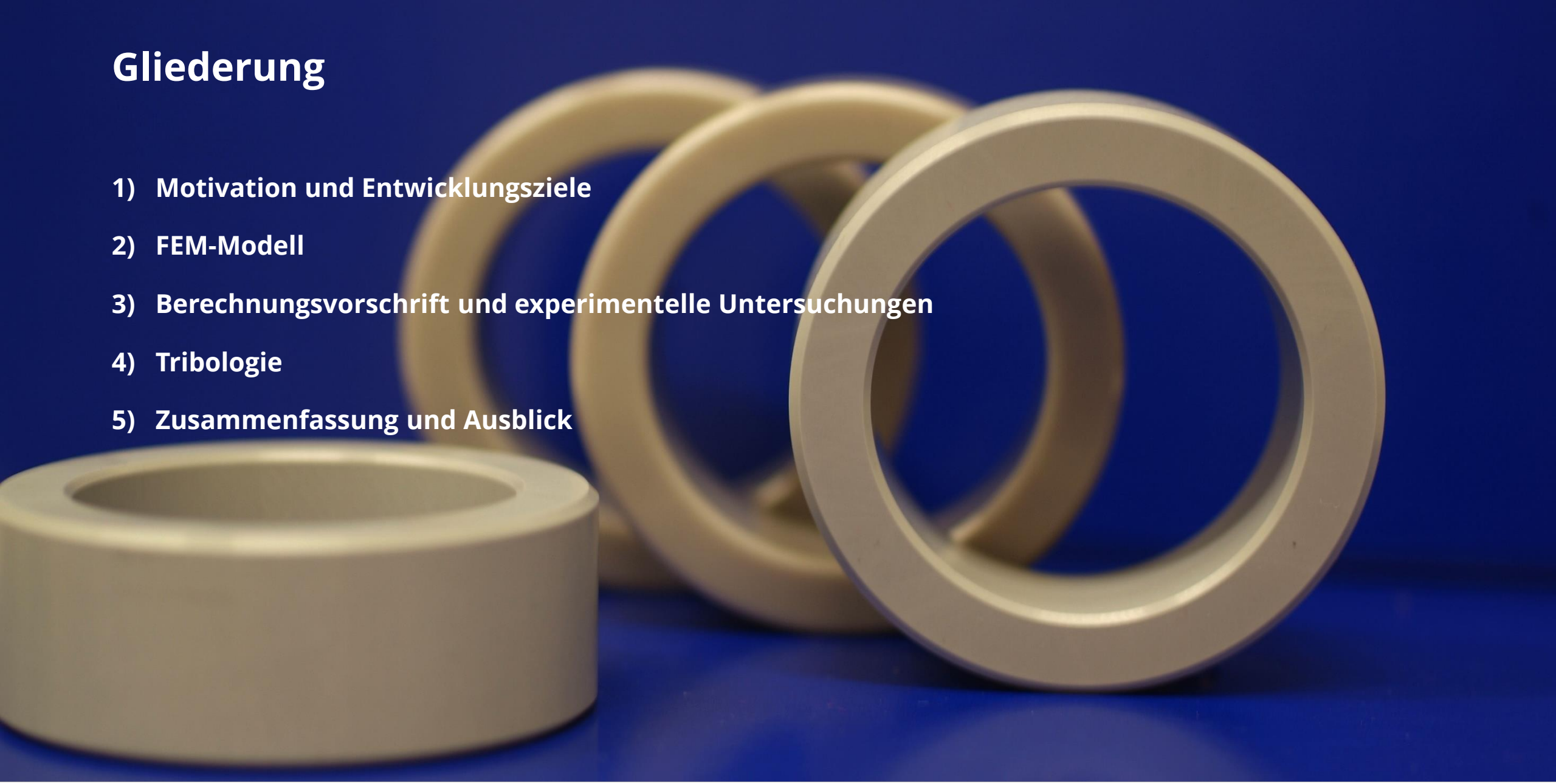
Dipl.-Ing. Christian Stentzel
Fakultät Maschinenwesen / Stiftungsprofessur für Baumaschinen

Beanspruchungsminimierung keramischer Gleitlager mit Hilfe der FEM

11. SAXSIM 2019 / Chemnitz / 26.03.2019

Gliederung



1) Motivation und Entwicklungsziele
2) FEM-Modell
3) Berechnungsvorschrift und experimentelle Untersuchungen
4) Tribologie
5) Zusammenfassung und Ausblick

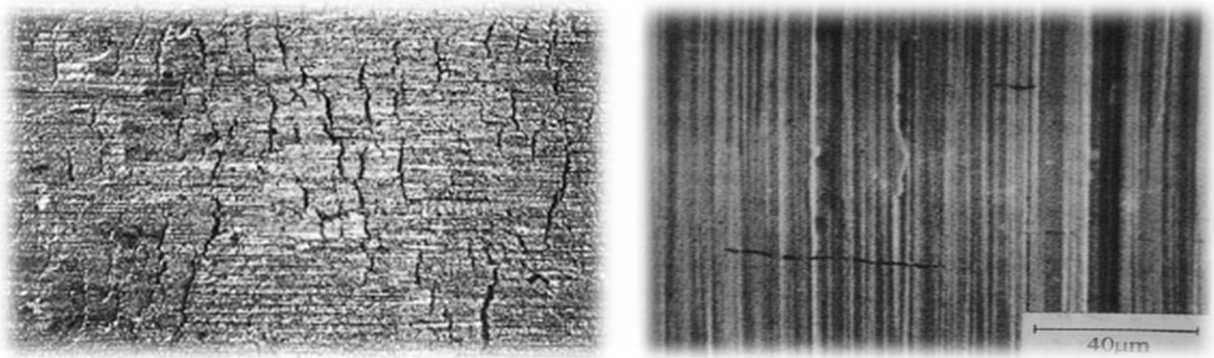
1) Motivation und Entwicklungsziele

Heutige Gleitlager im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen

- **oszillierender Bolzen** (Festkörper- und Grenzreibung)
- Stahl/Stahl, Stahl/Bronze, Stahl/PTFE
  - → **keine Wartungsfreiheit** (manuelle Nachschmierung oder Zentralschmieranlagen)
  - → Kantentragen und Verschleiß
  - → **Umwelteintrag** und Verschmutzung durch „Fettdichtung“
  - → eingeschränkte Betriebsbedingungen
  - → Gefahr des Abreißens von Schmierschläuchen und „Trockenlaufen“ der Lagerstellen

Mechanische und tribologische Schäden

- Kantentragen → Zone der Verschleißhochlage bis hin zum plastischen Fließen
- Riefenbildung, Grübchenbildung (Oberflächenzerrüttung), Warmrissbildung
- tribochemische Reaktion, Adhäsion

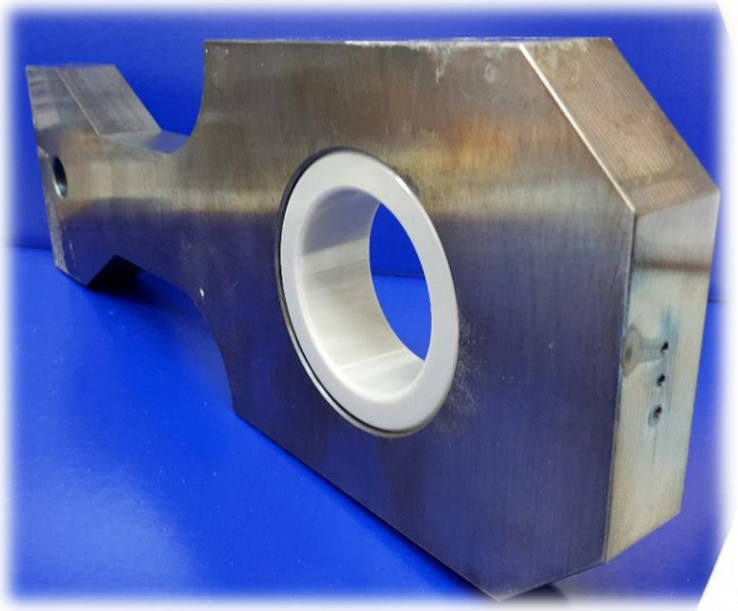


1) Motivation und Entwicklungsziele

Entwicklungsziele

- Entwicklung **wartungsfreier Gleitlager** für mobile und stationäre Anwendungen auf Basis **keramischer Werkstoffe**
- keine zyklischen Nachschmierungen (manuell oder Zentralschmieranlage)
- kein Umwelteintrag von Schmiermittel (keine verschmutzten Maschinenteile)
- Vereinfachung des Reparatursystems
- statische und dynamische Tragfähigkeit bis mindestens 150 N/mm²; oszillierender Bolzen (v < 0,2 m/s)

