

Dipl. Ing. S. Leithner

„Condition Monitoring“ und „Predictive Maintenance“ von Gleitringdichtungen in Pumpenanwendungen

HFM - Institute of Hydraulic Fluid Machinery

27. Praktikerkonferenz 08. – 10. April 2024

in Kooperation mit

EagleBurgmann
a member of **EKK** and **FREUDENBERG**



Ursache von Verschleiß

Popov:

“Adhäsiver Verschleiß ist die wichtigste Verschleißart in der Tribologie. ...
... Durch Zusammenschweißen von Mikrorauigkeiten und anschließendes
Ausbrechen von oberflächennahen Teilchen entsteht der Materialabtrag”

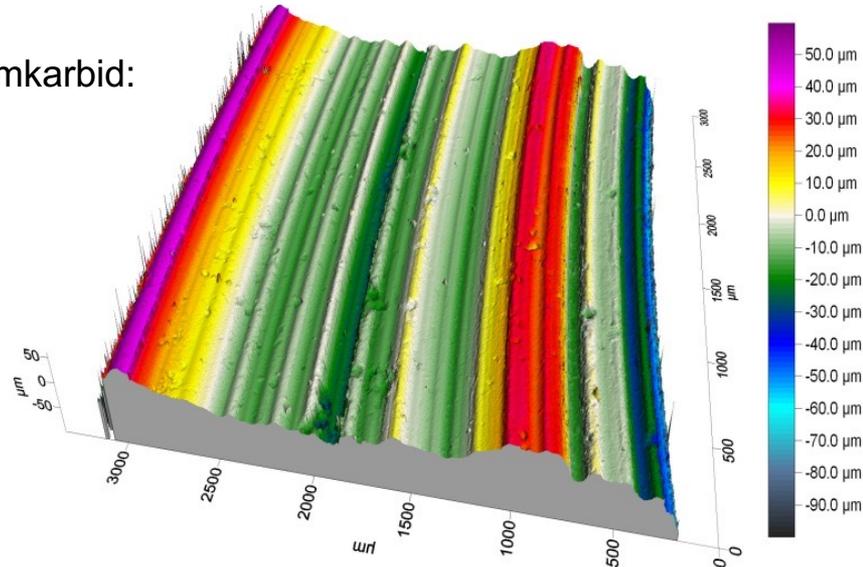
Dichtring aus Siliziumkarbid:

$\Delta p = 25 \text{ bar}$

$v_G = 6 \text{ m/s}$

$T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$

VE-Wasser



Quelle: EagleBurgmann

Verschleiß von Gleitkontakten

- Die ständige Beanspruchung von Teilen der Dichtfläche im Dichtspalt zwischen Gleit- und Gegenring durch adhäsiven Kontakt führt primär zur Bildung von wachsenden Rissen.
- Sind die Adhäsionskräfte und die Risse zu groß, werden Partikel herausgebrochen.
- Partikel werden dann durch die Drehbewegung im Dichtspalt zerrieben, weiter zerkleinert und schließlich ausgetragen.
- Dabei entstehen neue Risse, Material wird abgetragen und es bilden sich die tiefen Rillen (siehe Folie 2).
- Parallel findet immer auch ein sehr geringer Verschleiß durch Amorphisierung auf atomarer Ebene statt (Polieren...). Dieser muss vom adhäsiven Verschleiß messtechnisch abgegrenzt werden.

Verschleiß von Gleitkontakten

- Die adhäsiven Verschleißprozesse kann man als Verschleißereignis zusammenfassen. Bisläng gibt es kein Verfahren, welches die Verschleißereignisse sicher erkennt, nicht quantitativ, noch qualitativ. (Wann beginnen sie, wann sind sie abgeschlossen, welches Verschleißvolumen wurde ab- und ausgetragen?)

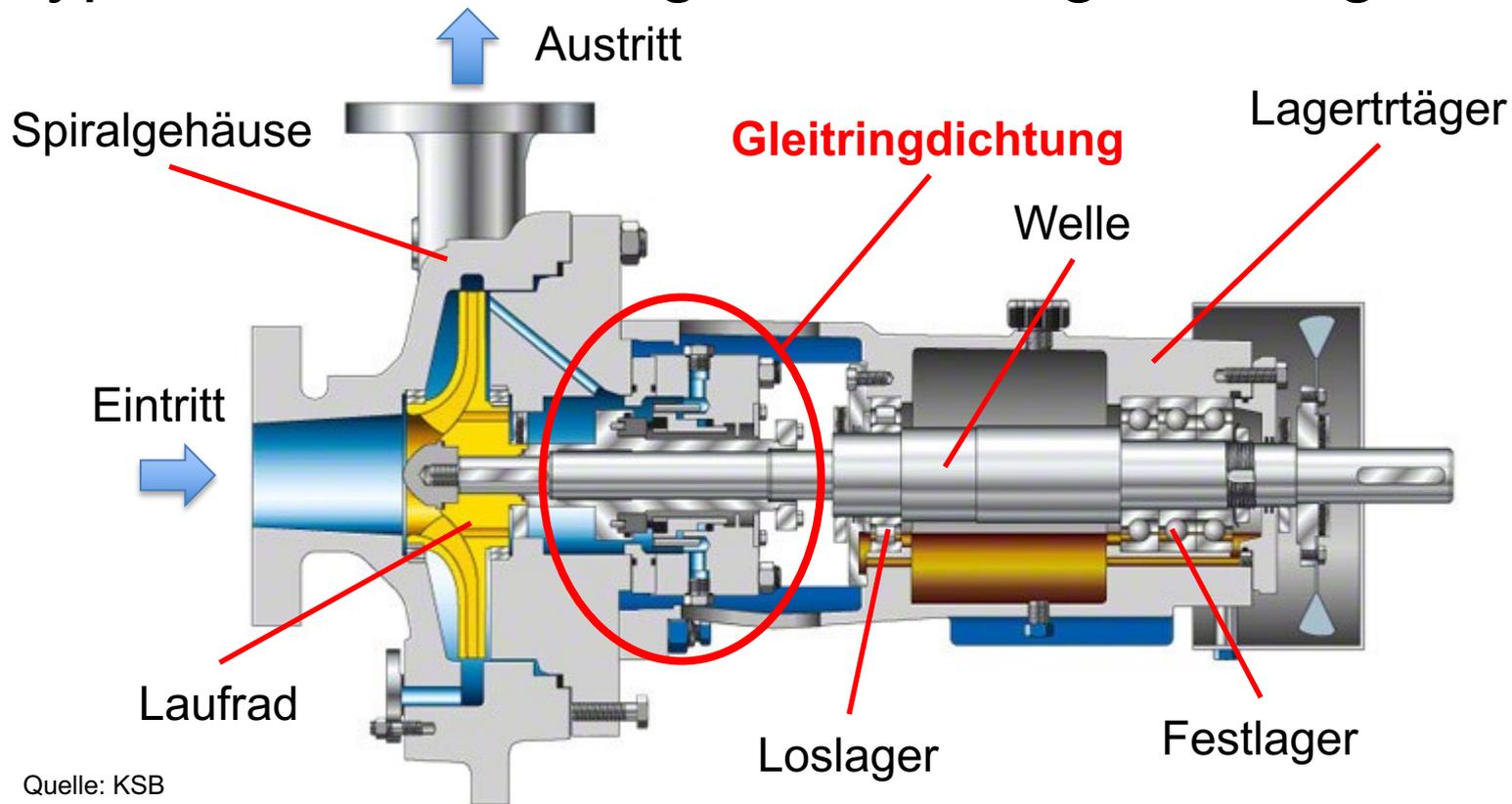
Wichtig:

Die eingesetzten Werkstoffe für Dichtringe sind grundsätzlich sehr robust und verschleißfest.

Ziele meiner Arbeit:

- **Untersuchung verschiedener messtechnischer Ansätze zur Analyse von Verschleißereignissen**
- **Lösungsansatz für condition monitoring und predictive maintenance**

Typische Anwendung für Gleitringdichtungen



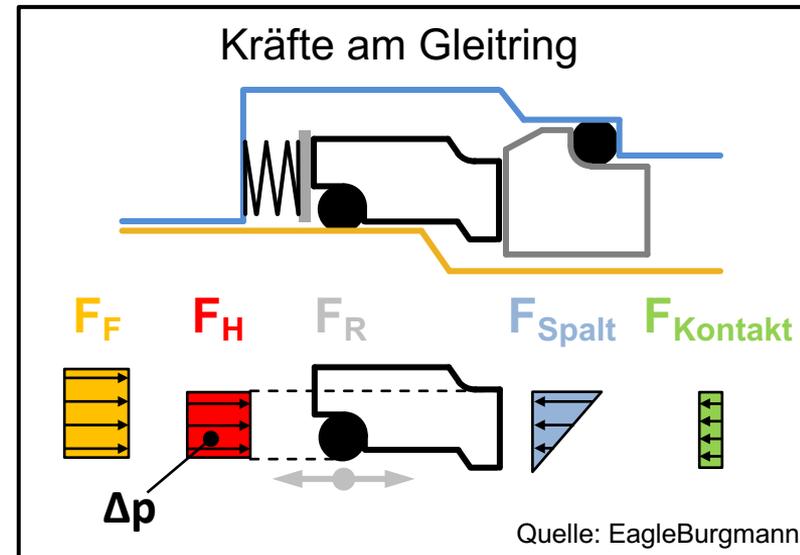
Quelle: KSB

Modell zur Bestimmung des Verschleißvolumens

Holm-Archard-Gleichung:

$$V = K_{adh} \cdot \frac{F_N \cdot x}{\delta_0}$$

- V Verschleißvolumen
 F_N Normalkraft in der Gleitfläche
 x zurückgelegte Lauflänge
 δ_0 Härte des weicheren Werkstoffs
 K_{adh} Parameter des Verschleißes,
 im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-8} , in den
 meisten Fällen nur im Nachhinein bestimmbar

