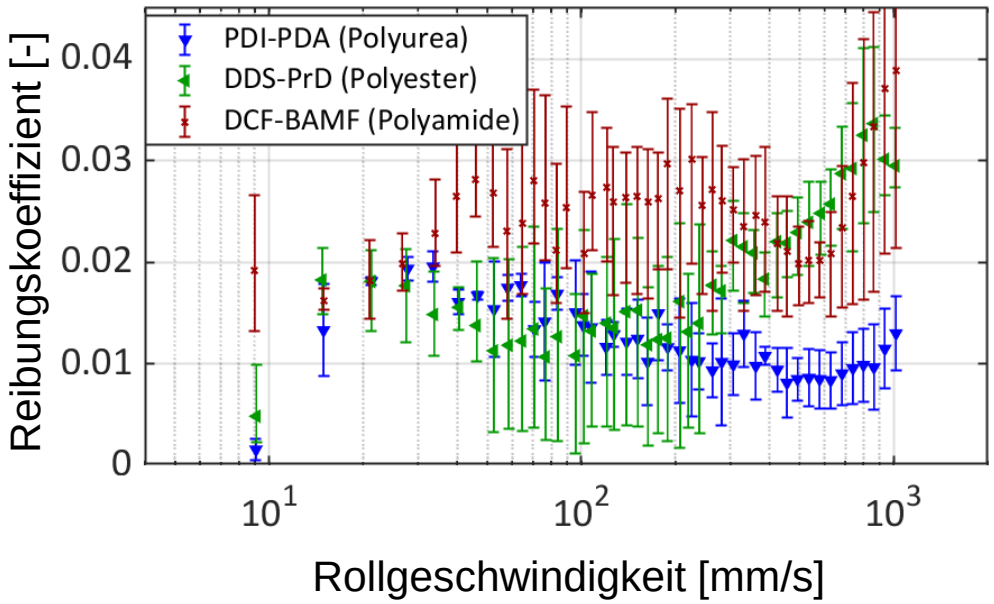
➢ DCF-BAMF kann als das am besten geeignete Fett unter den Polyamidproben ausgewählt werden

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

Vergleich von Polyharnstoff-, Polyester- und Polyamidfetten



Schmierfilmdicke



Reibung

- Die Schmierfilmdicke von Polyamidfett ist höher als die von Polyharnstoff- und Polyesterfetten
- Höherer Reibungskoeffizient des Polyamidfetts im Vergleich zu Polyharnstoff und Polyester
- Instabiles Verhalten von Polyamiden aufgrund von Kristallisationen

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

Vergleich von Polyharnstoff-, Polyester- und Polyamidfetten

- Biobasierte Polyharnstofffette **PDI-BAMF** und **PDI-MDA** sind für weitere Qualifizierungstests ausgewählt und durch Carl Bechem Firma hoch skaliert

Rollgeschwindigkeit [mm/s]

Schmierfilmdicke | **Reibung**

- Die Schmierfilmdicke von Polyamidfett ist höher als die von Polyharnstoff- und Polyesterfetten
- Höherer Reibungskoeffizient des Polyamidfetts im Vergleich zu Polyharnstoff und Polyester
- Instabiles Verhalten von Polyamiden aufgrund von Kristallisationen

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

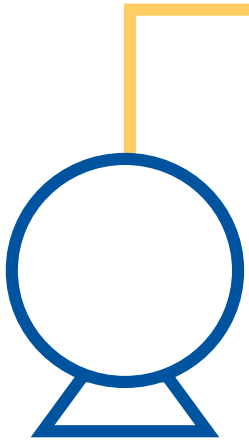
- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- **4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8**
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 Zusammenfassung