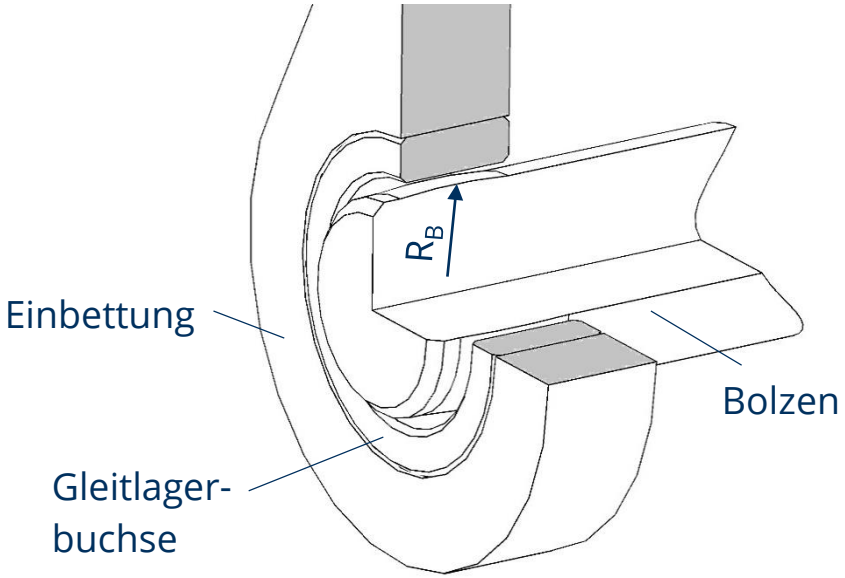
→ **keramikgerechtes Design**
→ hohes Potenzial zur **Verschleißreduktion** durch keramische Werkstoffe gegeben
→ Parität zwischen Maschinen- und Gleitlagerlebensdauer
→ keine Fett- oder Ölschmierung (fluidfreies System) → **Festschmierstoff z.B. MoS_2**



2) FEM-Modell

Randbedingungen, Modell, Parameterstudien

2) FEM-Modell
- Randbedingungen -

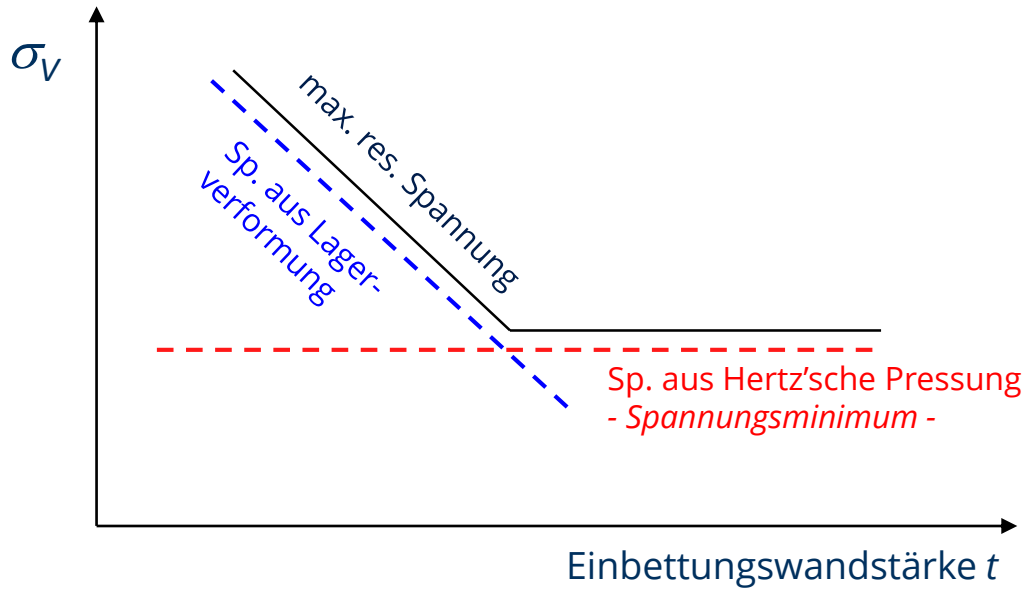


<u>Zwei Beanspruchungsursachen</u>

a) Hertz'sche Pressung

b) Lageraugenlängung/Ovalisierung

- unterer Spannungsgrenzwert durch Hertz'sche Pressung gegeben → **„Spannungsminimum"**



2) FEM-Modell
- Randbedingungen -

- Betrachtung klassischer Koppelstangen- und Armverbindungen
- Definition von zwei Lastschritten und Betrachtung folgender Parameter:

Montagezustand

a) Rundheitstoleranz
b) Zylindrizität

Montagezustand + Belastung

a) Einbettungswandstärke *t*
b) Bauform der Einbettung t_{11}, t_{12}, t_2, *w*, *f*, *a*
c) Balligkeitsradius R_B
d) Buchsenwandstärke t_{Bu}
e) Lagerluft D_z
f) Materialstudie *E*
g) Durchmesser *d*
h) Belastung F_L
i) Zusätzliche axiale Einspannung

→ Hertz'sche Pressung, Kontaktfläche, Buchsenspannungen, Einbettungsspannungen, Verformungen, Lagerluft etc.

Ø*d* [mm]	*p* [N/mm²]	*F* [kN]
40	50	40
	100	80
	150	120
60	50	90
	100	180
	150	270
80	50	160
	100	320
	150	480

2) FEM-Modell

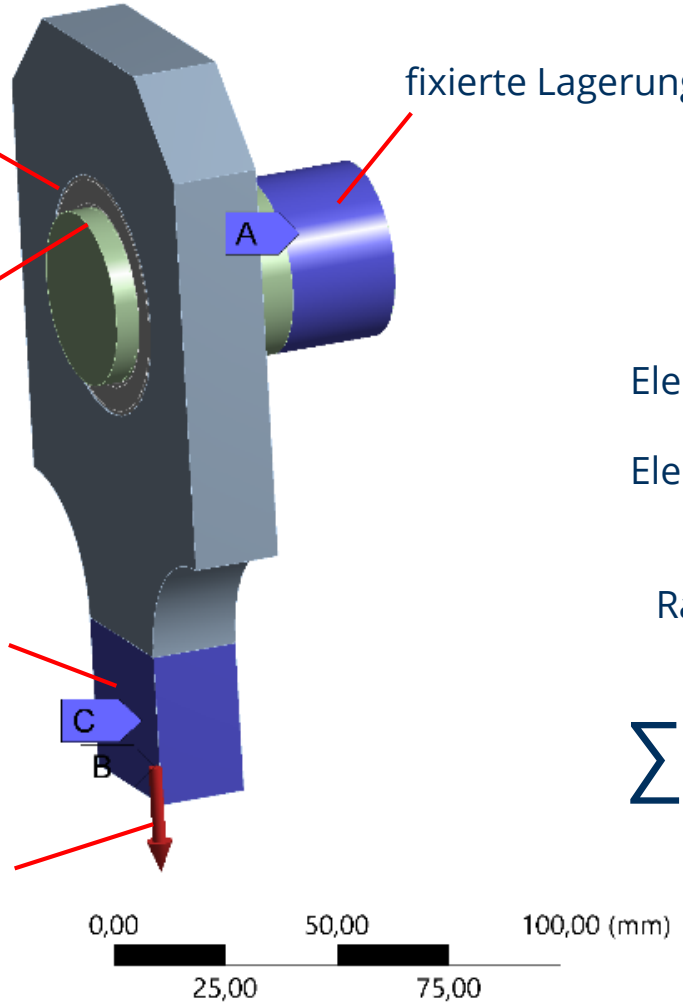
reibungsbehafteter Kontakt
(negativer Offset → Pressverband)

reibungsfreier Kontakt
(offener Kontakt)