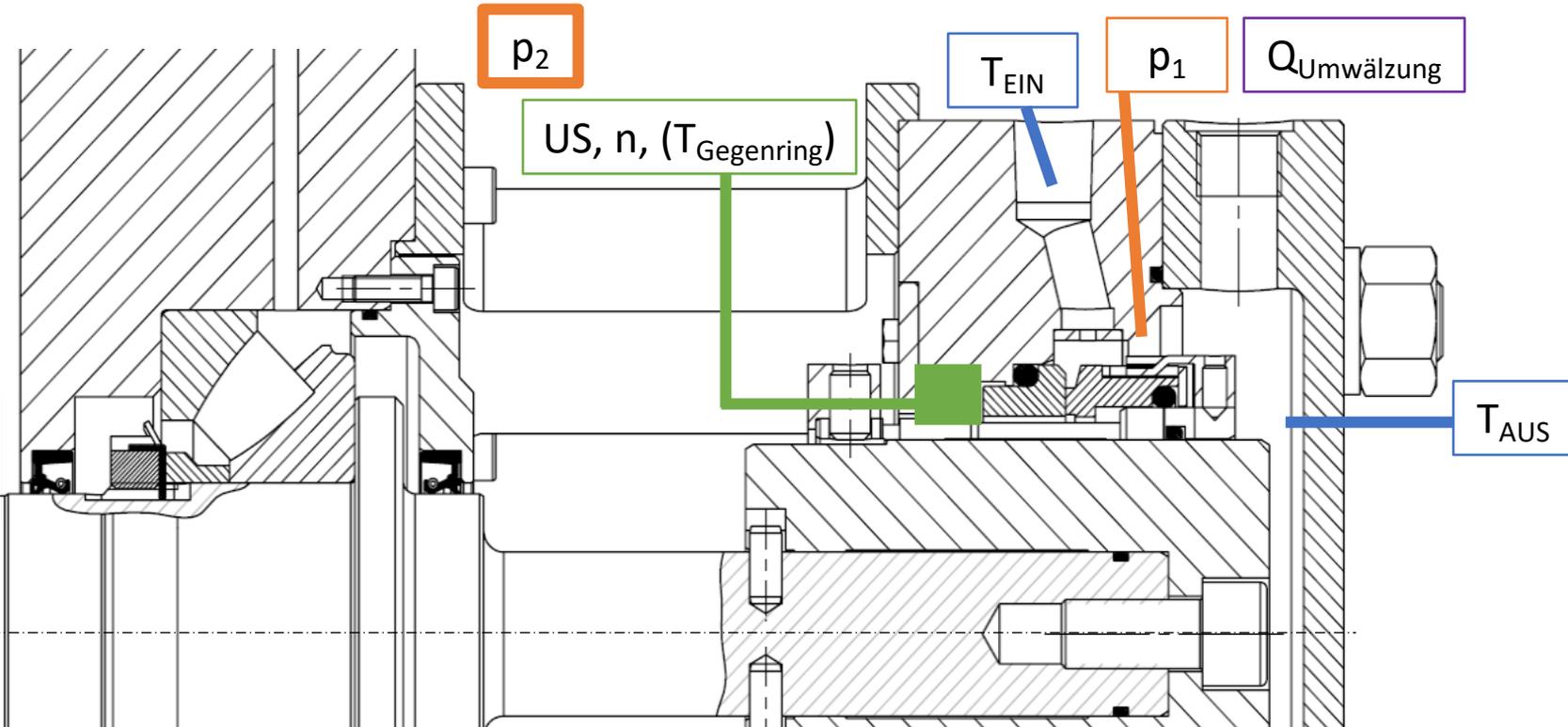


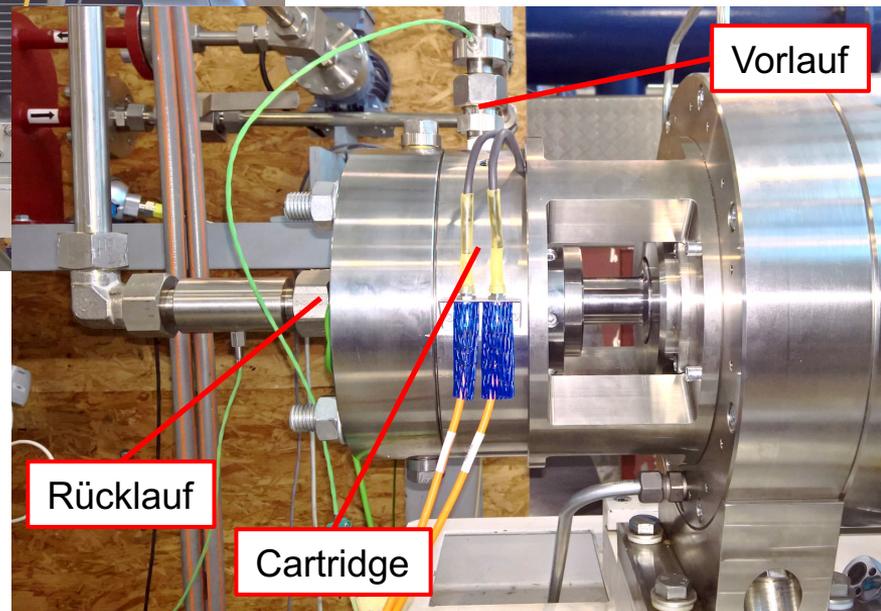
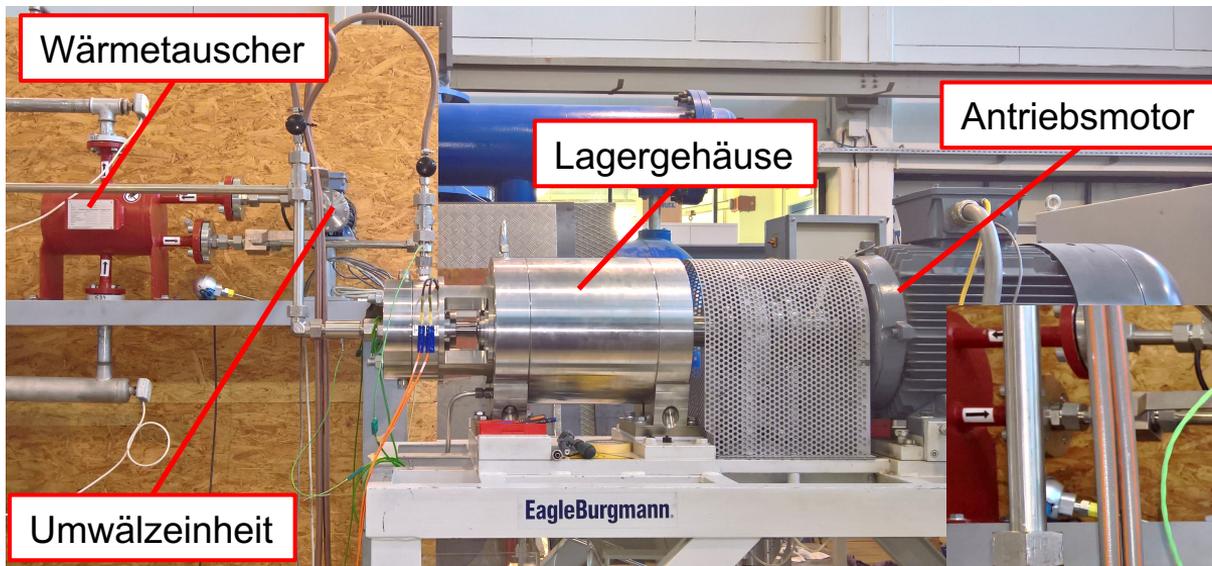
Untersuchte Methoden zur Überwachung

- Aktive Ultraschallwellen
- Gümbelzahl und Gümbeldiagramm
- Schnelle Temperaturmessung

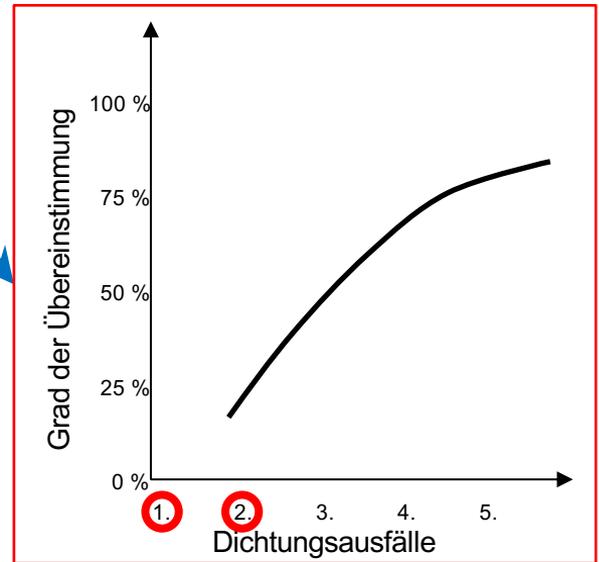
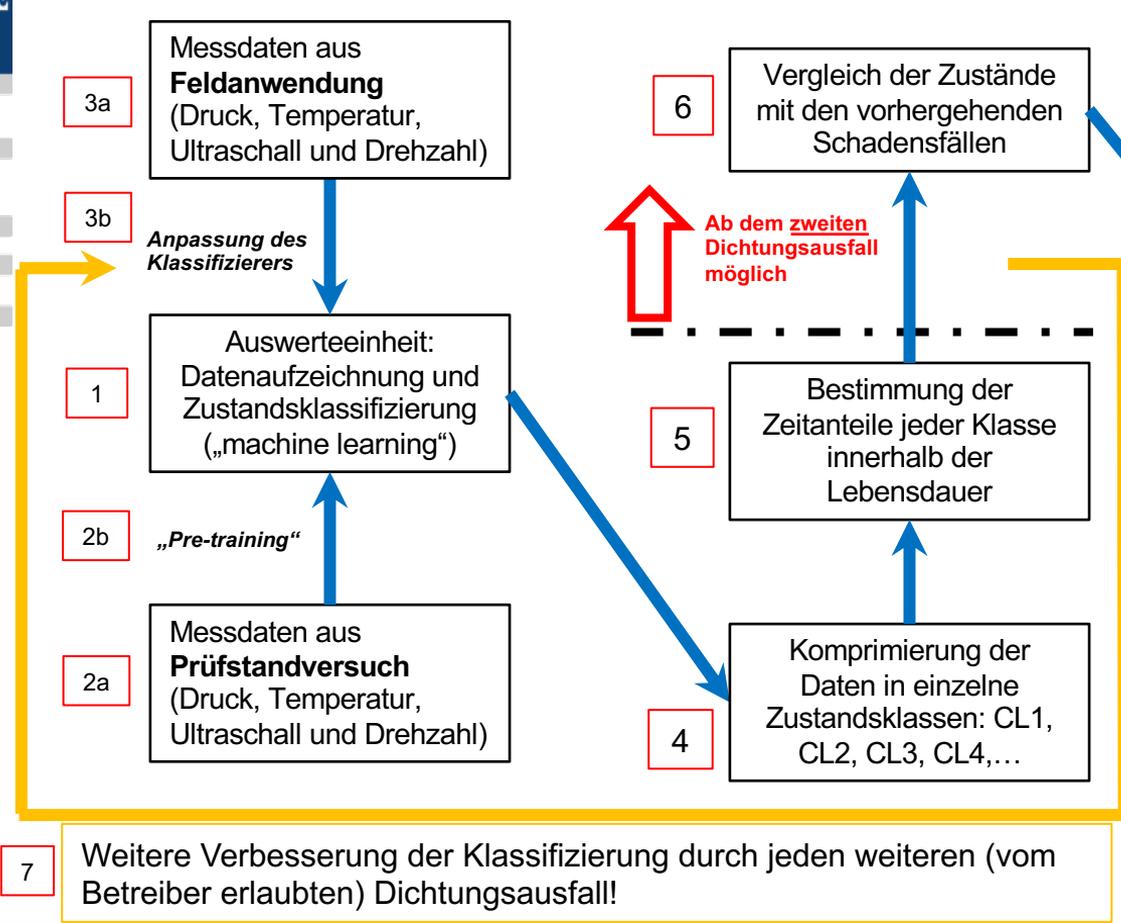
Prüfstand für Catridge GLRD

HFM





Geplante Funktionsweise der Überwachung



Ab dem zweiten Dichtungsausfall wird ein Vergleich der Zustände nach dem Versagen der Dichtung möglich. Der Grad der Übereinstimmung, angegeben in Prozent, soll dabei mit jedem weiteren Dichtungsausfall größer werden → Lernkurve. Handelt es sich um stark zufällige Ausfallsursachen (Bedienfehler in der Anlage o.ä.) dann sollte dieser Schadensfall nicht zur Bewertung herangezogen werden.