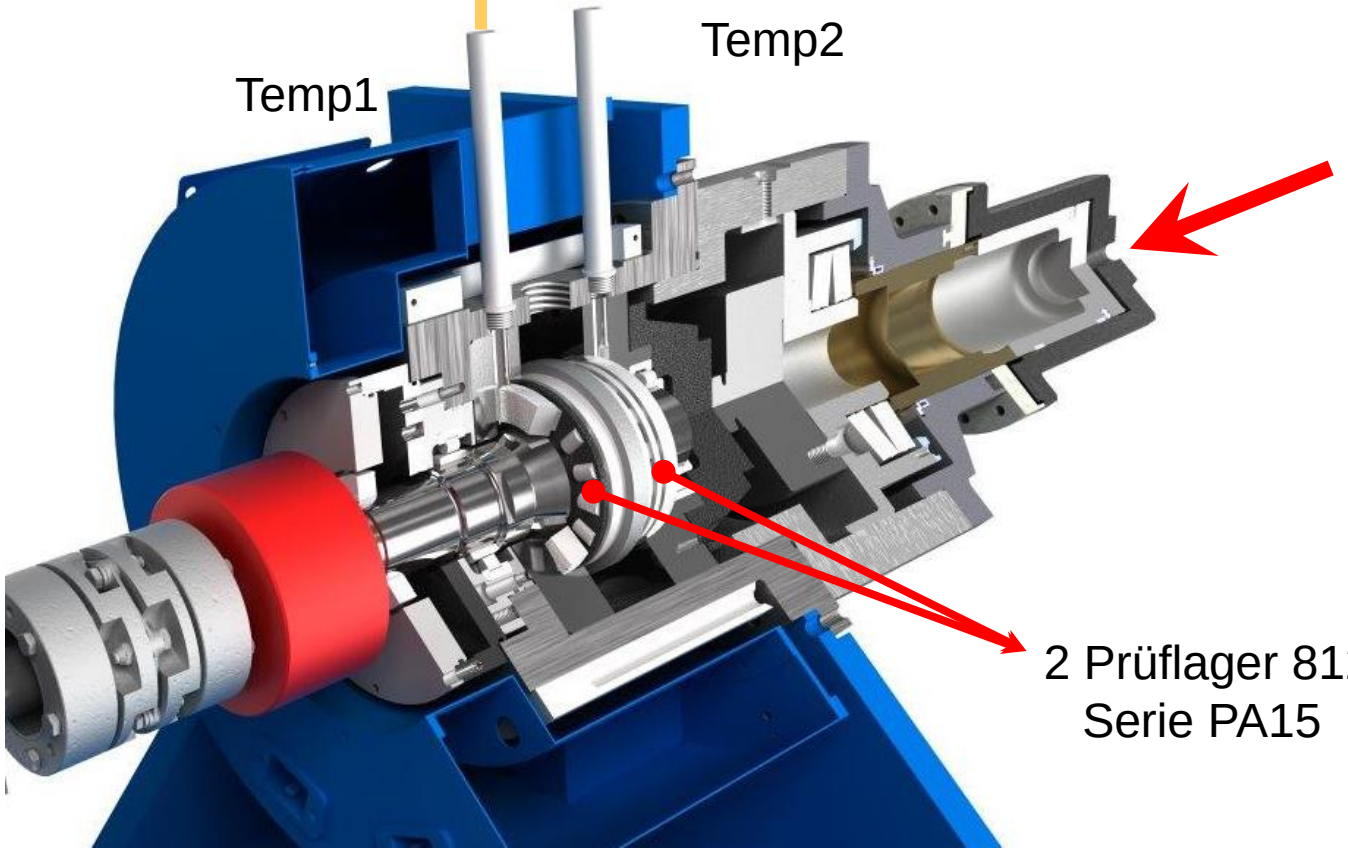
Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Axiallagerprüfstand FE8 nach DIN 51819

Prüfstand

Nachschmierung alle 10 Minuten mit 50 mm³ Schmierfett



Fettpumpe

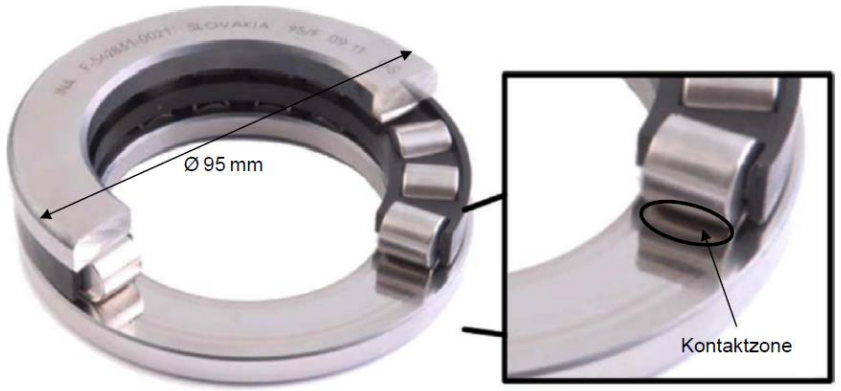


MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung | RWTH AACHEN UNIVERSITY | tu technische universität dortmund | BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Axiallagerprüfstand FE8

Ziel

Bestimmung des Verschleißschutzes von Schmierstoffen



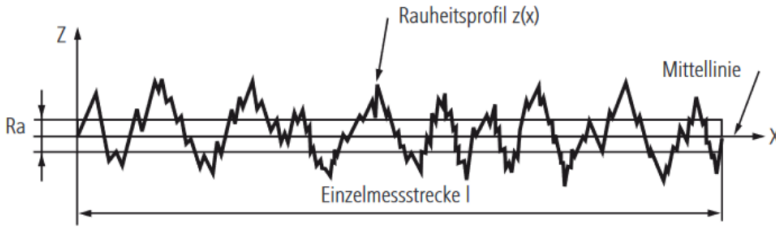
81212 Axialzylinderrollenlagers mit Käfig aus Polyamid PA66 mit 15 Wälzkörpern (WK)