reibungsfreie Lagerung

Lagerbelastung

fixierte Lagerung

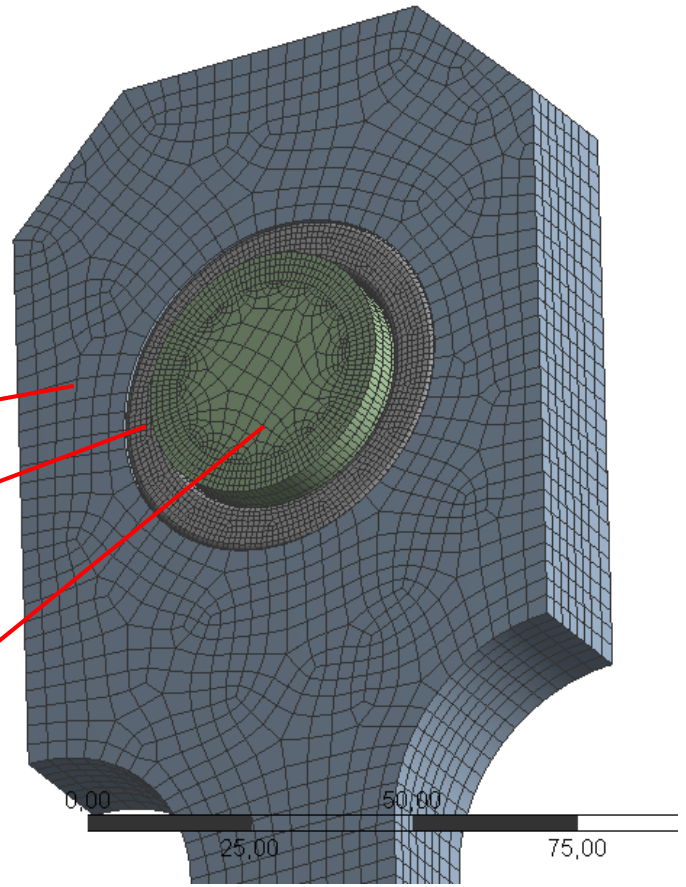


Elementgröße 3 mm

Elementgröße 1 mm

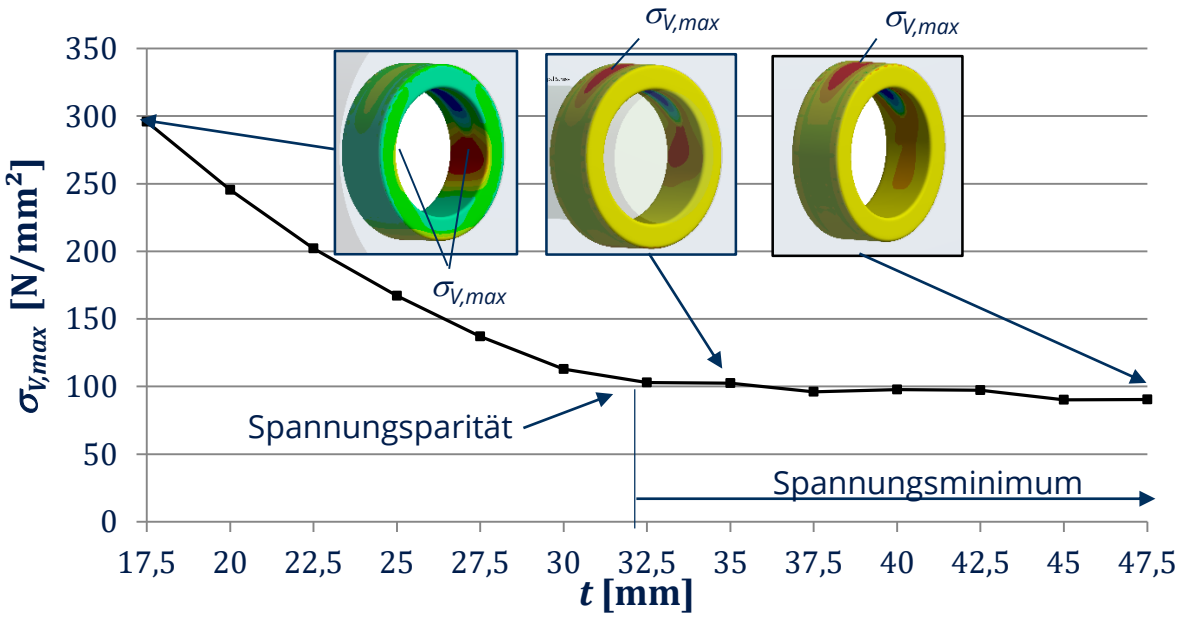
Randbereich 1 mm
Kern 3 mm

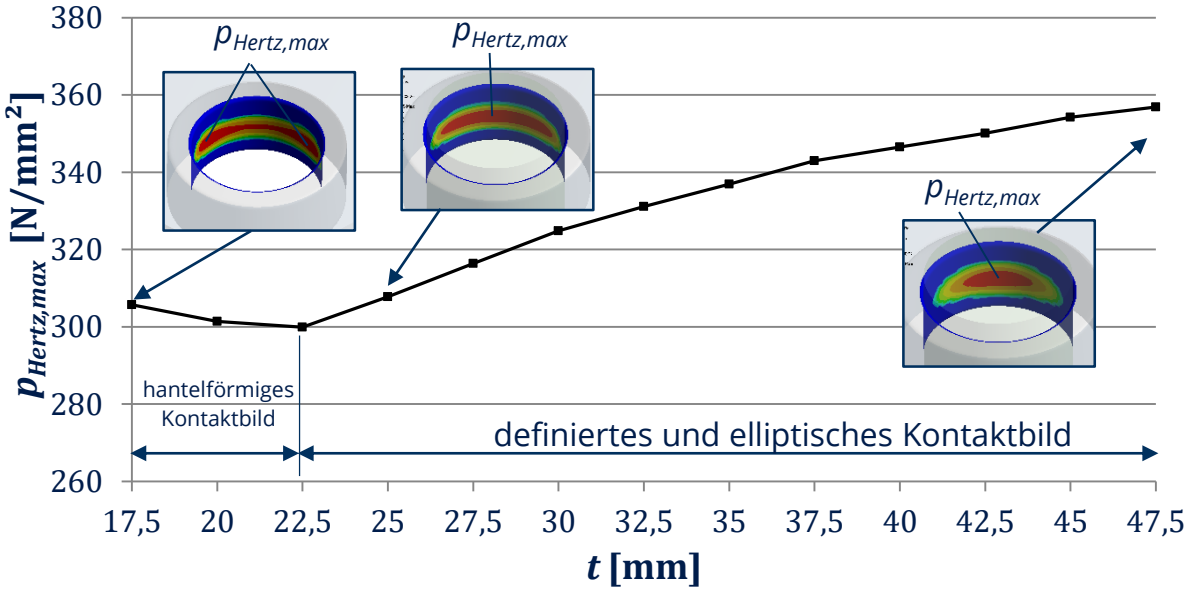
∑ 60.100 Elemente
268.861 Knoten



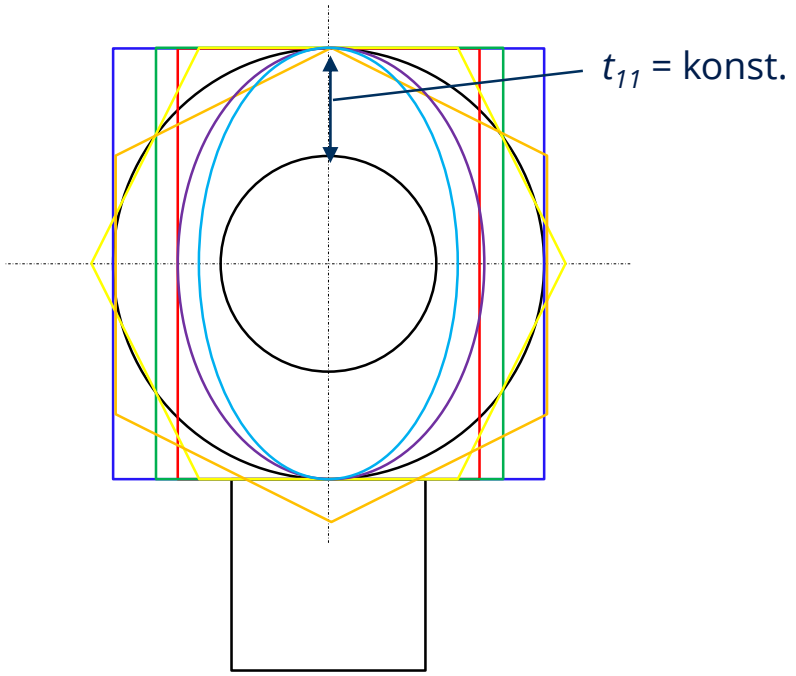
2) FEM-Modell
- Parameterstudien -

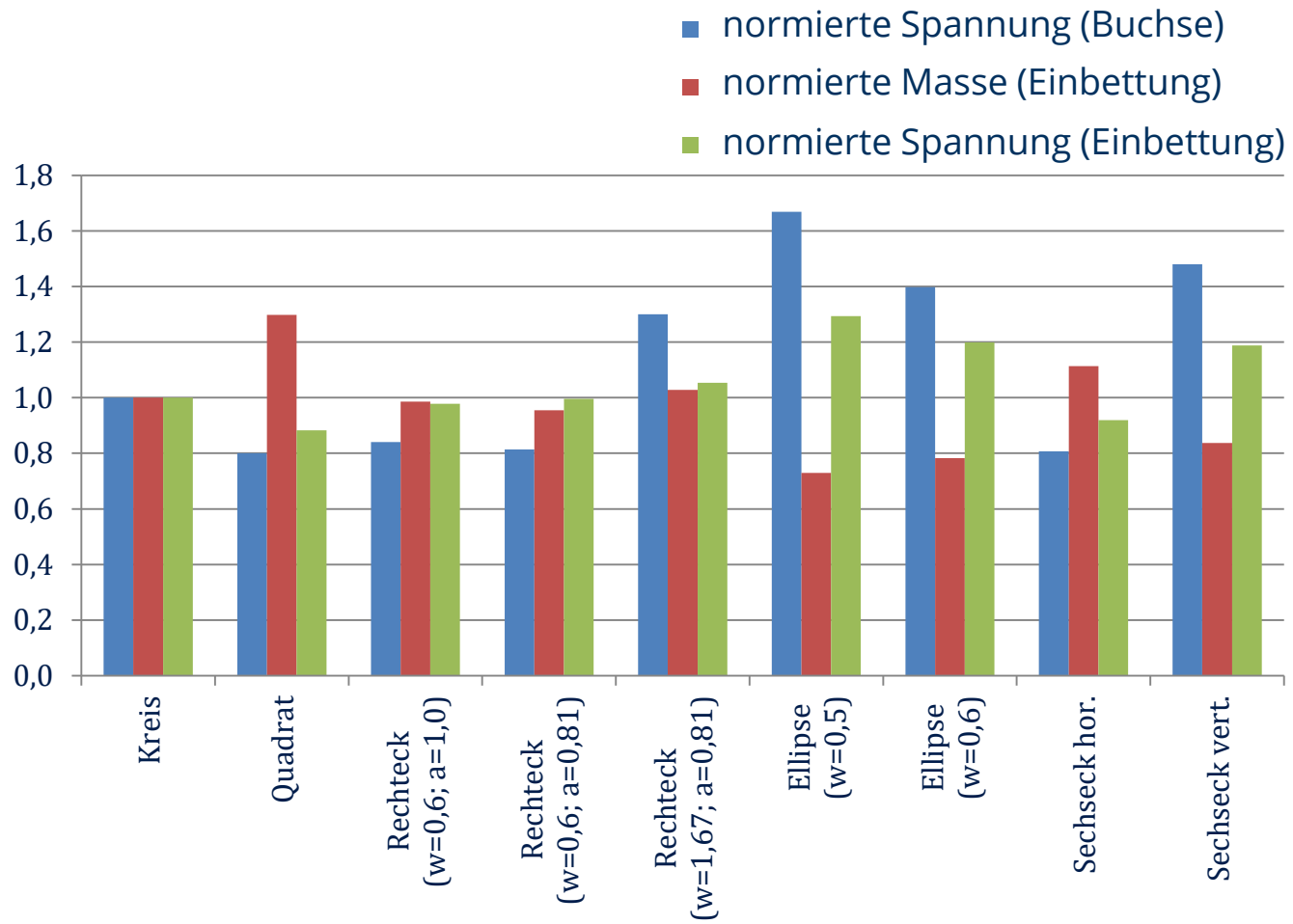
F_{max} = 80 kN
p = 100 N/mm²
d_{nenn} = 40 mm
B/d = 0,5