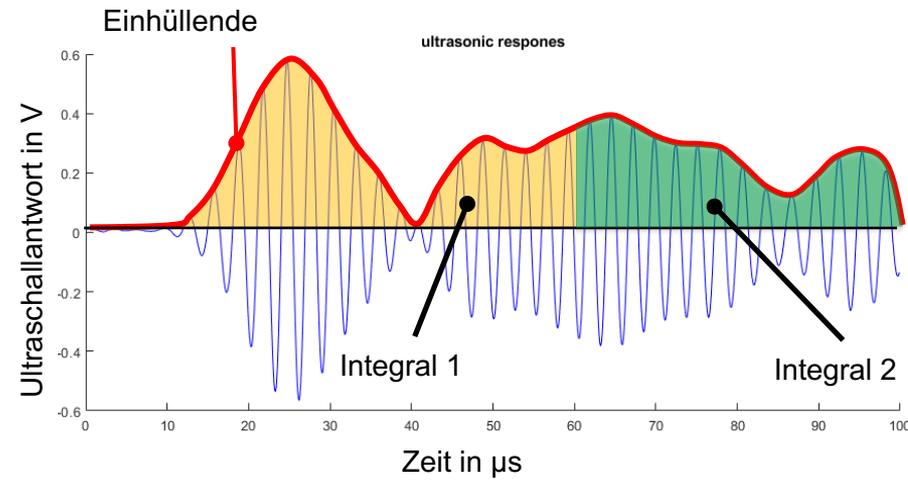
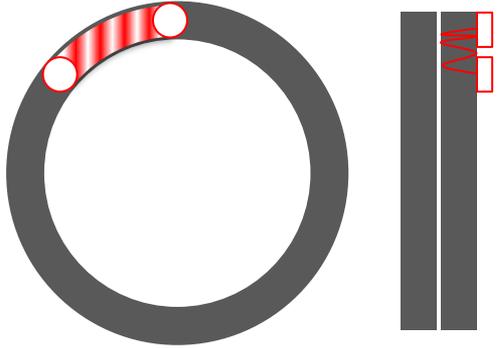
Betreiber kann entscheiden ob eine geringe Übereinstimmung ausreicht (→ höhere Kosten bei geringer Übereinstimmung, da die noch funktionsfähige Dichtung getauscht wird) oder noch weitere Dichtungen bis zum Versagen genutzt werden, um einen höheren Grad der Übereinstimmung zu erhalten.

7

Weitere Verbesserung der Klassifizierung durch jeden weiteren (vom Betreiber erlaubten) Dichtungsausfall!

Messprinzip mit aktiven Ultraschallwellen

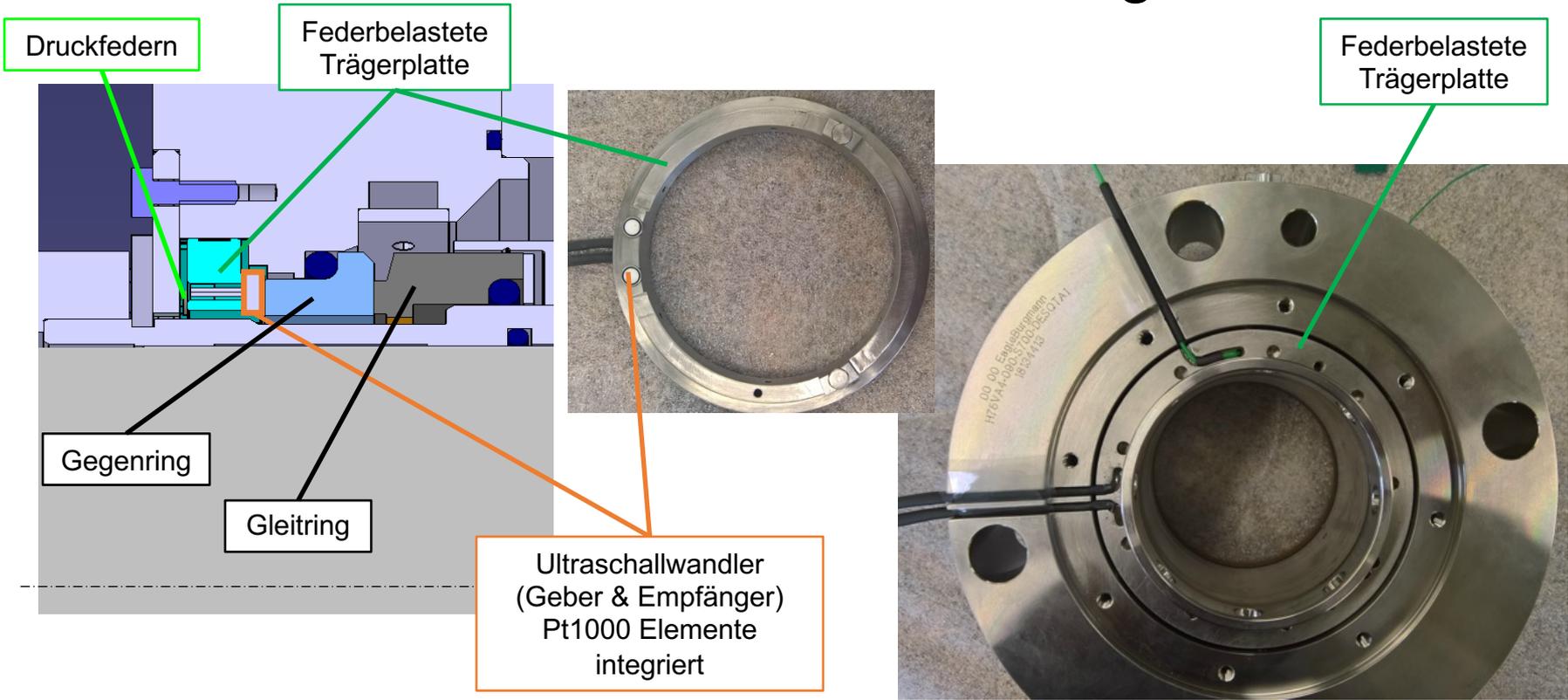
- Anwendung von Rayleigh-Lamb-Wellen (Surface Acoustic Wave - SAW) und Analyse des Antwortsignals.
- Durch die Erzeugung einer definierten Ultraschallwelle ist eine sehr enge Filterung und damit eine sehr gute Rauschunterdrückung möglich.
- Empfangene Ultraschallwelle: Abtastrate 10 MHz, Aufzeichnungsdauer 100 µs.



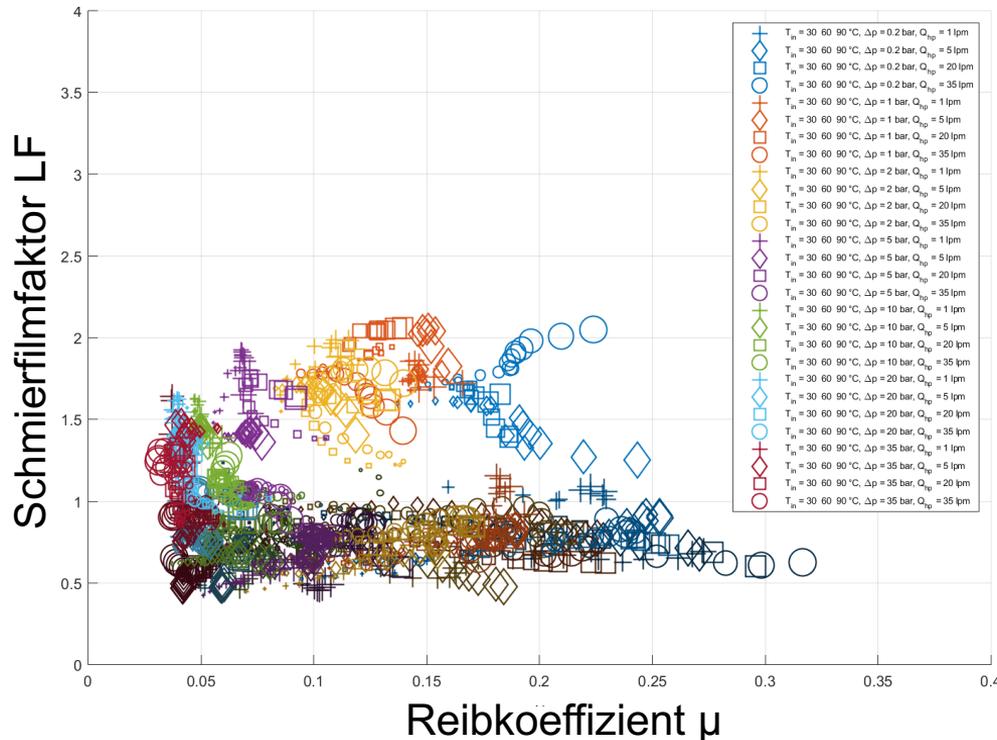
lubrication factor:

$$LF = \frac{Integral\ 2}{Integral\ 1}$$

Ultraschallmesstechnik in der Cartridge



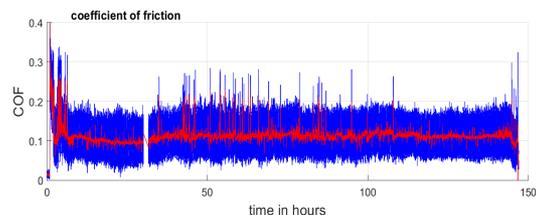
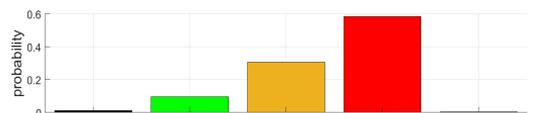
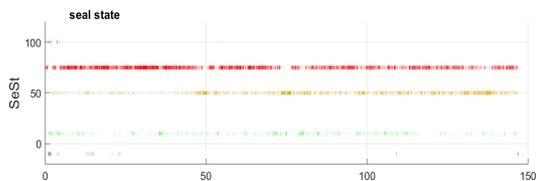
Ergebnis aus Reihenuntersuchung



- Erste Annahme: Reibkoeffizient und Schmierfilmfaktor LF zeigen einen Zusammenhang
→ konnte nicht bestätigt werden.
- Im Vergleich zum Reibkoeffizienten bleibt der Schmierfilmfaktor für die große Mehrheit der untersuchten Betriebszustände annähernd konstant.
- Erwartungshaltung: zumindest eindeutiger Zusammenhang vom Schmierfilmfaktor zum Reibkoeffizienten.