• Verschleißmasse

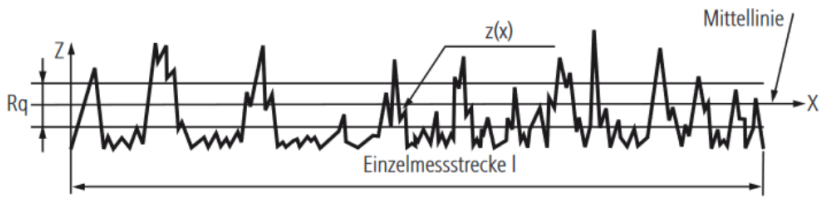
Messung des Gewichts der Laufbahn und der Wälzkörper vor und nach den Messungen

• Oberflächenrauheit

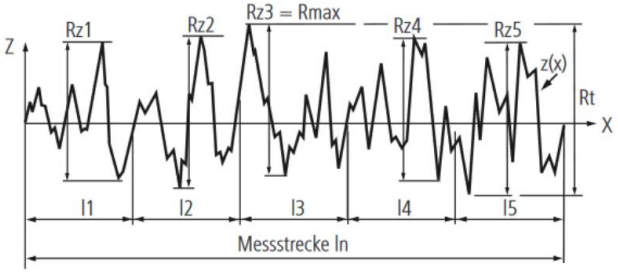
Messung der Rauheit der Laufbahn und der Wälzkörper vor und nach den Messungen (DIN EN ISO 4287)



Arithmetischer Mittenrauwert $Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |z(x)|dx$



Quadratischer Mittelrauwert $Rq = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l z^2(x)dx}$



Gemittelte Rautiefe $Rz = \frac{1}{n}(Rz1+Rz2+...+Rzn)$

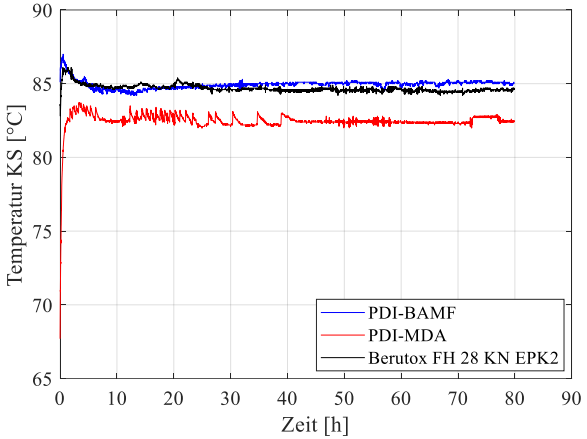
[Zeiss]

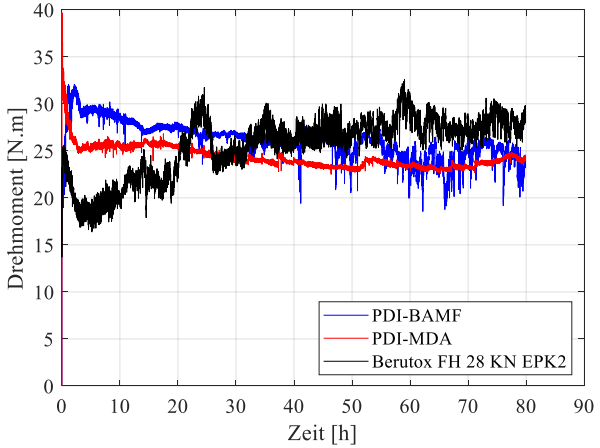
MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung | RWTH AACHEN UNIVERSITY | tu technische universität dortmund | BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Axiallagerprüfstand FE8 (Korrelation)

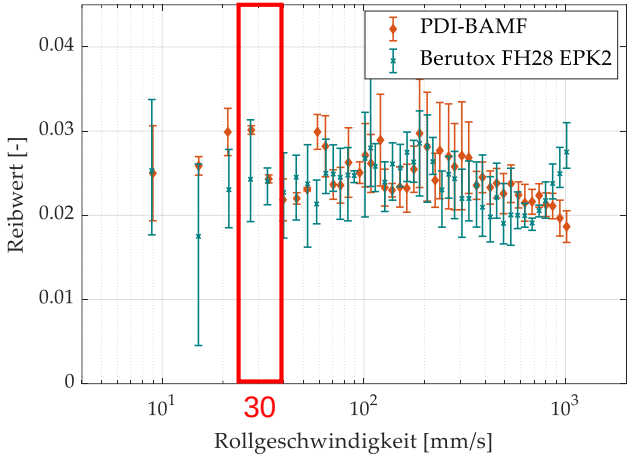
Korrelation		
Prüfstand	FE8	Tribometer
Temperatur	80 °C	40 °C
Druck	1900 MPa	700 MPa
Geschw.	30.4 mm/s	30 mm/s
Kontakt	Linienkontakt	Punktkontakt
Schmierung	Fettverteilung auf der Scheibe ohne Nachschmierung	Erste Schmierung und Nachschmierung alle 10 Minuten mit 22.5 mm³ Fett