2) FEM-Modell
- Parameterstudien -

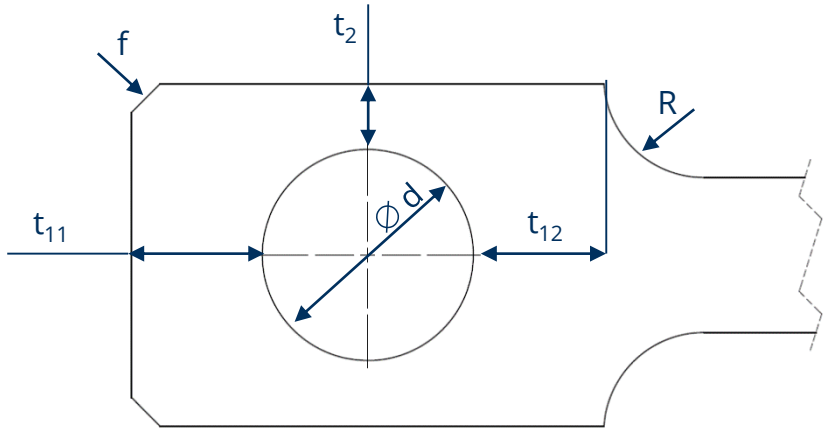




- Vergleichsbasis bildet das ***Spannungsminimum*** der klassischen kreisrunden Bauform
- Ziele: 1) geringe Buchsenspannung
  2) geringe Einbettungsmasse
  3) geringe Einbettungsspannung

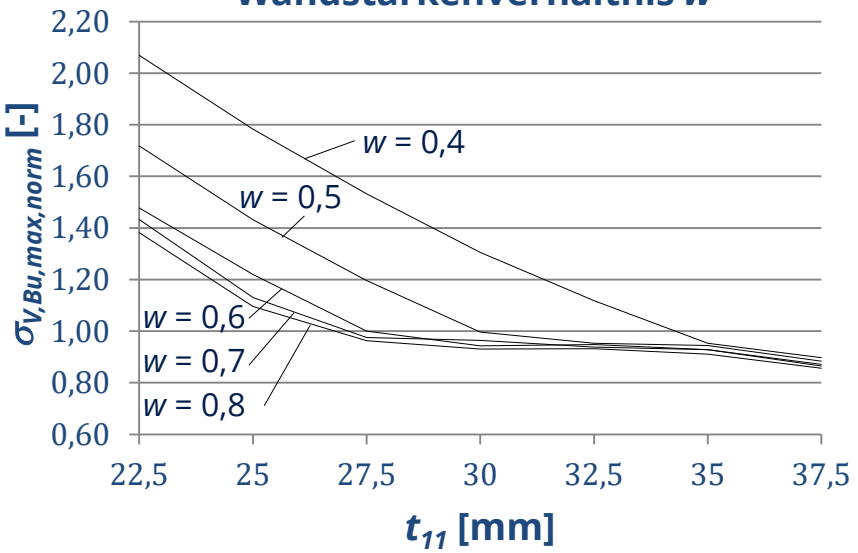
2) FEM-Modell
- Parameterstudien -

F_{max} = 80 kN
p = 100 N/mm²
d_{nenn} = 40 mm
B/d = 0,5

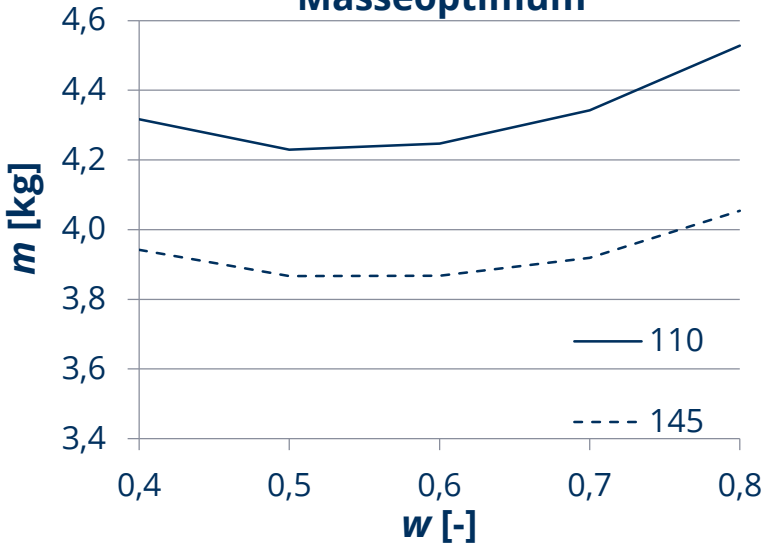


Ød	Durchmesser Lagerauge
t_{11}	stangenabgewandte Wandstärke
t_{12}	stangenzugewandte Wandstärke
t_2	Wandstärke zur Breite
F	Fase
R	Radius
$w = t_2/t_{11}$	Wandstärkenverhältnis
$a = t_{12}/t_{11}$	Asymmetrieverhältnis