Vergleich von 3 Dauertests der Ultraschallmesstechnik

“schlecht” “mittel” “gut”



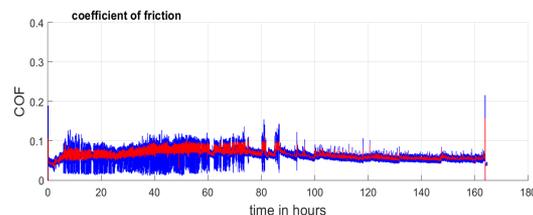
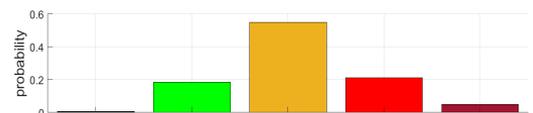
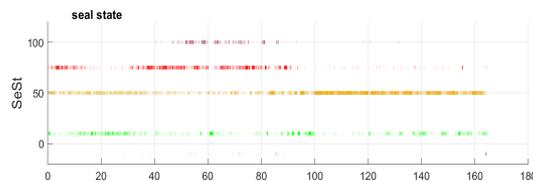
Test Nr. 1: ~145 h

Reibungszustand: schlecht

messbarer Verschleiß

Betriebspunkt:

0.2 bar, 90 °C, 20 l/min, 3600 U/min

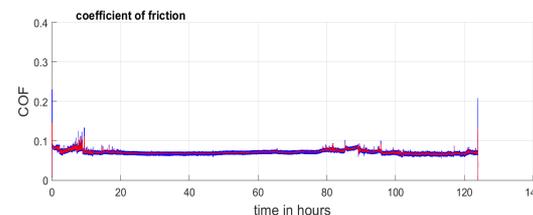
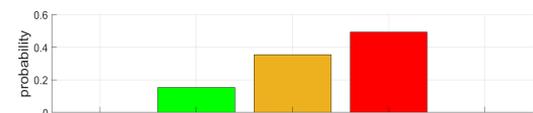
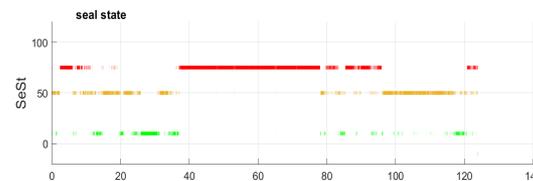


Test Nr. 2: ~165 h

Reibungszustand: mittel

Betriebspunkt:

20 bar, 30 °C, 20 l/min, 3600 U/min



Test Nr. 3: ~125 h

Reibungszustand: gut

kein messbarer Verschleiß

Betriebspunkt:

10 bar, 30 °C, 20 l/min, 1800 U/min

Gümbelzahl - Definition

$$G = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \eta}{k \cdot \Delta p + p_f \pm p_r}$$

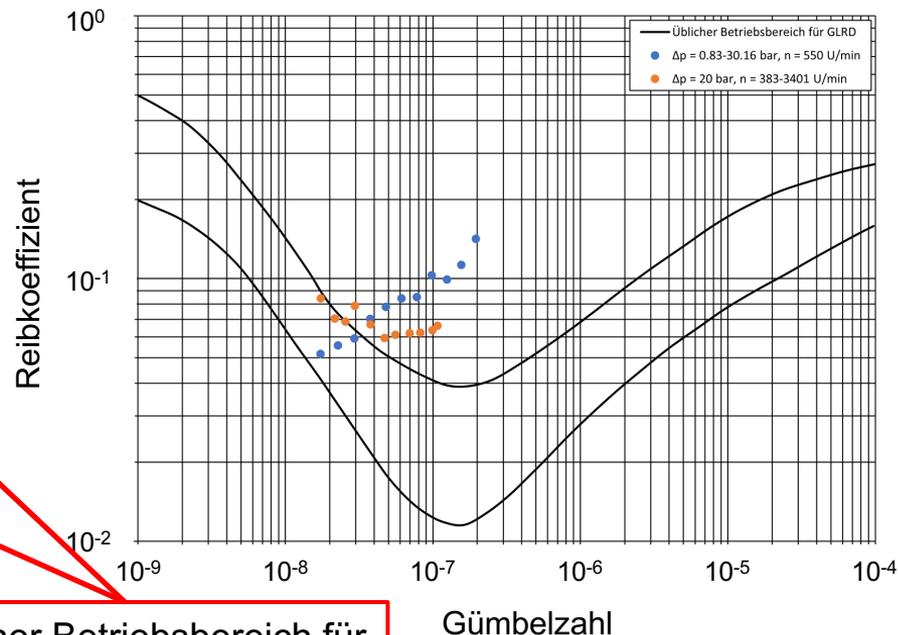
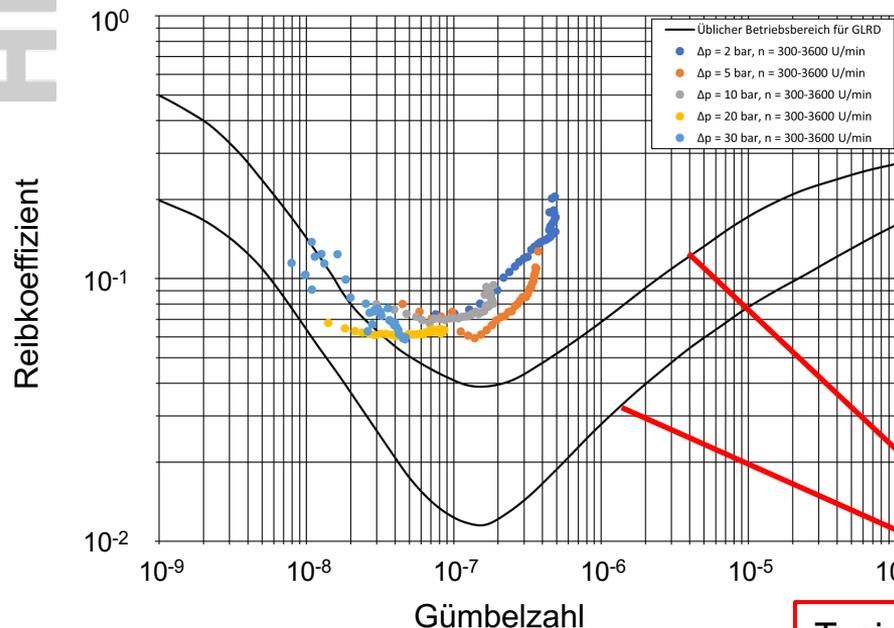
- n Drehzahl in Hz
η Dynamische Viskosität in Pa s
k Druckentlastungsfaktor
Δp Druckdifferenz in Pa
p_f Druck aufgrund der Federkraft in Pa
p_r Druck aufgrund der Nebendichtung in Pa
(wird in der Praxis nicht angegeben, da nicht messtechnisch erfassbar)

- Bestimmung des Reibzustandes aus den Betriebsparametern.
- Der Durchmesser und damit die Gleitgeschwindigkeit wird nicht berücksichtigt.
- Die reale Kontaktfläche und damit der Grad des Festkörperkontakts sind nicht Teil der Betrachtung.