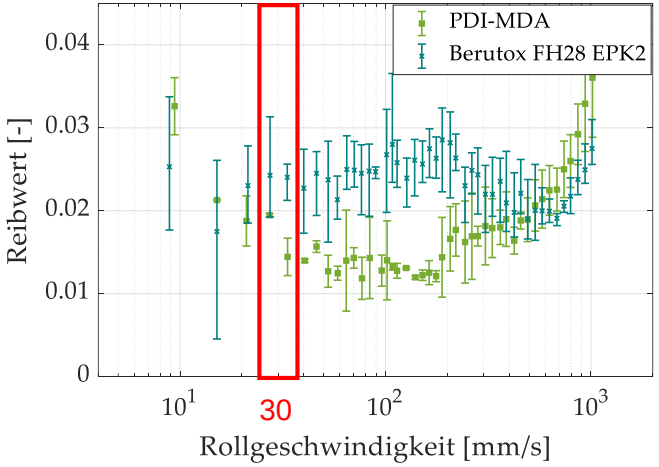
FE8





Tribometer





Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Axiallagerprüfstand FE8 (Gesamtbewertung)

PDI-MDA

Unterschied	Ra	Rq	Rz
WS	0.005	0.01	0.075
GS	0	0.005	0.035
WK	0.025	0.025	0.105

Mittelwert	Masse [mg]
Lager 1 und 2 WK	10.3

Guter Verschleißschutz

PDI-BAMF

Unterschied	Ra	Rq	Rz
WS	-0.01	-0.005	0.005
GS	-0.005	-0.01	-0.05
WK	-0.01	-0.01	-0.065

Mittelwert	Masse [mg]
Lager 1 und 2 WK	4.8

Sehr guter Verschleißschutz

Berutox FH 28 KN EPK2

Unterschied	Ra	Rq	Rz
WS	-0.02	-0.02	-0.095
GS	-0.015	-0.02	-0.07
WK	0	0.005	0

Mittelwert	Masse [mg]
Lager 1 und 2 WK	0.6

Sehr guter Verschleißschutz

Verschleißmasse der Rollen (WK)	Bewertung der Verschleißschutzwirkung
< 10 mg	Sehr guter Verschleißschutz
10 – 30 mg	Guter Verschleißschutz
30 – 100 mg	Mäßiger Verschleißschutz
> 100 mg	Zu viel Verschleiß

- Sehr guter Verschleißschutz durch das petrochemische Schmierfett
- vergleichbarer Verschleißschutz des BAMF im Vergleich zum petrochemischen Fett.
- Guter Verschleißschutz von MDA

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Axiallagerprüfstand FE8 (Gesamtbewertung)

PDI-MDA

Unterschied	Ra	Rq	Rz
WS	0.005	0.01	0.075
GS	0	0.005	0.035

Mittelwert	Masse [mg]
Lager 1 und 2 WK	10.3

Guter Verschleißschutz

Verschleißmasse der Rollen (WK)	Bewertung der Verschleißschutzwirkung
< 10 mg	Sehr guter Verschleißschutz
10 – 30 mg	Guter Verschleißschutz

PDI-BAMF

Berutox FH 28 KN EPK2

Unterschied	Ra	Rq	Rz
WS	-0.02	-0.02	-0.095
GS	-0.015	-0.02	-0.07
WK	0	0.005	0

Mittelwert	Masse [mg]
Lager 1 und 2 WK	0.6

Sehr guter Verschleißschutz

- vergleichbarer Verschleißschutz des BAMF im Vergleich zum petrochemischen Fett.
- Guter Verschleißschutz von MDA

Zwischenfazit

- Die Fette mit dem besten Verschleißschutz beim FE8 Test können wie folgt eingestuft werden: das petrochemische Fett > das biobasierte Fett BAMF > das biobasierte Fett PDA
- Die Ergebnisse des FE8 stimmen mit den Ergebnissen des EHD-Tribometers überein