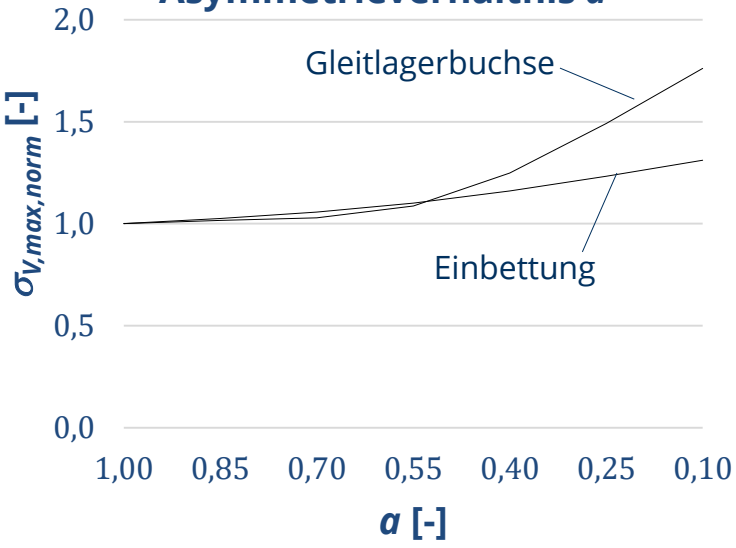
Wandstärkenverhältnis *w*



Masseoptimum

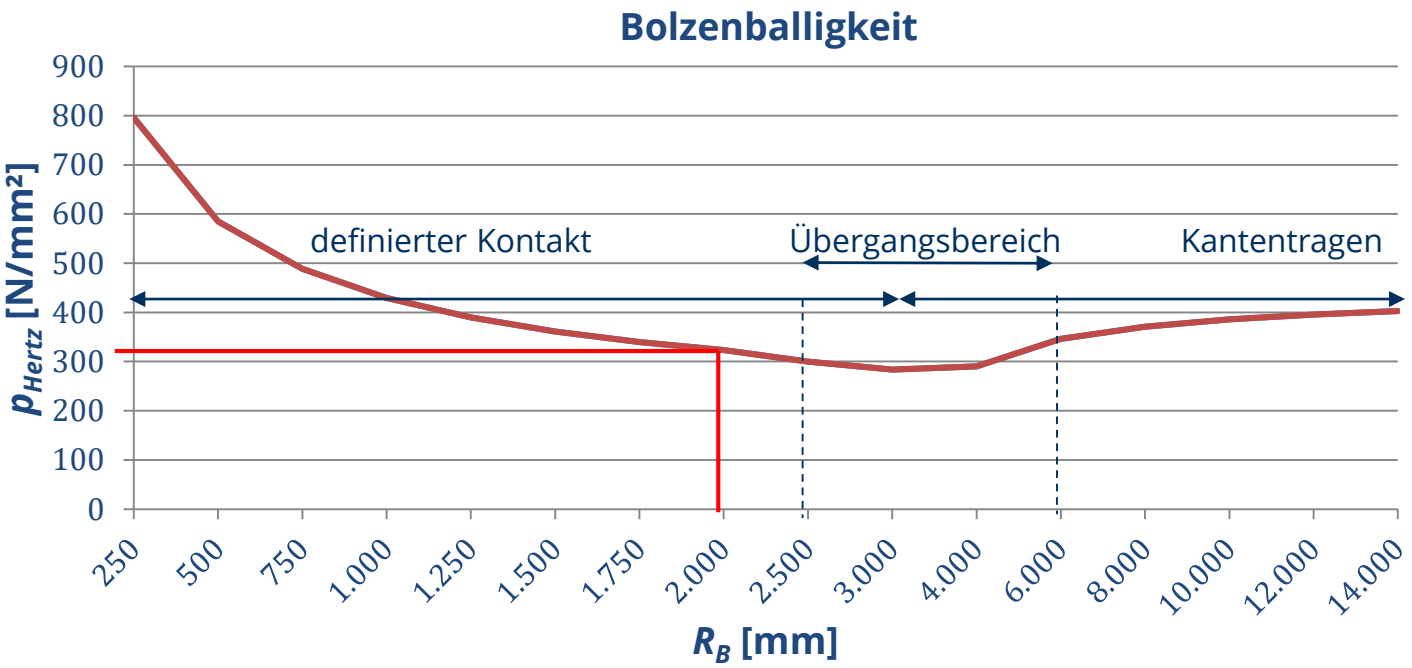


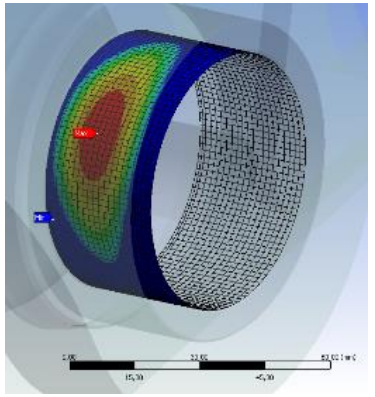
Asymmetrieverhältnis *a*



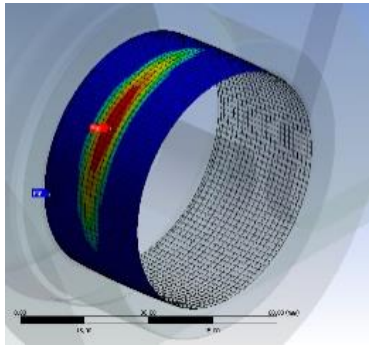
→ Spannungsreduzierung bis *w* = 0,6 sinnvoll
→ Masseoptimum bei *w* = 0,5 bis 0,6
→ Asymmetriverhältnis bis *a* = 0,8 tolerabel

2) FEM-Modell
- Parameterstudien -

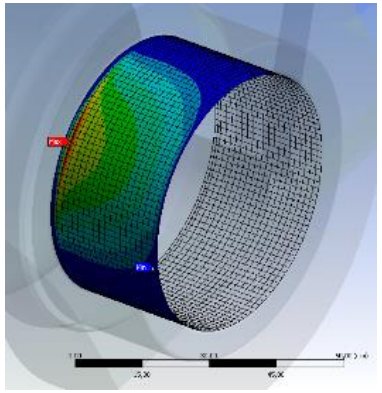




R_B = 2.000 mm



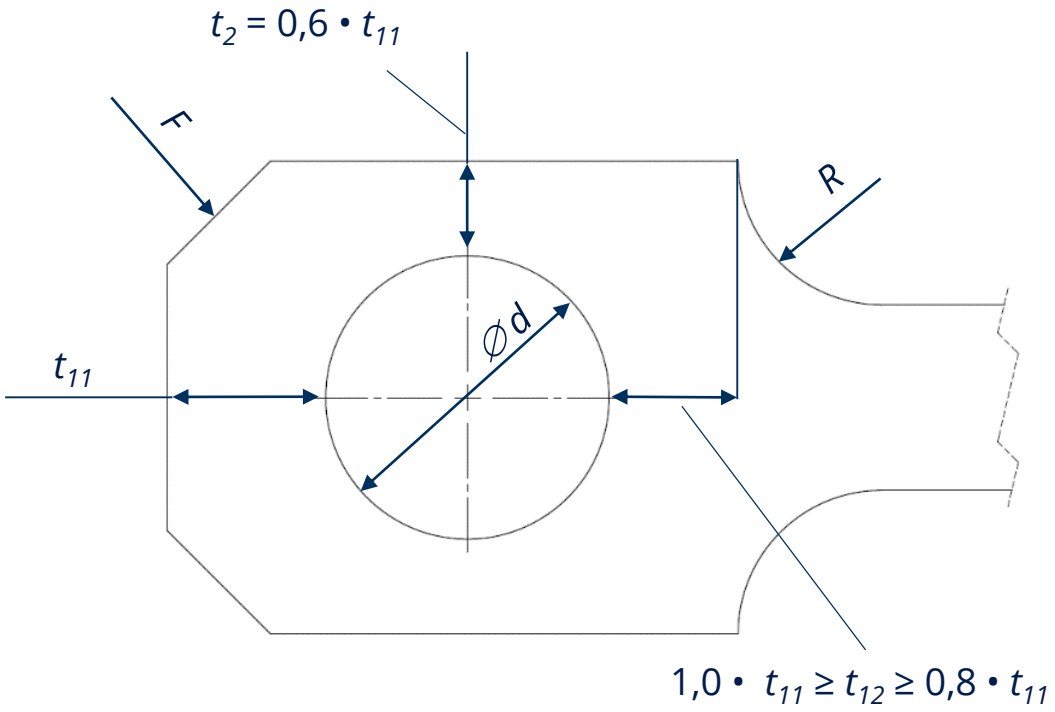
R_B = 250 mm

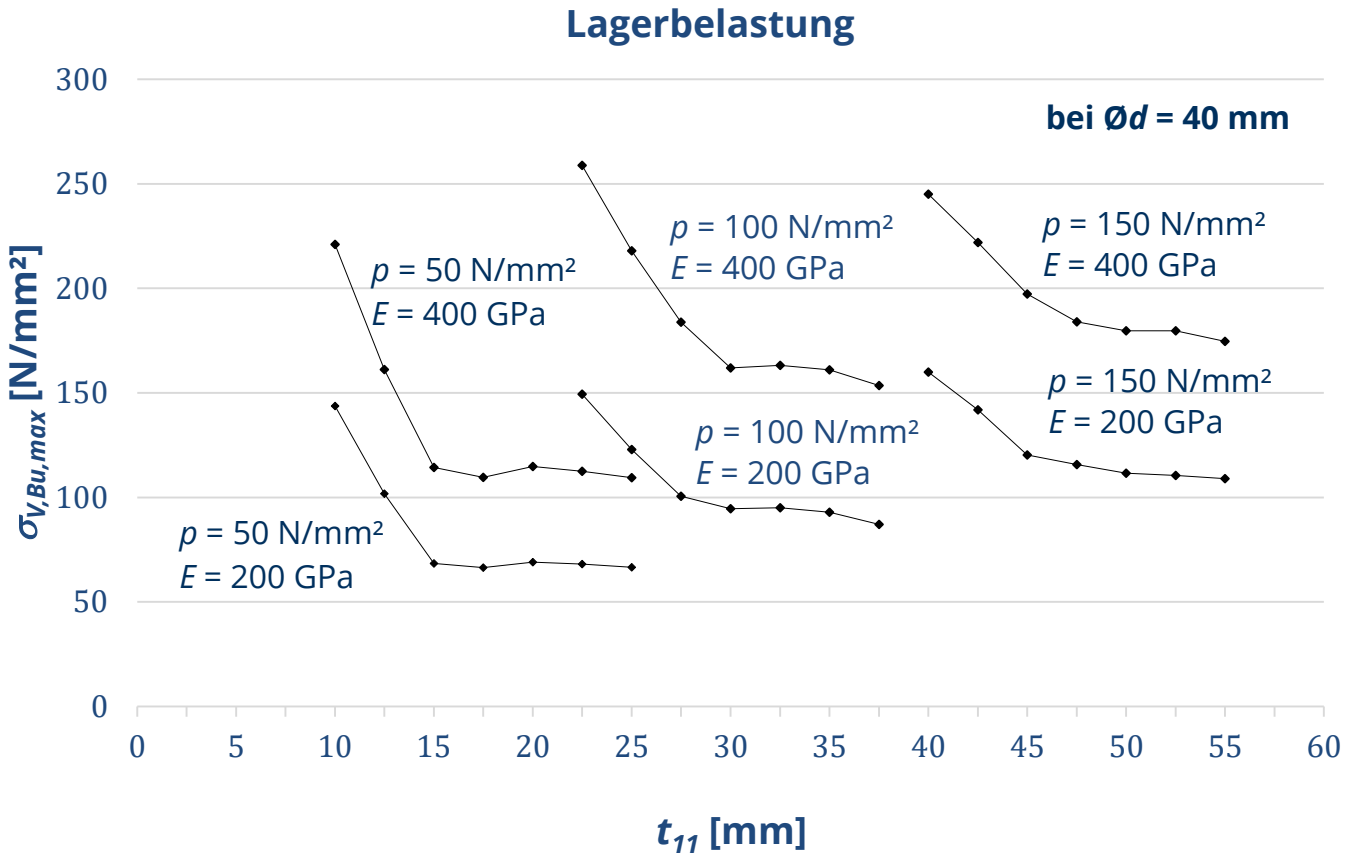


R_B = 14.000 mm

→ definiertes Kontaktbild unter Last durch Bolzenballigkeit
→ Keramikbeanspruchung entscheidend beeinflusst
→ Bolzenballigkeit auf R_B = 2.000 mm für d = 40 mm festgelegt