Ergebnisse der Voruntersuchungen

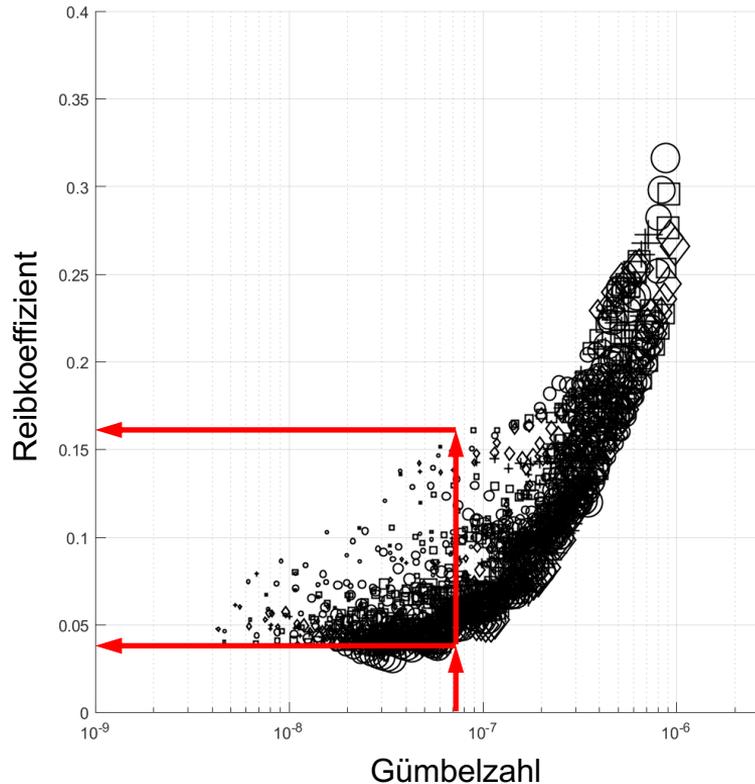
Gesamter Fahrbereich des Prüfstands

Überlappender Bereich für n oder Δp konstant



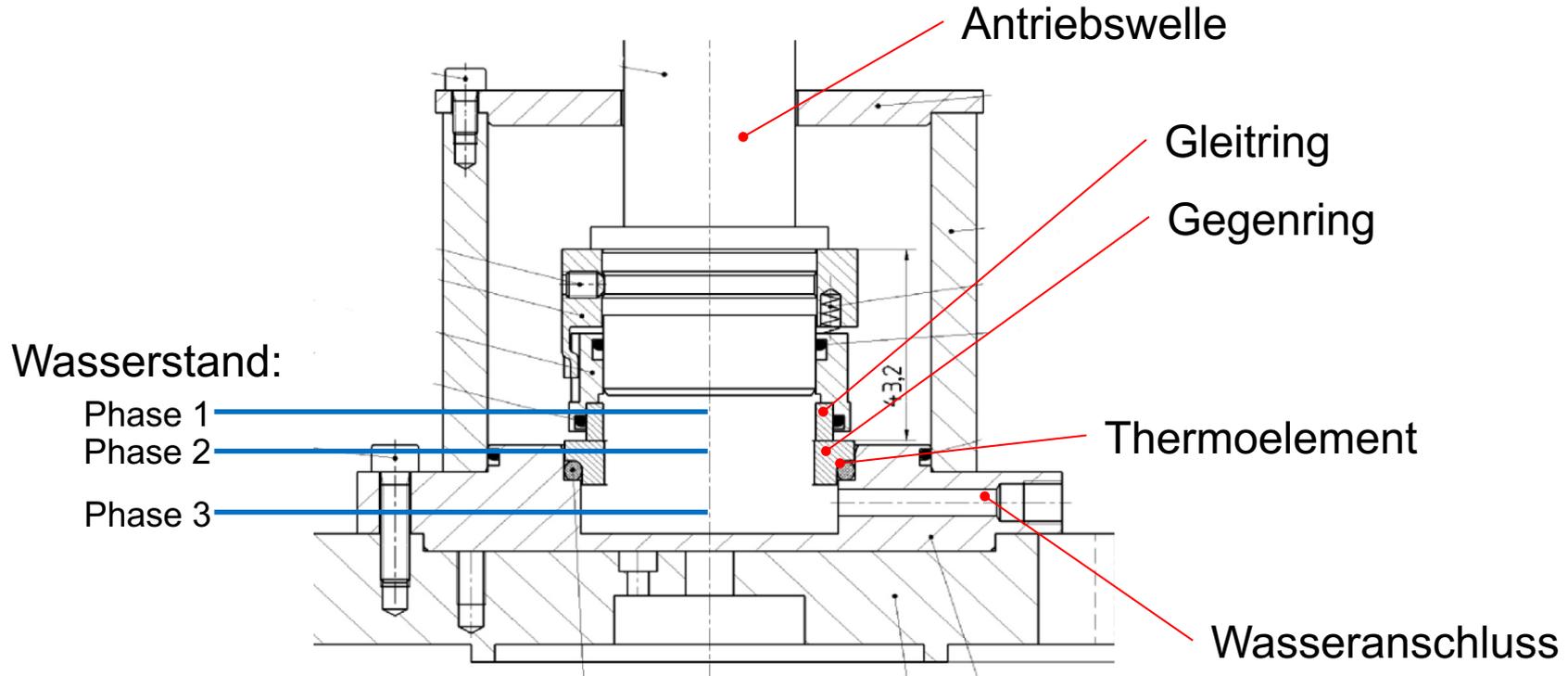
Typischer Betriebsbereich für Gleitringdichtungen, definiert durch EagleBurgmann.

Ergebnisse der Reihenuntersuchung



- Erwartungshaltung: eindeutiger Zusammenhang von Gümbelzahl zum Reibkoeffizienten.
- Sehr hohe Streubreite bei konstanter Gümbelzahl.
- Verhalten suggeriert Betrieb im Bereich hydrodynamischer Schmierung mit hoher Leckage.
→ Leckage am Prüfstand ist jedoch äußerst gering.

Aufbau des Tribometers

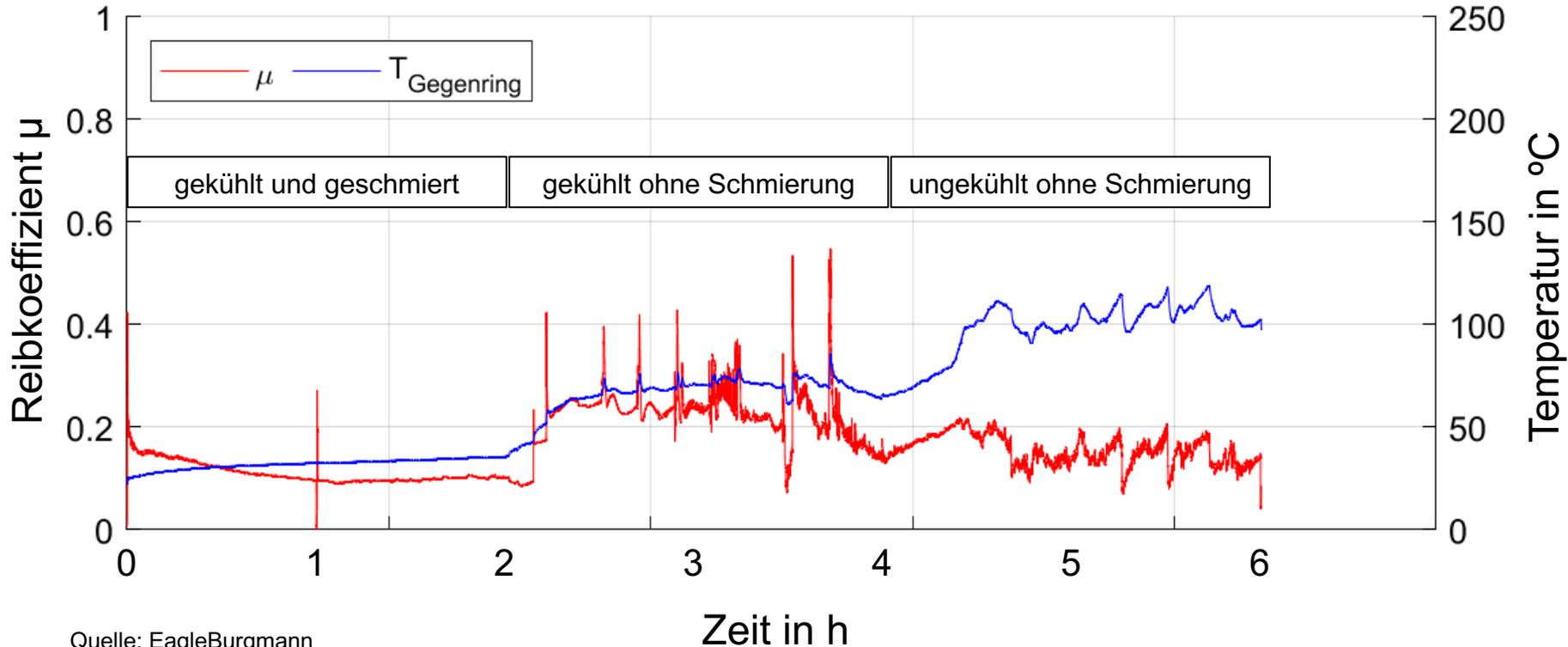


Quelle: EagleBurgmann

Test am Tribometer bei 3 verschiedenen Zuständen

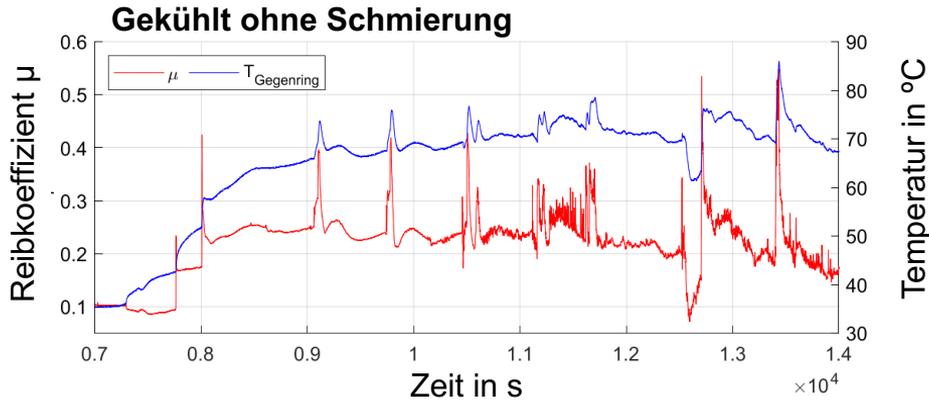
- Phase 1: Gegenring wird gekühlt, Dichtspalt im Wasser
- Phase 2: Gegenring noch gekühlt, Dichtspalt in Luft
- Phase 3: Wasser komplett abgelassen

Temperatur und Reibkoeffizient



Quelle: EagleBurgmann

Temperatur und Reibkoeffizient

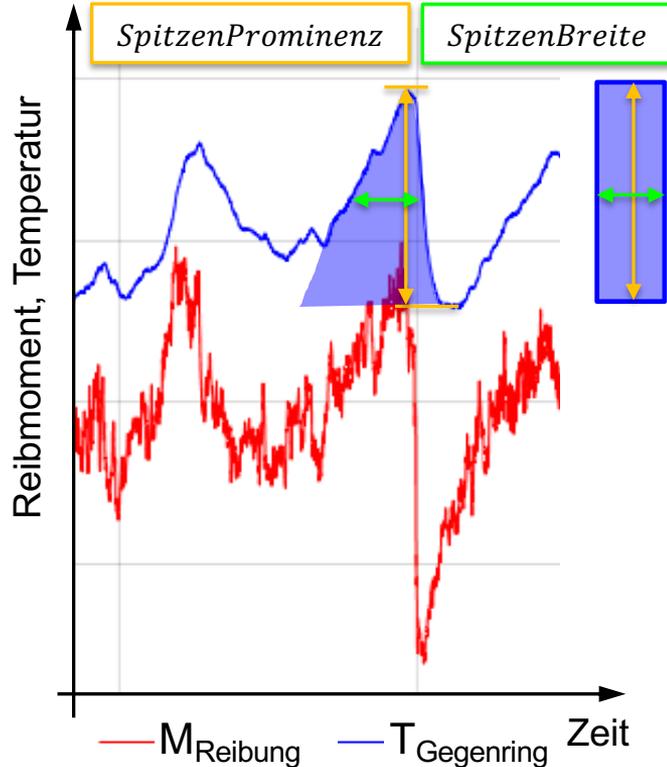


- Gute Korrelation zwischen den Signalspitzen im Reibungskoeffizienten und den Signalspitzen der Temperatur.
- Die Überwachung der Temperatur mit einem schnellen Messwertempfänger für Thermoelemente ermöglicht die Überwachung von Verschleißereignissen.
- Die Messmethode ist noch abhängig vom verwendeten Material für den Gegenring.