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

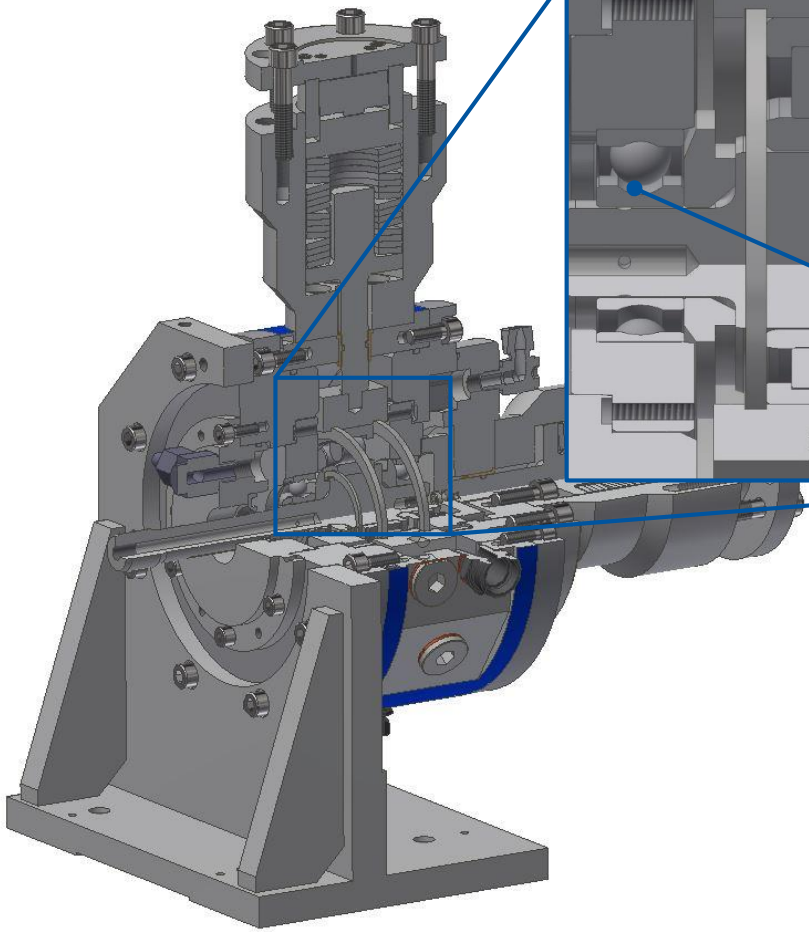
4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

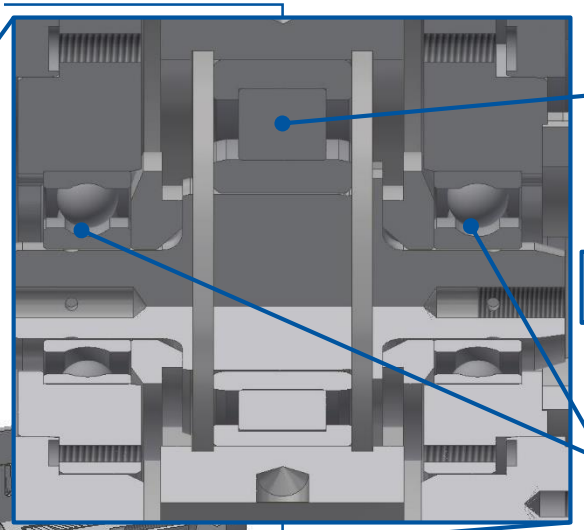
- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- **4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand**

5 Zusammenfassung

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Lebensdauerversuche

Radiallagerprüfstand

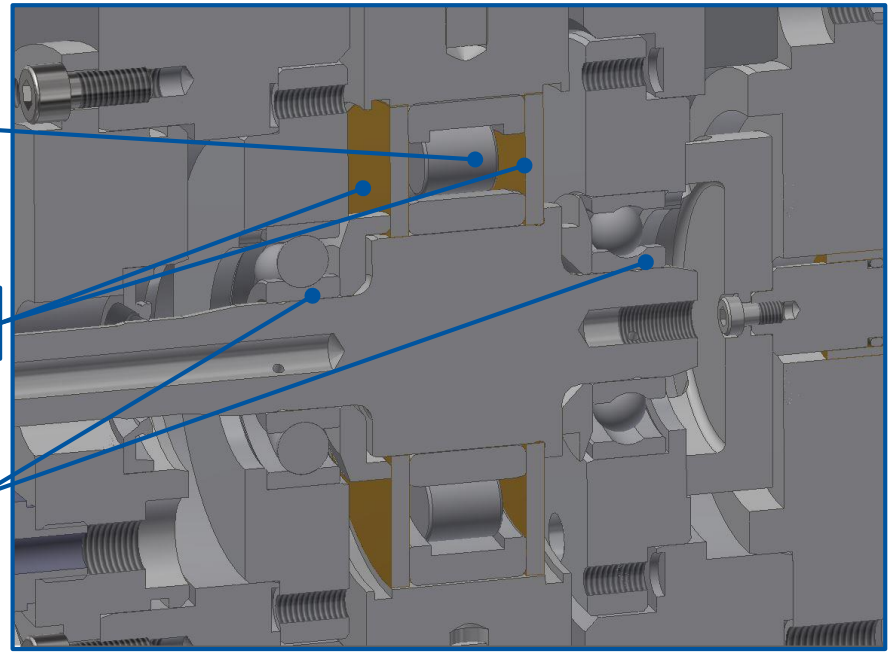




Stützlager

Nilos-Ringe

Prüflager



Umbau des Prüfstandes

- Umstellung von Öl- auf Fettschmierung
- Prüflager (Rillenkugellager) können abgedichtet eingekauft werden
- Bei Stützlager (Zylinderrollenlager) ist Abdichtung durch Nilos-Ringe (Labyrinthdichtung) erforderlich