2) FEM-Modell
- Parameterstudien -





→ Basis für die Berechnungsvorschrift

3) Berechnungsvorschrift und experimentelle Untersuchungen

3) Berechnungsvorschrift und experimentelle Untersuchungen

Ziele und Voraussetzungen

- rein elastische Beanspruchung des keramischen Werkstoffes
- Verwendung des keramischen Werkstoffes Si_3N_4
- Beanspruchung des keramischen Werkstoffes nach dem Kriterium des ***Spannungsminimums***
- *Gültigkeitsbereich:* $40 \leq Ød \leq 80$ *mm (B/d = 0,5)*
  $50 \leq p \leq 150$ *N/mm²*

1)	Bestimmung der Maximalkraft	F_{max}
2)	Tribologische Lebensdauer	$s = f$ *(p, v, Tribologiesystem)*
3)	Bolzenfestigkeit	gegen Biege-, Scher- und Schubspannungen
4)	Bolzenballigkeit	$R_B = f$ *(B, d, F)*
5)	Pressverbindung (Quer- oder Längs)	DIN 7190
6)	Einbettungsauslegung	t_{11}, t_{12}, t_2, *w, a, f*
7)	Einbettungsfestigkeit	FEM; S_F

3) Berechnungsvorschrift und experimentelle Untersuchungen

Experimenteller Nachweis

- statische Tragfähigkeit
- dynamische Tragfähigkeit ($N = 10^6$)

Einfluss der Laststufen/Beanspruchung (Koppelstange)

p [N/mm²]	f_L [Hz]	Lastzyklen	
		ZrO_2	Si_3N_4
50	2	≈ 10^6	≈ 10^6
112	2	≈ 10^6	≈ 10^6
150	2	-	-

Durchläufer;
keine Risse erkennbar

Risse am Zirkoniumdioxid ZrO_2

Einfluss der Lastfrequenz (Armverbindung)

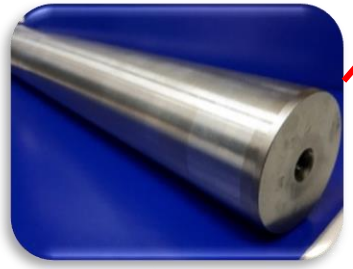
p [N/mm²]	f_L [Hz]	Lastzyklen	
		ZrO_2	Si_3N_4
100	5	≈ 10^6	≈ 10^6
100	10	≈ 10^6	≈ 10^6
75	12,5	≈ 10^6	≈ 10^6

Si_3N_4 → Durchläufer
ZrO_2 → minimale Rissbildung

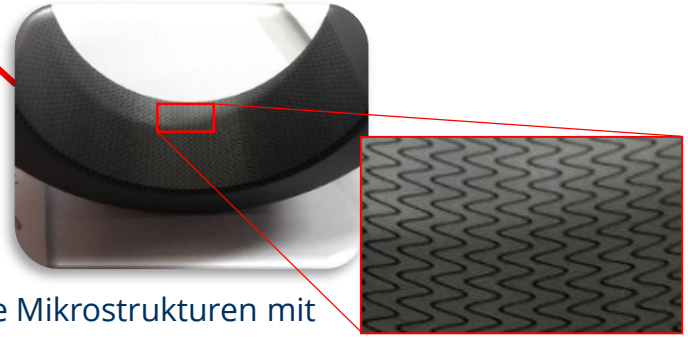
4) Tribologie

4) Tribologie

Balliger Stahlbolzen (42CrMo4)
d = 40 mm
Balligkeitsradius R_B = 1.000 mm
R_a = 0,4…0,6 µm
HV ~ 700
Hartverchromung an Gleitflächen
Schichtdicke 88 bis 115 µm



Keramische Gleitlagerbuchse
d = 40 mm
B = 20 mm
R_z = 1…3 µm
HV_{10} ~ 1.350
Si_3N_4 (isostatisch gepresst und geschliffen)



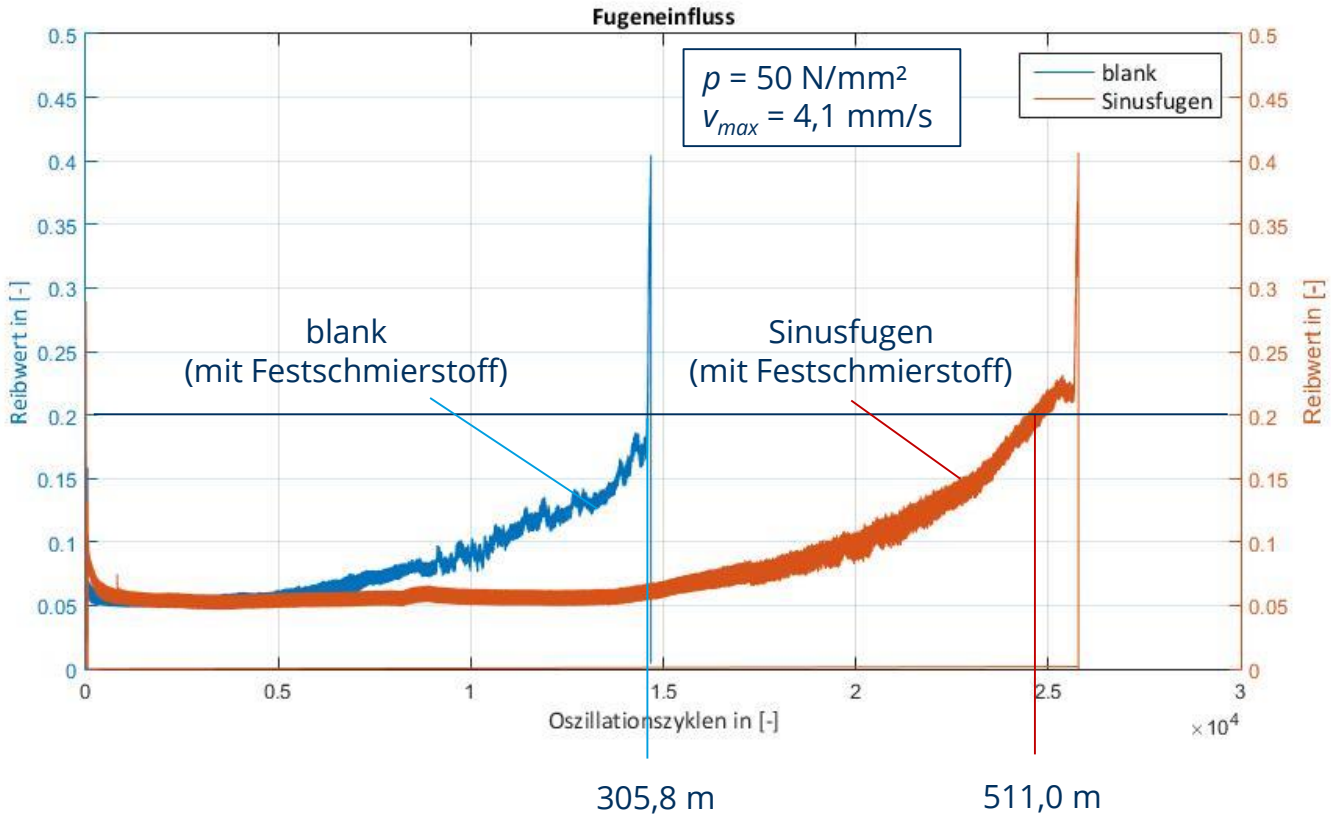
verschiedene Schmierdepotkonfigurationen (gelaserte Mikrostrukturen mit MoS_2 gefüllt) auf Bolzen oder Buchse

geschlossenes Tribologiesystem
offenes Dichtungssystem

- Richtwerte für ein ungeschmiertes Gleitsystem von M. Woydt (Bundesanstalt für Materialforschung - BAM):

$$k = \frac{W_v}{F_N * s} < 10^{-6} \frac{mm^3}{N * m} \qquad \mu = \frac{F_F}{F_N} < 0{,}2$$

4) Tribologie



Flächenpressung	Reibphasen-verlängerung
1. Phase (μ ≤ 0,06)	+179,6 %
2. Phase (μ ≤ 0,08)	+110,1 %
3. Phase (μ ≤ 0,10)	+78,1 %
4. Phase (μ ≤ 0,15)	+66,4 %
5. Phase (μ ≤ 0,20)	+67,1 %
6. Phase (μ ≤ 0,25)	-

→ sinusförmige Mikroschmierfugen bewirken eine Lebensdauerverlängerung um + 67,1% bezogen auf den Gleitweg

→ besonders die niedrigen Reibphasenanteile werden verlängert (um bis zu +179,6 %)