Quelle: EagleBurgmann

Analyse des Temperatursignals



$$W = \int_t M_{(t)} \cdot \omega_{(t)} dt \dots \text{Reibarbeit}$$

$$= \underbrace{\int_t M_{(t),Basis} \cdot \omega_{(t)} dt}_{\text{Basisreiarbeit, abhängig vom Reibungszustand}} + \underbrace{\int_t M_{(t),Spitze} \cdot \omega_{(t)} dt}_{\text{Verschleißarbeit, abhängig von jedem einzelnen Verschleißereignis}}$$

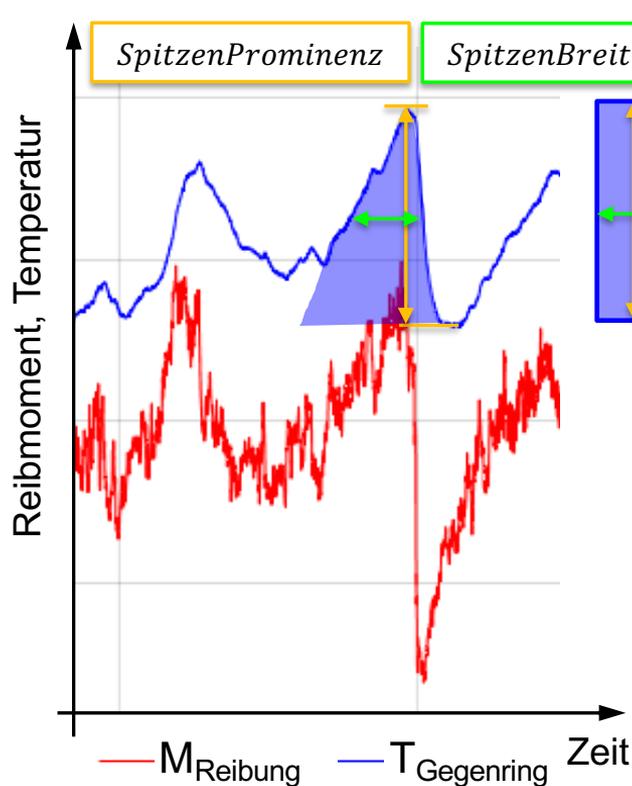
Basisreiarbeit, abhängig vom Reibungszustand

Verschleißarbeit, abhängig von jedem einzelnen Verschleißereignis

$$\int_t M_{(t),Spitze} \cdot \omega_{(t)} dt \sim \int_t P_{(t),therm,Spitze} dt$$

$$P_{(t),therm,Spitze} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T_{(t),Spitze}}{L} \quad (\text{lineare Wärmeleitungsgleichung})$$

Analyse des Temperatursignals



$$P_{(t),therm,Spitze} \sim T_{(t),Spitze}$$

$$\int_t P_{(t),therm,Spitze} dt \sim \int_t T_{(t),Spitze} dt$$

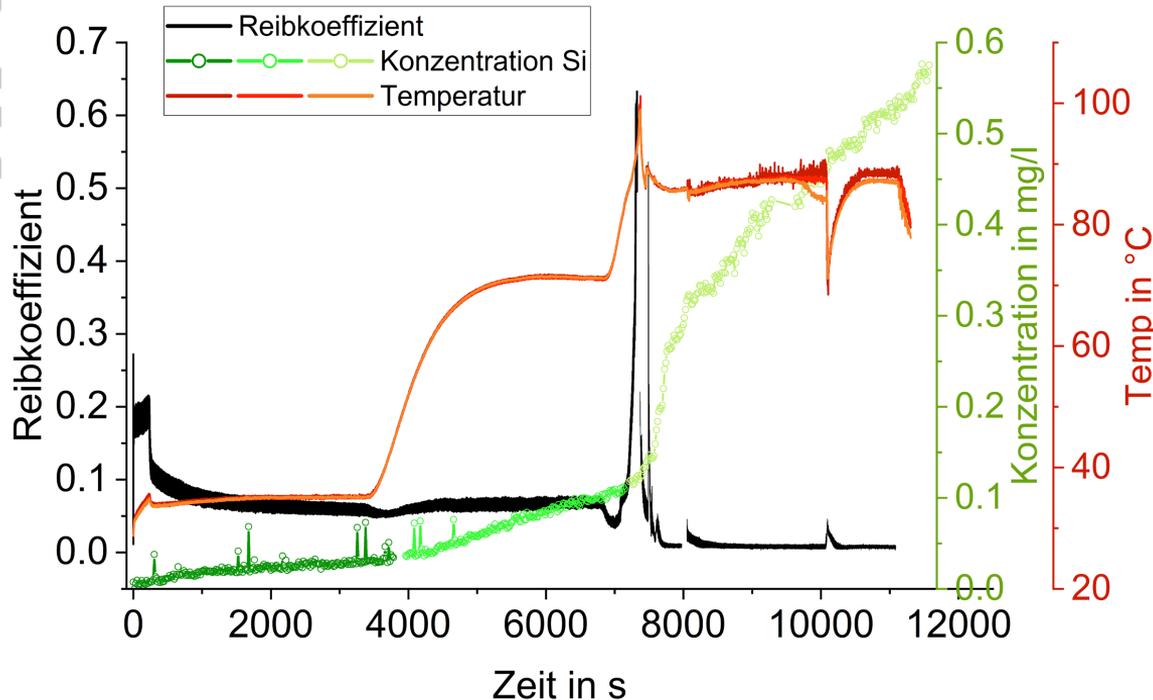
$$\int_t T_{(t),Spitze} dt \sim \text{SpitzenProminenz} \cdot \text{SpitzenBreite}$$

$$W_{Spitze} \sim \text{SpitzenProminenz} \cdot \text{SpitzenBreite}$$

“Die Verschleißarbeit ist proportional zum Produkt aus der Prominenz der Signalspitze und Breite der Signalspitze”

$$\text{VerschleißArbeitsÄquivalent} = \text{SpitzenProminenz} \cdot \text{SpitzenBreite}$$

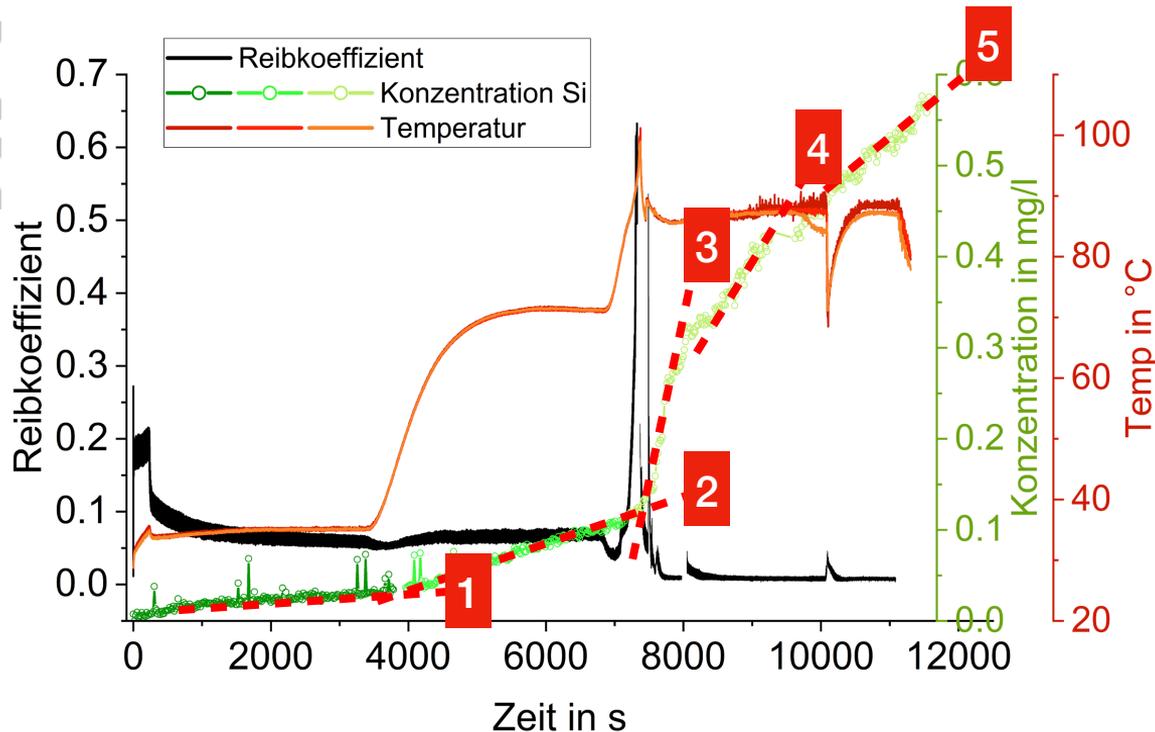
Verschleiß und Temperatursignal



- Konzentrationsmessung von Silizium:
„Concentration In Process – Optical Emissions Spectroscopy“ CIP-OES
- Entnahme des Wassers durch Kapillarleitungen, dadurch geringe zeitliche Verzögerung

Quelle: A. Kailer, G. Konrath, Fraunhofer IWM, 2023

Verschleiß und Temperatursignal



Tribometerversuch ohne Differenzdruck

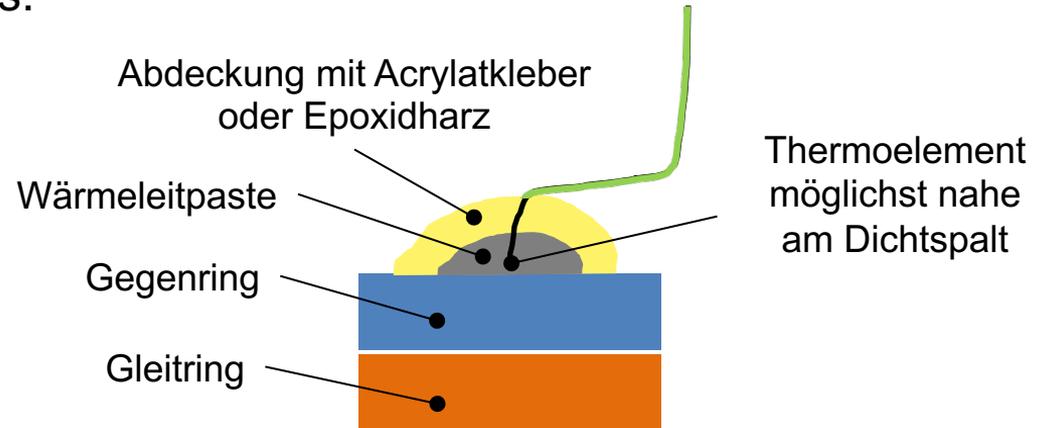
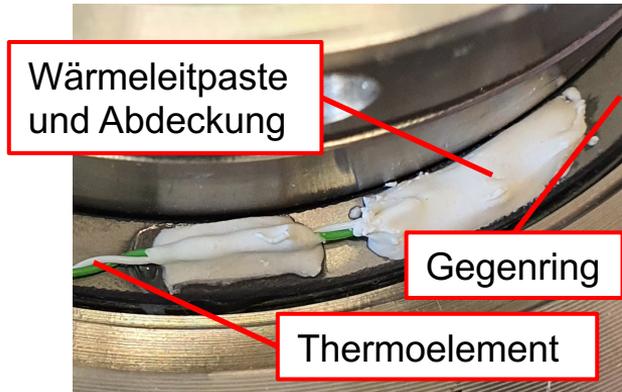
→ hohe Kontaktkraft und Verschleiß

#	dc/dt [mg/(Liter·Tag)]
1	0,5
2	2,0
3	27,6
4	11,7
5	5,0

Quelle: A. Kailer, G. Konrath, Fraunhofer IWM, J. Otschik 2023

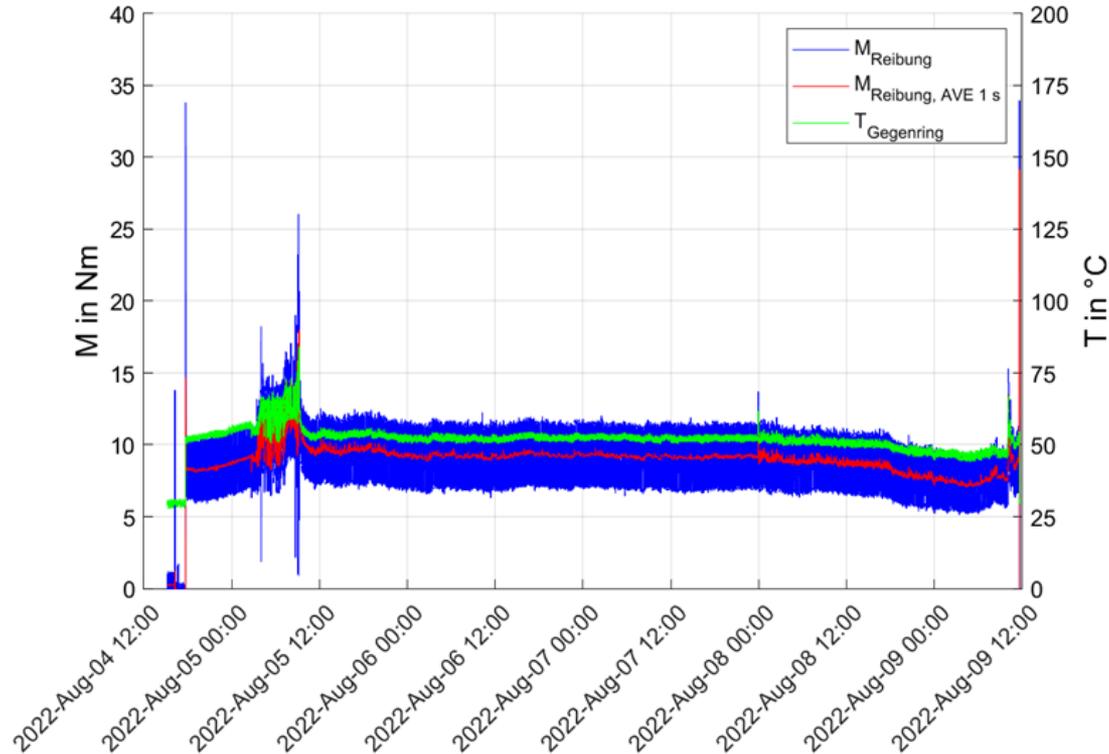
Versuche am Dichtungsprüfstand

- 1 + 5 Dauerversuche mit zwei Paaren von Dichtungsringen bei verschiedensten Betriebsbedingungen.
- Messung des Verschleißes des Gleitrings nach jedem Dauerversuch.
- Analyse des Temperatursignals zur Berechnung des Verschleißarbeitsäquivalents.



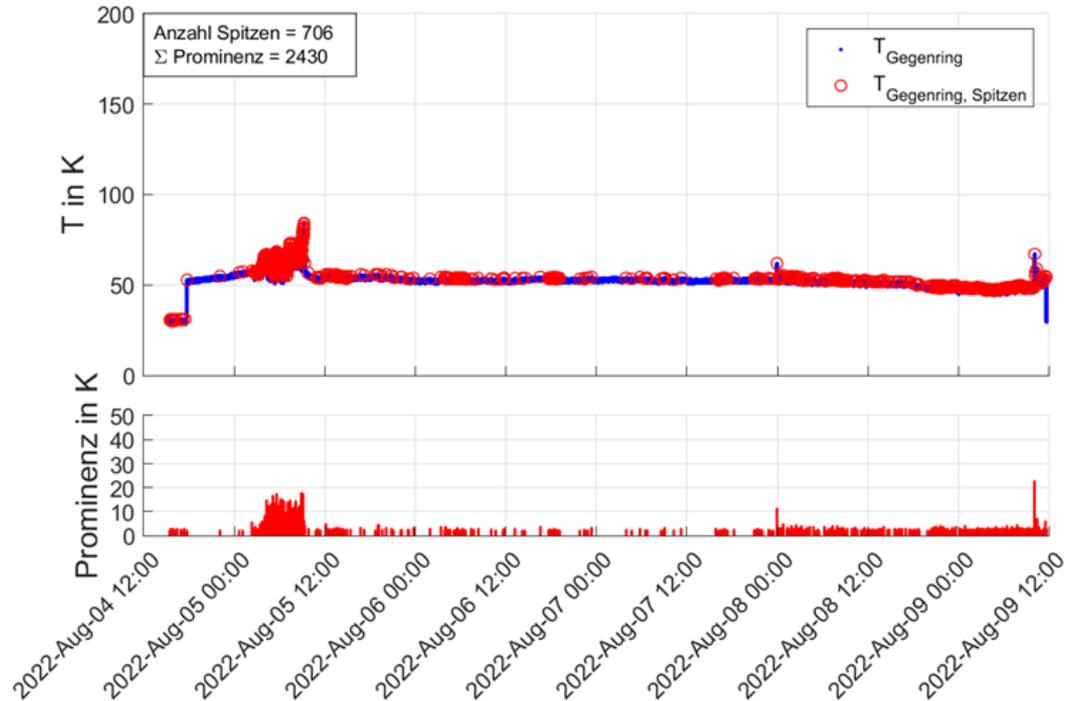
Reibmoment und Temperatur

Beispiel Dauerversuch Nr. 2



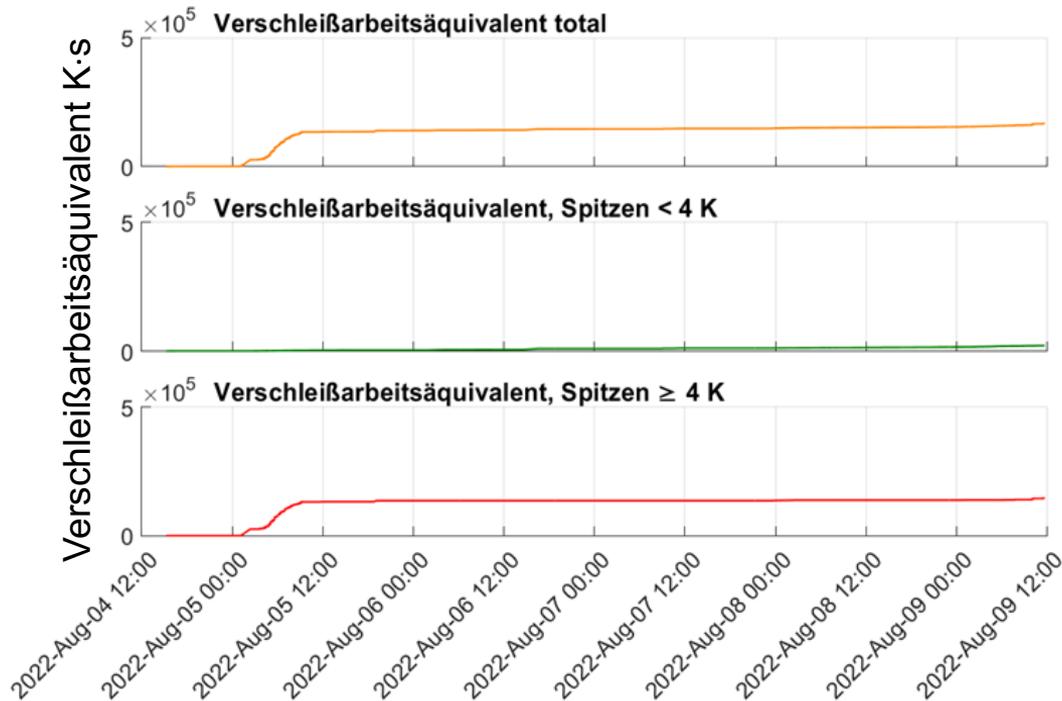
Signalspitzen im Temperatursignal

Beispiel Dauerversuch Nr. 2



Verschleißarbeitsäquivalent

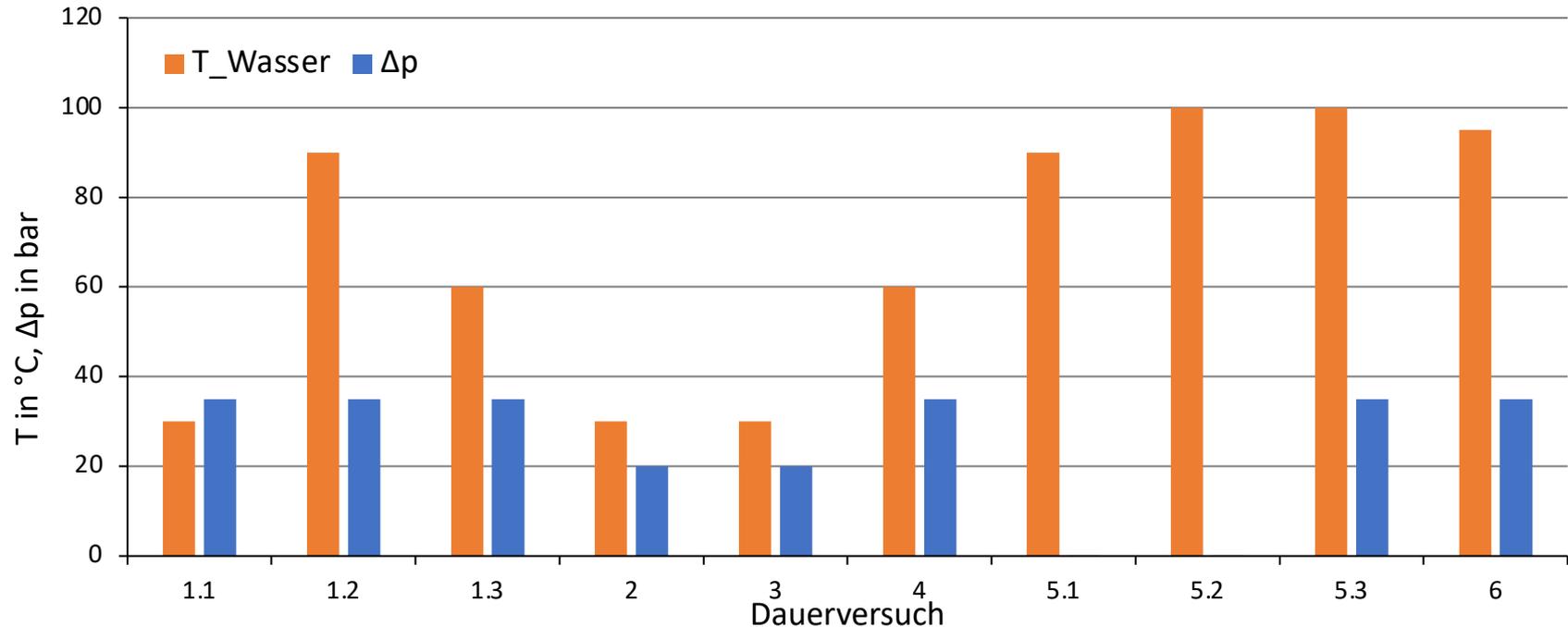
Beispiel Dauerversuch Nr. 2



Annahme:

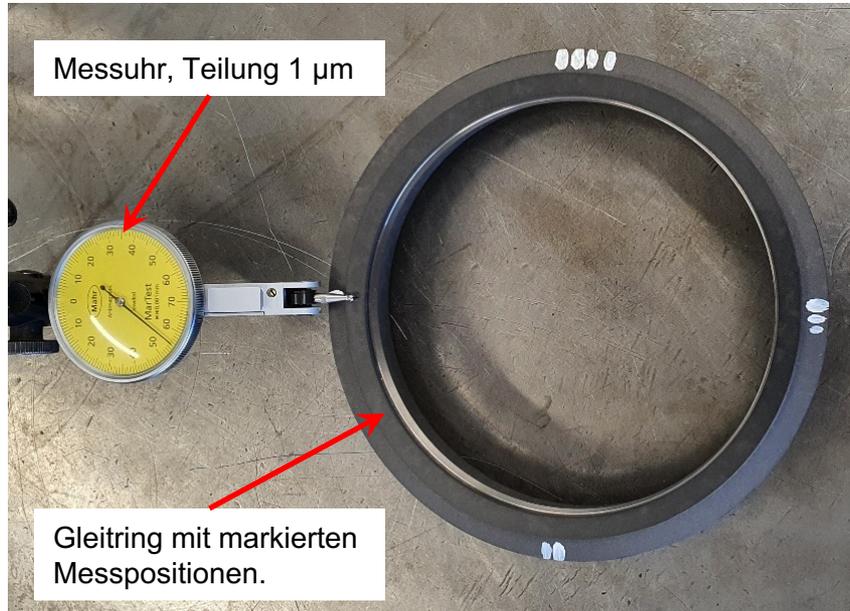
- Signalspitzen < 4 K
Amorphisierender Verschleiß,
Verschleißrate klein, erwartete
Lebensdauer wird erreicht.
- Signalspitzen ≥ 4 K
Grober Verschleiß.
- Grenze von 4 K abhängig von
Werkstoff und Anwendungsfall.

Betriebszustände der Dauerversuche 1 bis 6



$n = 1800 \text{ U/min}$

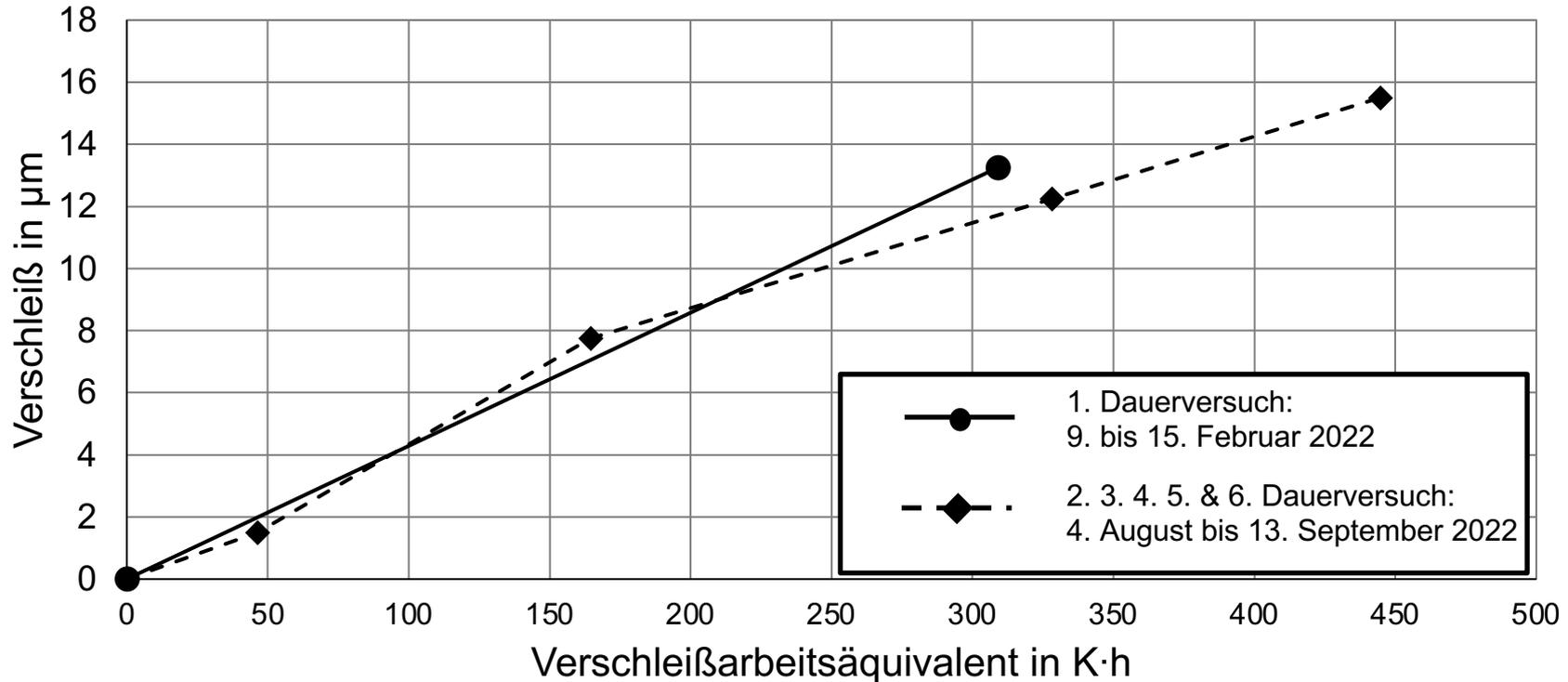
Vermessung der Gleitringhöhe aus Kohlegrafit



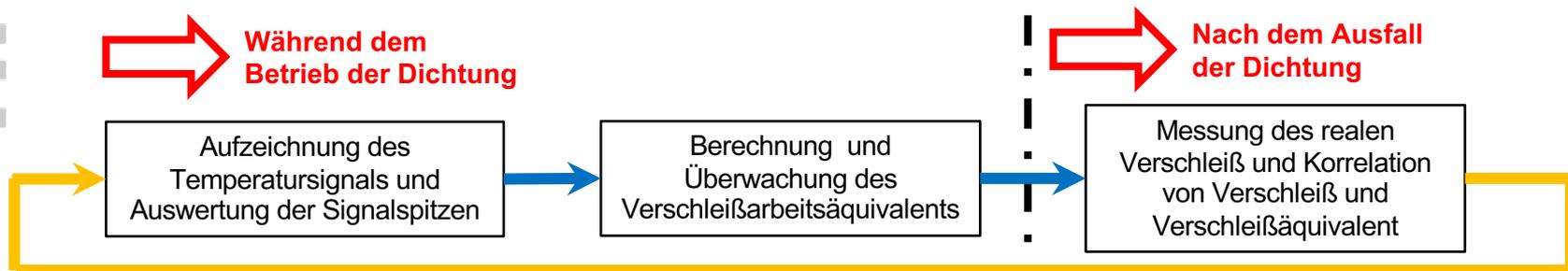
- Messung mittels Fühlhebelmessgerät, kalibriert mit Endmaßen.
- Kugel am Hebel erfasst mittlere Gleitringhöhe, keine Rillen.
- Ausgleich von Messchwankungen durch 10 Wiederholungen, Schwankungen im Bereich von $\pm 3 \mu\text{m}$.



Realer Verschleiß und Verschleißarbeitsäquivalent



Anwendung der schnellen Temperaturmessung für condition monitoring und predictive maintenance



- Nach dem Neustart kann ab der zweiten Dichtung die Überwachung genutzt werden.
- Der Anwender entscheidet wie hoch das Verschleißarbeitsäquivalent im Vergleich werden darf, um einen erneuten Tausch der Dichtung auszulösen. Es kann auch mit jedem Dichtungstausch gesteigert werden, beispielsweise 50%, 70%, 80%.
- Messung des realen Verschleiß nach jedem Tausch der Dichtung zur Verbesserung der Korrelation.
- Als Ergebnis mit jedem Tausch der Dichtung ergibt sich ein immer deutlicheres Bild, welches Verschleißäquivalent für einen zuverlässigen Betrieb maximal erreicht werden darf.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?