MSE Institut für Maschinenelemente und System-entwicklung
RWTH AACHEN UNIVERSITY
tu technische universität dortmund
BECHEM LUBRICATION TECHNOLOGY

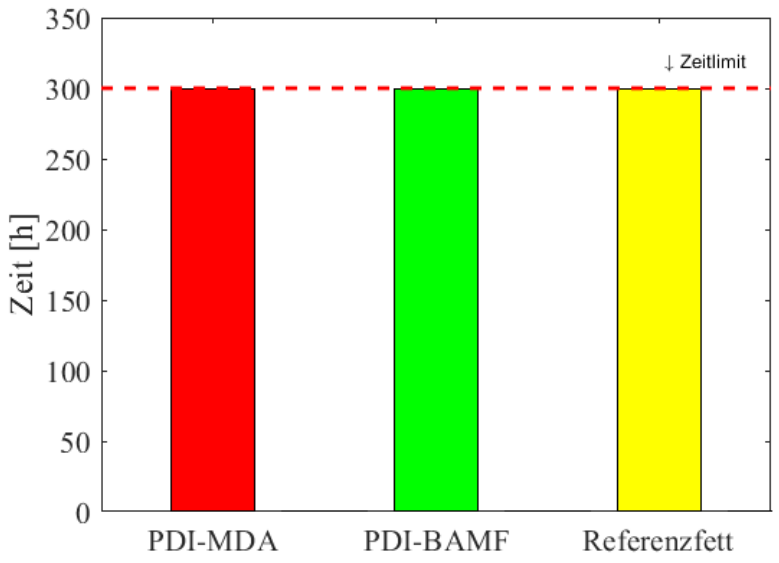
Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Lebensdauertest

Lagertyp: Rillenkugellager 6305

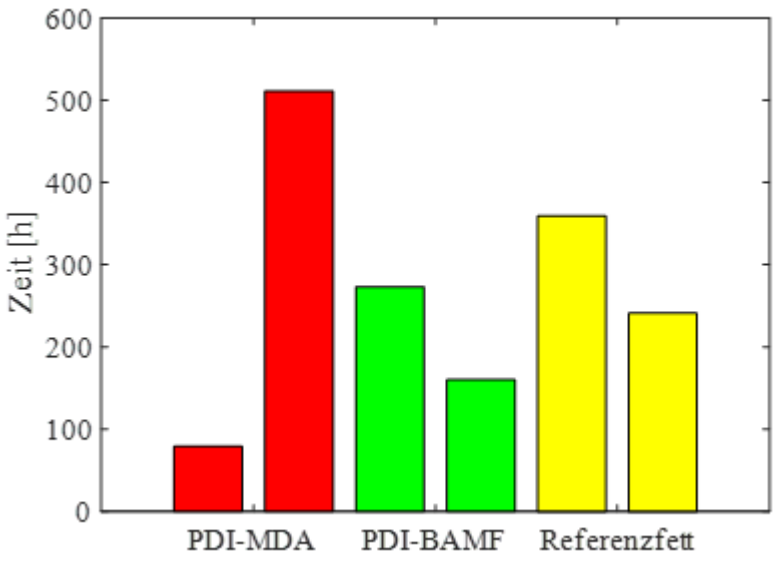
Fette			
Fett	PDI-MDA	PDI-BAMF	Berutox (Ref)
Gründöl	Rizinusöl	Rizinusöl	PAO
Gründöl Viskosität (40 °C)	254 mm²/s	254 mm²/s	242,5 mm²/s
NLGI Klasse	2	2	1 – 2

Betriebsbedingungen	
Temperatur	50 °C
Radialast	10 kN (2183.6 MPa)
Drehzahl	2500 min^{-1} (4.07 m/s)
Max. Zeit	300 Stunden