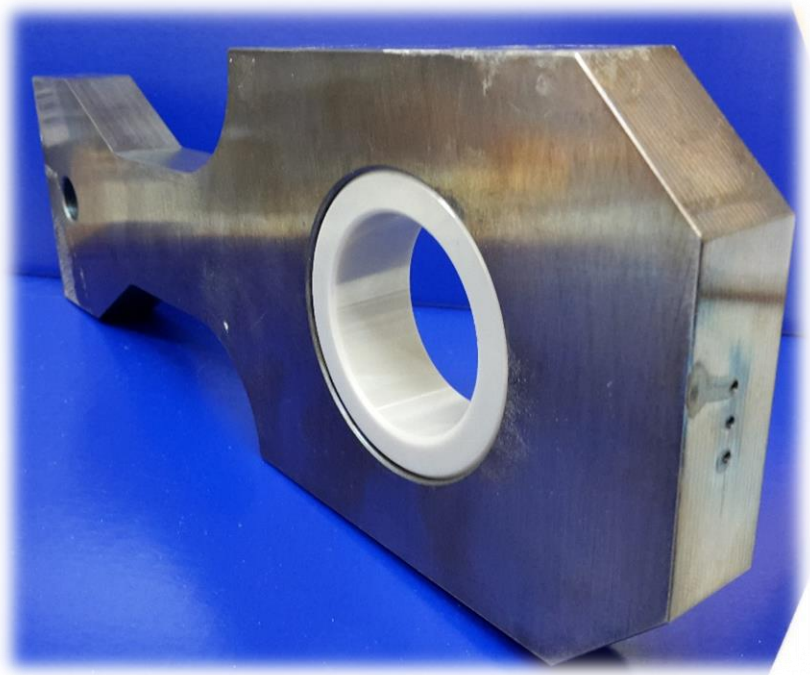
→ Trennschichtausfall erst bei höheren Reibwerten μ ≥ 0,22

5) Zusammenfassung und Ausblick

5) Zusammenfassung und Ausblick

Mechanische Lebensdauer

- statische und dynamische Tragfähigkeit gegeben (Siliziumnitrid-Buchse bis mind. 150 N/mm² und $N \geq 10^6$)
- Berechnungsvorschrift/-methode zur Auslegung keramischer Gleitlager nach dem ***Spannungsminimum*** und der umgebenen Struktur (masseoptimiert)



Tribologische Lebensdauer

- niedriger Reibwert von $\mu \approx 0{,}06$ mit dem Tribologiesystem erreichbar
- extrem geringer Verschleiß bzw. nicht messbar
- tribologische Lebensdauer um ca. 70 % durch depotgebundenen Festschmierstoff (abh. Laserstruktur)
- unzureichender Gleitweg→ **weiterer Forschungsbedarf** („selbstschmierender Bolzen“, Laserstrukturen)

5) Zusammenfassung und Ausblick

- **stationäre und mobile Maschinen** mit geringer und oszillierender Gleitgeschwindigkeit ($v < 0{,}2$ m/s)
- hohe **Verschleißfestigkeit** (Festkörper- und Grenzreibung)
- statische und dynamische Tragfähigkeit von mind. 150 N/mm²
- **kein Umwelteintrag** von Schmierstoffen

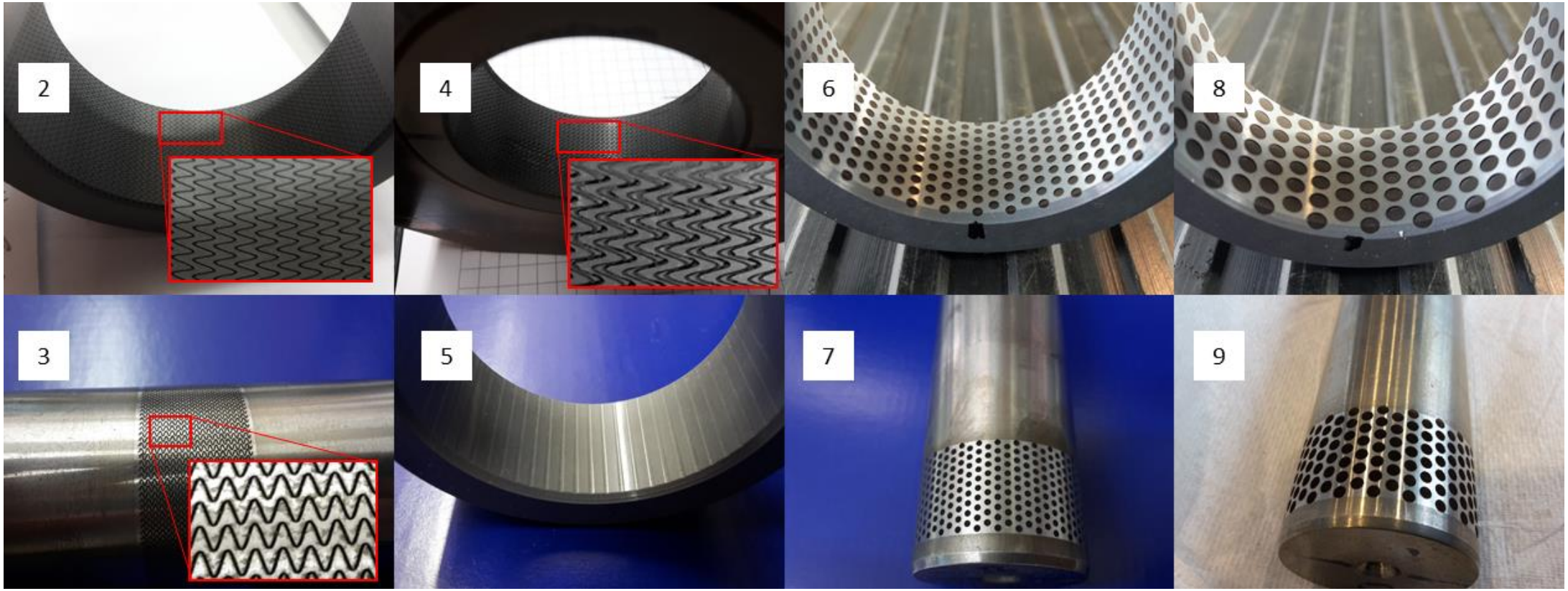
  (kein Nachschmieren, keine Zentralschmieranlage, keine Gefahr des Trockenlaufens)
- **erweiterte Einsatzfähigkeit** in abrasiven, wässrigen, säurehaltigen oder basischen Umgebungen
- Einsatzfähigkeit im Vakuum
- elektrische Trennung von Bauteilen

Eigenständiges Produkt anwendbar

- keramisches Gleitlager auch mit weitern Schmiersystemen betreibbar (Medien-, Fett- oder Ölschmierung)