Mit Zeitlimit

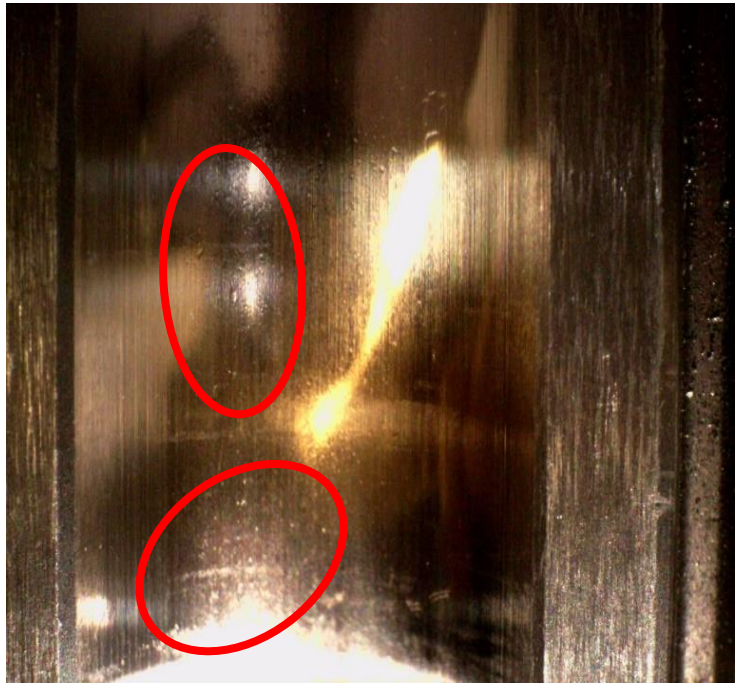


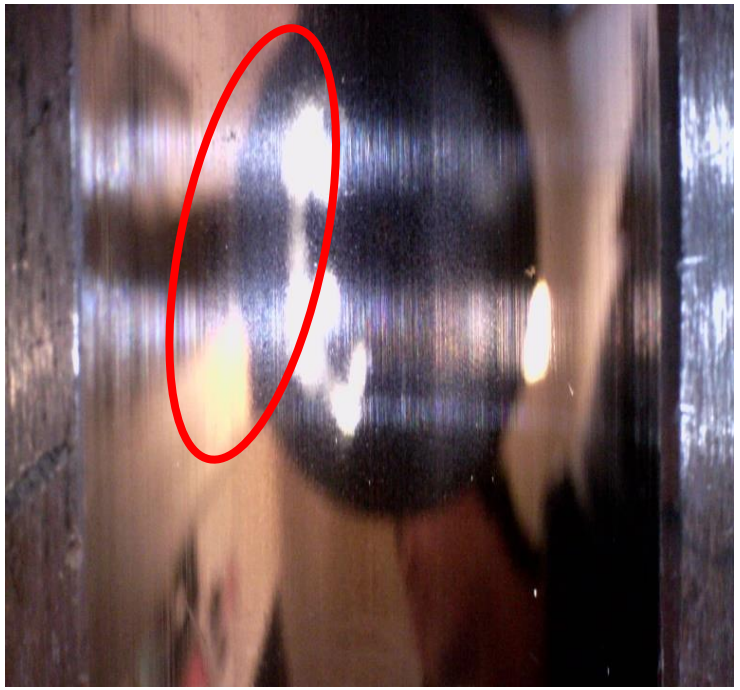
Ohne Zeitlimit



- Hohe Streuung in den Ergebnissen der Lebenszeit von Biofette
- Beide Biofette konnten mindestens einen Test mit 300 Stunden bestehen

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Optische Ergebnisse (Lichtmikroskop)