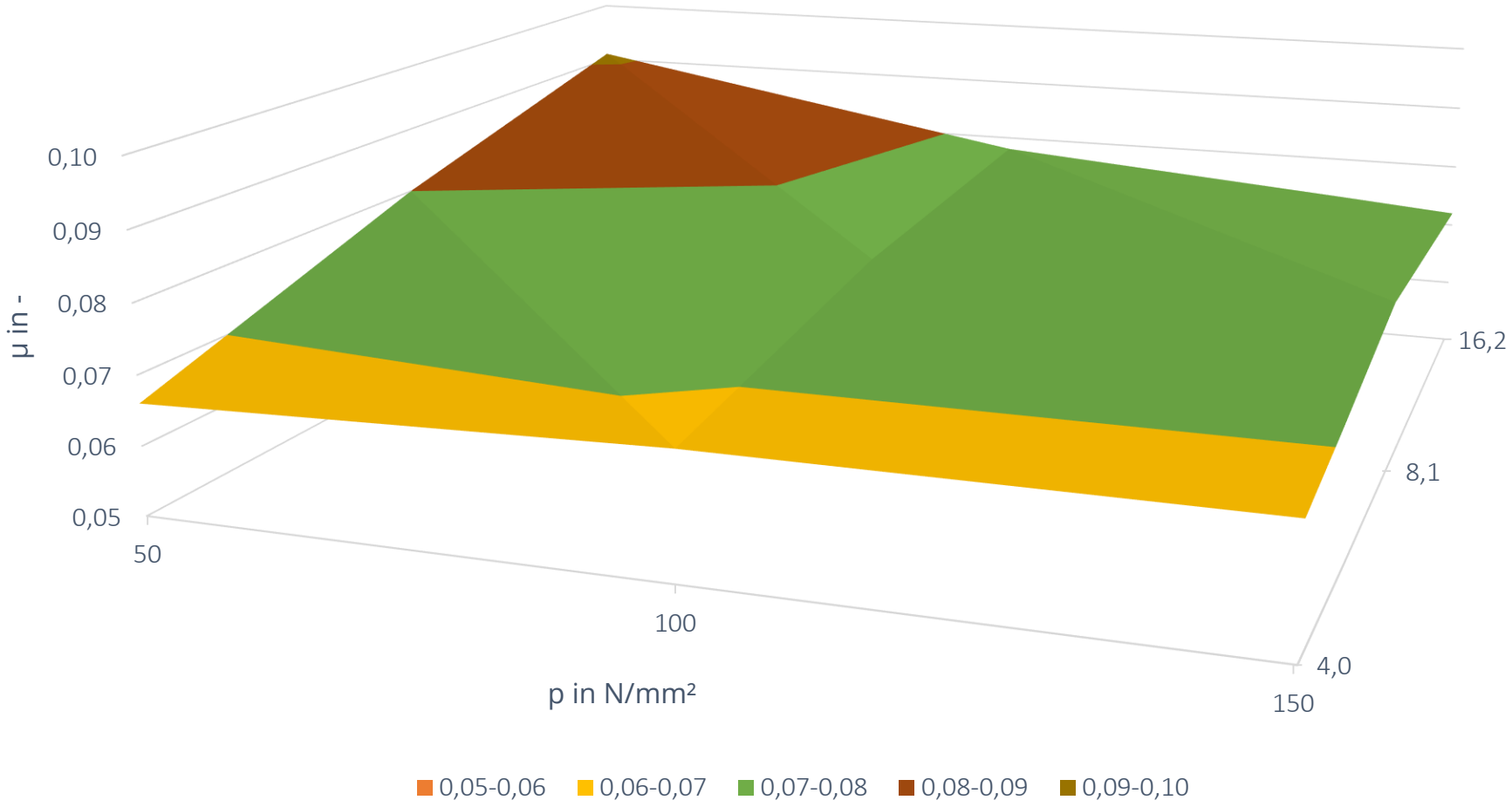
»Wissen schafft Brücken.«

Anhang
- Schmierdepotkonfigurationen -

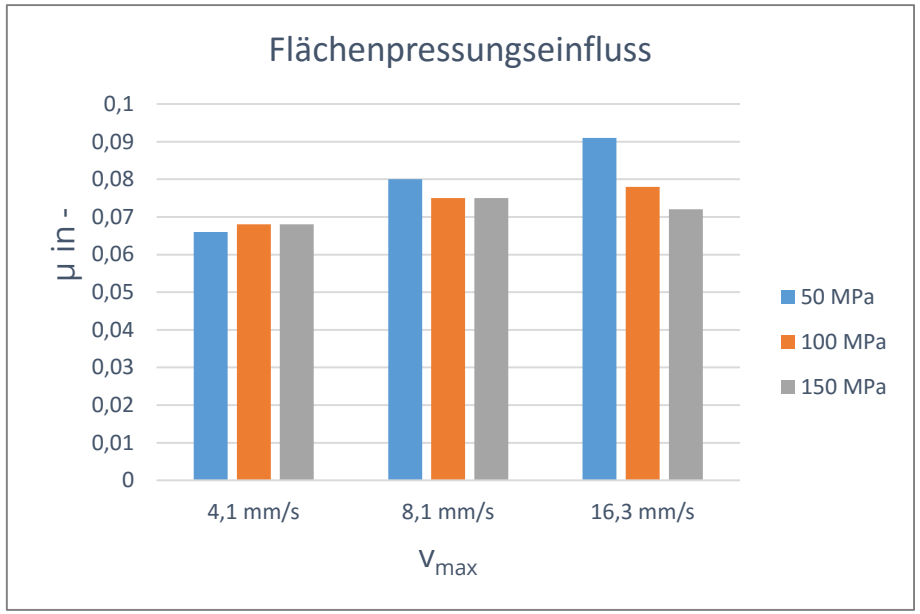


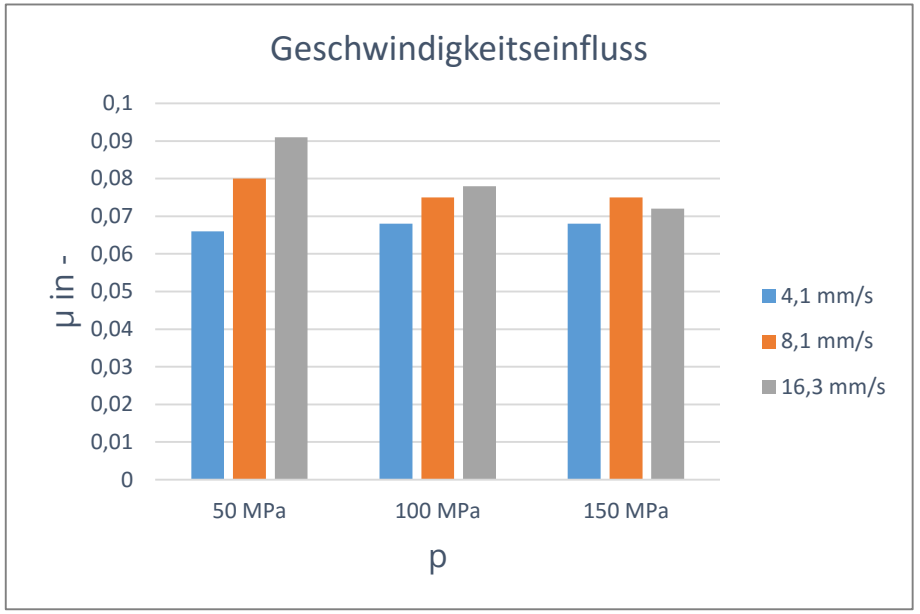
untersuchte Makro- und mikrostrukturierte Schmierdepotkonfigurationen

Anhang
- Flächenpressungs- und Gleitgeschwindigkeitseinfluss -



Anhang
- Flächenpressungs- und Gleitgeschwindigkeitseinfluss -



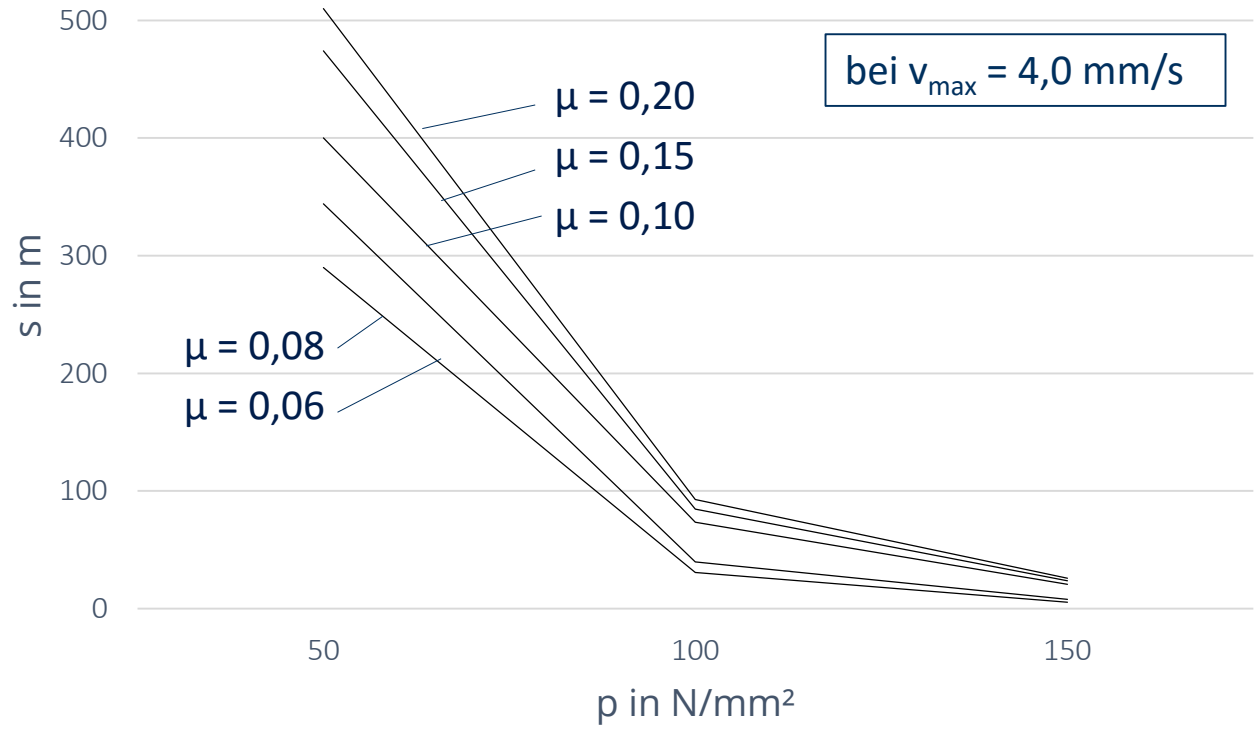


Messpunkte im Gleichgewicht nach Einlaufphase ermittelt

→ Reibwertsenkung bei steigender Pressung

→ Reibwertsteigerung bei steigender Gleitgeschwindigkeit

Anhang
- Gleitweg in Abhängigkeit der Flächenpressung -



Gleitweg

- hohe Abhängigkeit von der Flächenpressung

Verschleiß

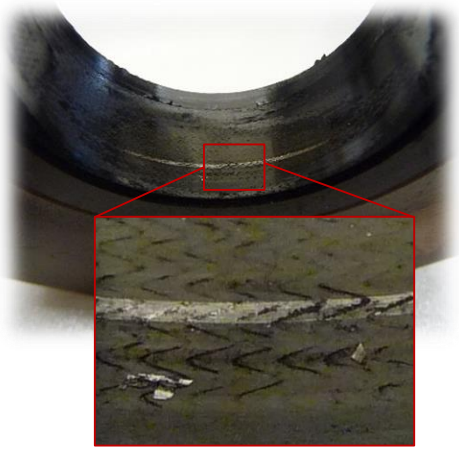
- zu gering (nicht messbar)

Anhang
- Trennschichtbetrachtung -

Ungeschmiert

Geschmiert (Gleitlack OKS 589)

- Durchgehende Feststoffschmierschicht
- Raue Oberfläche



Kurz vor Trennschichtausfall

- Gefüllte Schmierfugen
- Durchgehende Trennschicht
- Extrem glatt und glänzend

Trennschichtausfall

- Trennschicht zerstört (metallisch glänzend)
- Schmierfugen teils mit Hartchrom verschlossen
- Schmierfugen geometrisch intakt