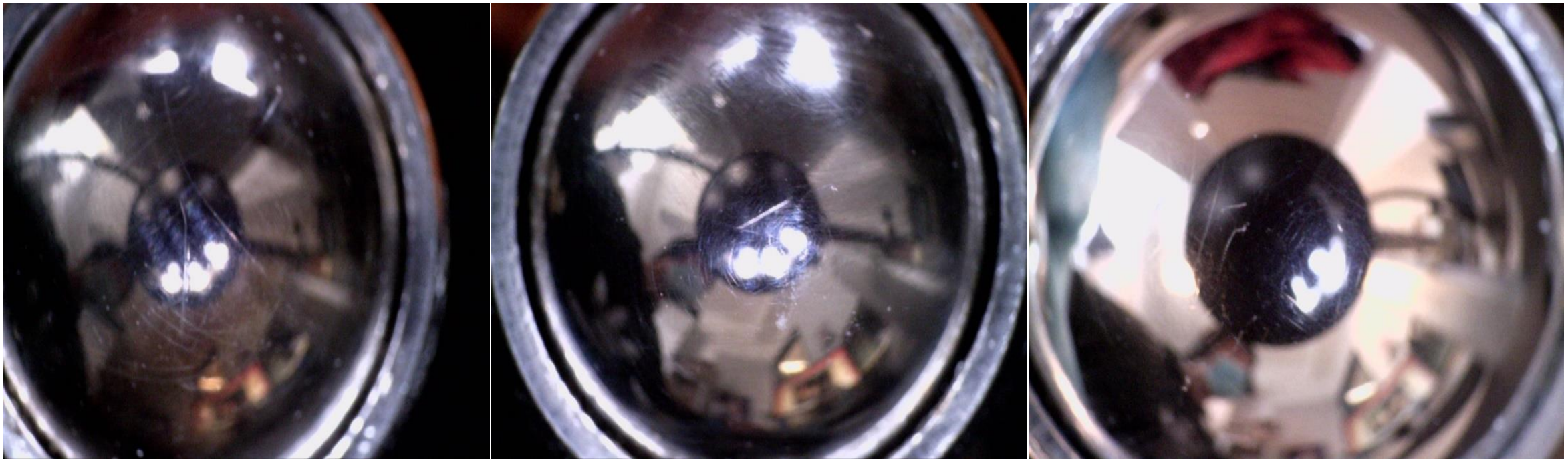




MDA nach 300 Stunden < BAMF nach 300 Stunden < Referenzfett nach 300 Stunden

Deutlich bessere Qualität der Oberflächen im Innenring des Wälzlagers mit Referenzfett als die biobasierten Fette BAMF und MDA nach 300 Stunden.

Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen
Optische Ergebnisse (Lichtmikroskop)



MDA nach 300 Stunden < BAMF nach 300 Stunden < Referenzfett nach 300 Stunden

Deutlich bessere Qualität der Oberflächen der Kugeln des Wälzlagers mit dem Referenzfett als die biobasierten Fette BAMF und MDA nach 300 Stunden.

Folienübersicht

1 Einleitung und Problemstellung

2 Arbeitspakete und Zusammenarbeit

3 Entwicklung von biobasierten Verdickersysteme

4 Qualifizierung von entwickelten Schmierstoffen

- 4.1 Screening Teste am Kugel-Scheiben-Tribometer
- 4.2 Verschleißteste auf Axiallagerprüfstand FE8
- 4.3 Lebensdauerteste auf Radiallagerprüfstand

5 **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Es wurden biobasierte Verdickersysteme (Polyharnstoffe, Polyester und Polyamide) entwickelt und rheologische Tests an entwickelten biobasierten Fetten mit Rizinusölbasis durchgeführt
- Das tribologische Verhalten der entwickelten biobasierten Fette wurde am Kugel-Scheiben Tribometer, FE8 (Verschleißtest) und Radiallagerprüfstand (Lebensdauertest) ermittelt

Fazit

- Die Ergebnisse der Screening Versuche auf dem Tribometer stimmen mit den Verschleißtests auf FE8 und den Lebensdauertests auf RLP überein
- Vergleichbares tribologisches Verhalten der biobasierten Fette mit dem petrochemischen Referenzfett

Zukünftige Arbeit

- Weitere polymere Strukturen können in die Entwicklung der neuen alternativen biobasierten Fette einbezogen werden
- Weitere Langzeitversuche im Lagerprüfstände erforderlich um die Ergebnisse des Projekts statistisch abzusichern

Projektübersicht
Gemeinsame Publikationen

Autoren	Titel	Jahr	Art	Ort
Vafaei, S., Fischer, D., Jopen, M., Jacobs, G., Stratmann, A., Weberskirch, R	Tribological behaviour of lubricating greases composed by different bio-based polymer thickeners	2020	Konferenz	Gesellschaft für Tribologie (GfT)
Vafaei, S., Fischer, D., Jopen, M., Jacobs, G., König, F., Weberskirch, R.	Entwicklung biobasierter Verdickersystemezur Herstellung von Schmierfetten	2021	Konferenz	Bioschmierstoff-Tagung 2021 FNR
Vafaei, S., Fischer, D., Jopen, M., Jacobs, G., König, F., Weberskirch, R.	Investigation of Tribological Behavior of Lubricating Greases Composed of Different Bio-Based Polymer Thickeners. https://doi.org/10.3390/lubricants9080080.	2021	Fachzeitschrift	Lubricants journal
Jopen, M., Degen, P., Henzler, S., Grabe, B., Hiller, W., Weberskirch, R.	Polyurea Thickened Lubricating Grease—The Effect of Degree of Polymerization on Rheological and Tribological Properties https://doi.org/10.3390/polym14040795.	2022	Fachzeitschrift	Journal of Polymers
Vafaei, S., Jopen, M., Jacobs, G., König, F., Weberskirch, R.	Synthesis and tribological behavior of bio-based lubrication greases with bio-based polyester thickener systems https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132659	2022	Fachzeitschrift	Journal of Cleaner Production
Vafaei, S., Goeldel, S., Jacobs, G., König	Evaluation of Bio-based Lubricating Greases and PTFE-Lubrication under EHL Conditions	2022	Konferenz	TriboUK
Vafaei, S., Jacobs, G., König	Tribological Performance of Lubricating Greases Composed by Different Bio-based Polymer Thickeners under Elastohydrodynamic Lubrication Conditions	2022	Konferenz	Tribology International Conference, Barcelona, Spanien
Vafaei, S., Jacobs, G., König	Tribological Evaluation of Lubricating Greases Composed by Different Bio-based Polymer Thickeners	2022	Konferenz	Arnold Tross Kolloqium, Hamburg

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Mohammad Vafaei

RWTH Aachen, MSE – Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung