

# Anwendungsnaher tribologischer Prüfstand und Simulation von Verschleiß

Benjamin Hirschmann, Artur Fertschej,  
Peter Reithofer



4a engineering GmbH  
Industriepark 1  
A-8772 Traboch  
fertschej@4a.co.at  
++43 (0) 664 80106 619



**Berechnung und Simulation:  
Anwendungen – Entwicklungen – Trends**  
25. – 27. April 2016, Bamberg

- Motivation
- 4a Tribocompound – Prüfstand
- Ergebnisse
- Simulation
- Zusammenfassung

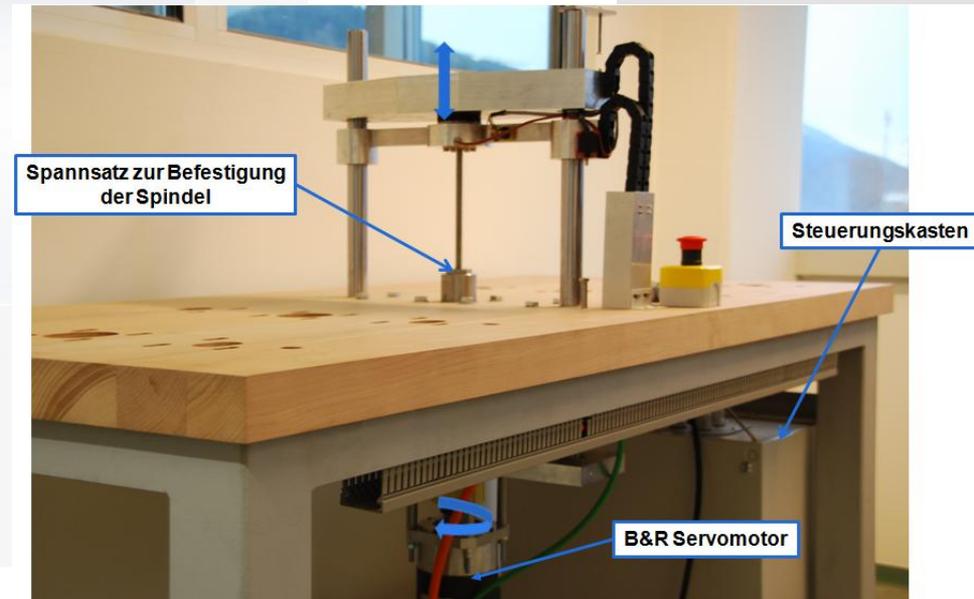
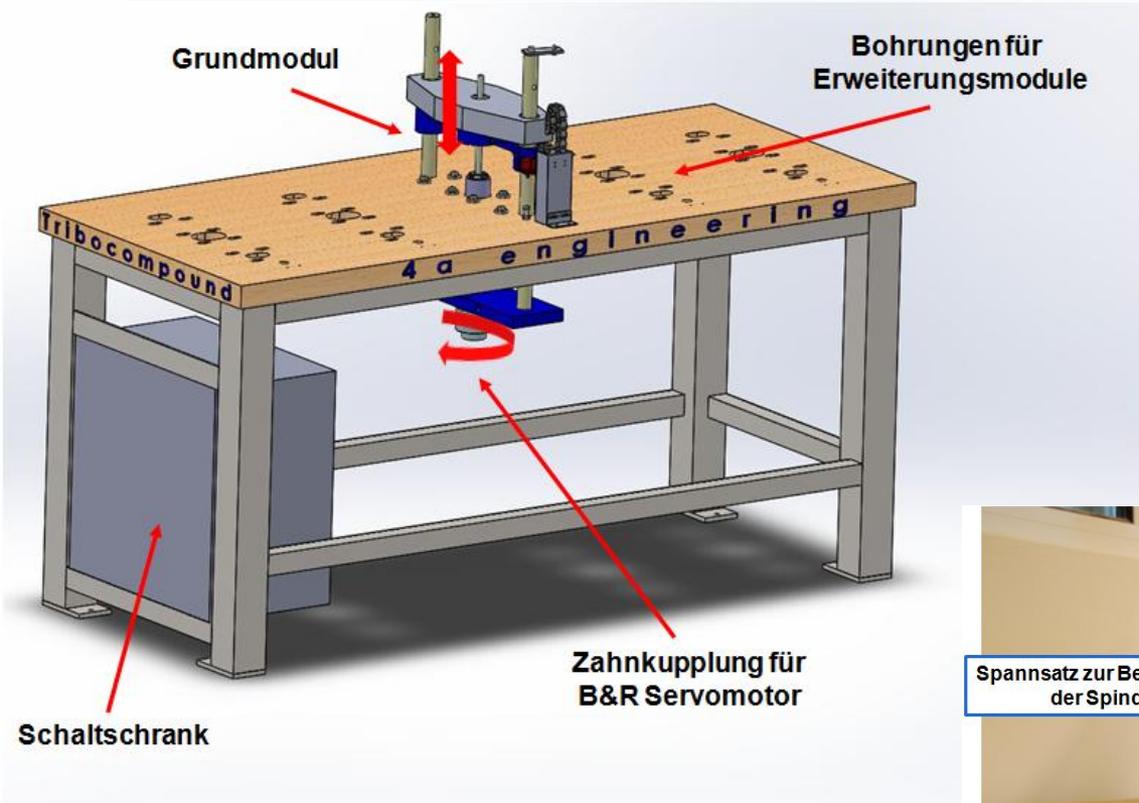
- **EraSME Projekt: „Tribocompound“**  
„Innovative Werkstofflösungen für Antriebskomponenten basierend auf neuen Polymercompounds“
- Konzeptionierung, Auslegung, Konstruktion und Umsetzung eines **anwendungsnahen**, prototypischen **Tribologieprüfstands** und Entwicklung erforderlicher Antriebs-, Steuer-, Temperier- und Messtechnik
- **Entwicklung** einer **Simulationsmethodik**, um die im Reibbereich vorherrschenden Druck-/Relativgeschwindigkeits-/ und Temperaturverhältnisse zu ermitteln.

## Anforderungen an den Prüfstand:

- variierbare Versuchsbedingungen
- modular erweiterbar
- Drehmoment- und Temperaturmessung
- für Dauerbetrieb geeignet

# 4a Tribocompound – Prüfstand

## Gesamtübersicht



# 4a Tribocompound – Prüfstand

## Drehmomentmessung

**Dämpfungselement**

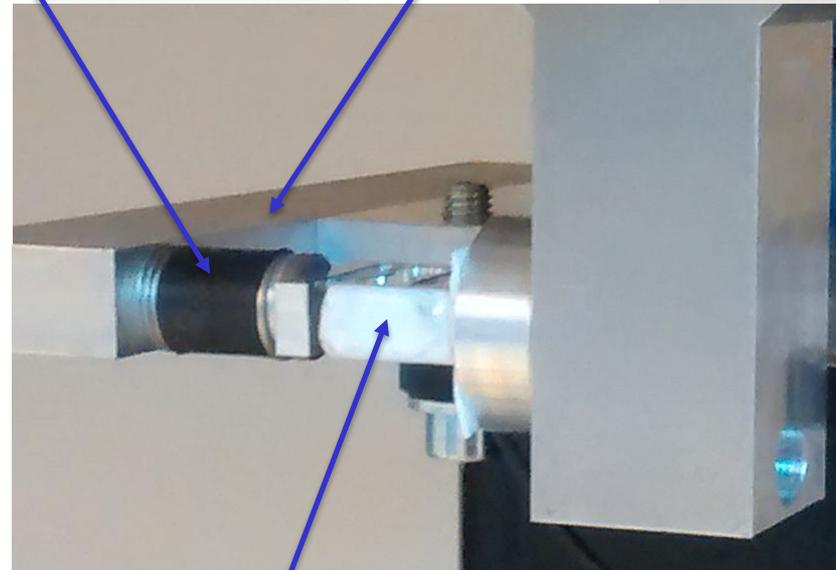
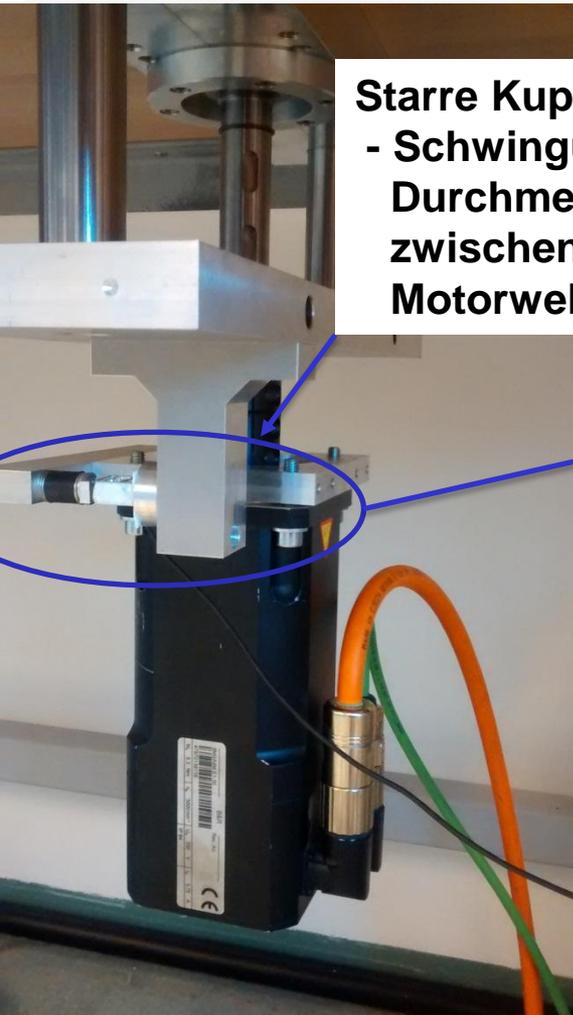
- um unerwünschte Schwingungen zu dämpfen

**Hebelarm**

10cm (Welle – Kraftmessdose)

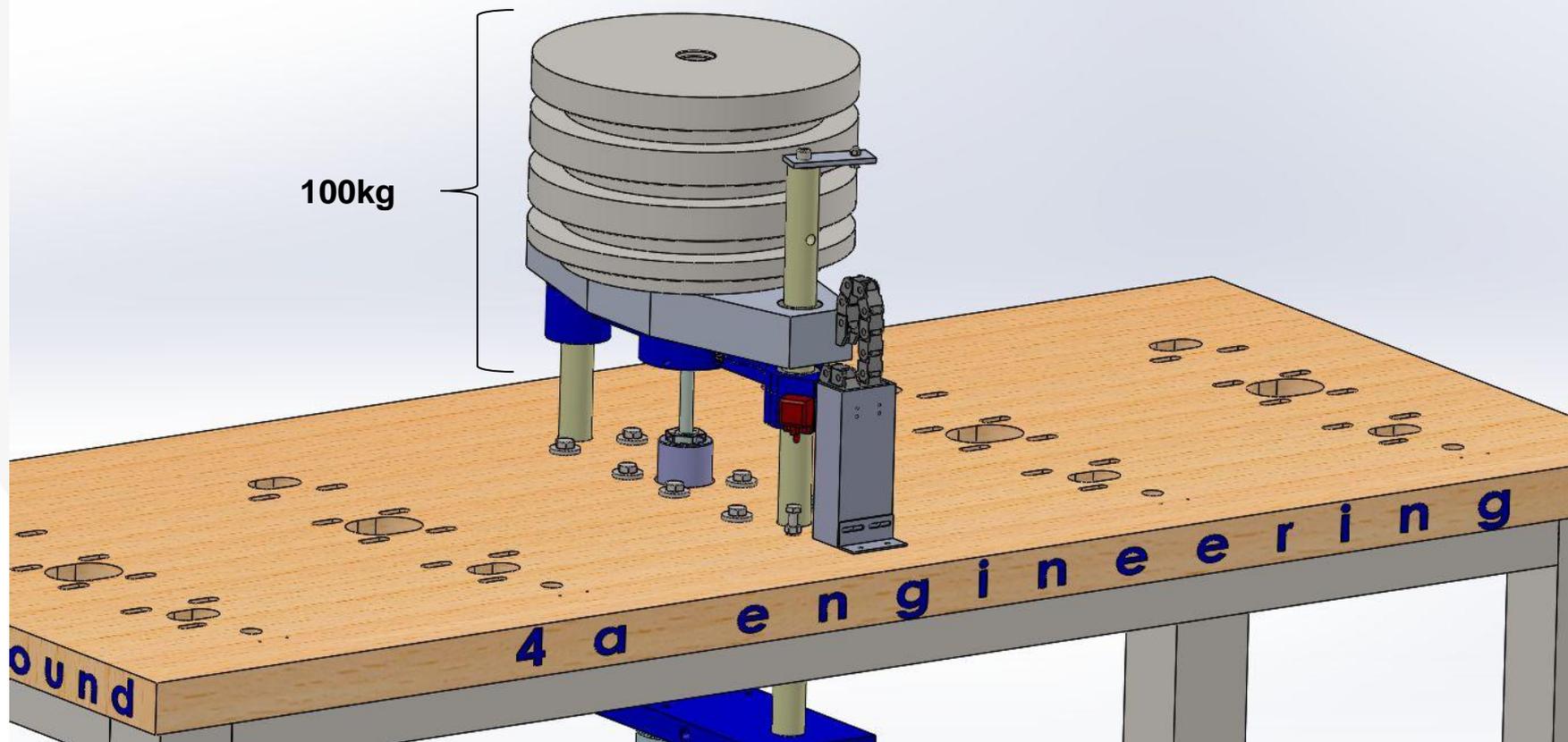
**Starre Kupplung**

- Schwingungen durch Durchmesserdifferenz zwischen Welle und Motorwelle



**Zug/Druck-Kraftmessdose**

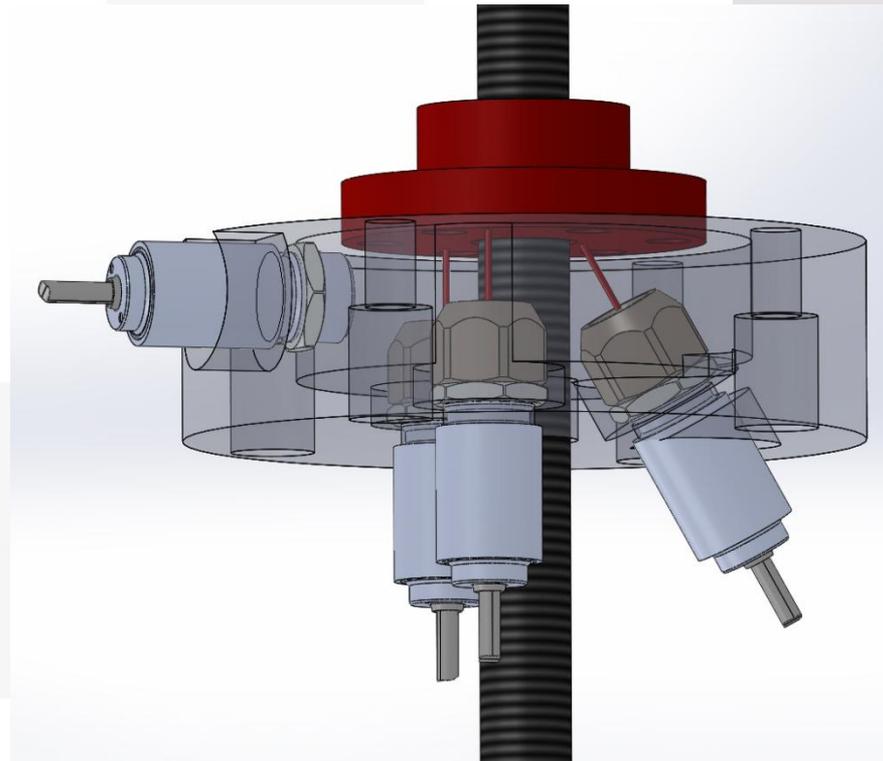
- Maximalbelastung TR12x3 Mutter



# 4a Tribocompound – Prüfstand

## Temperaturmessung

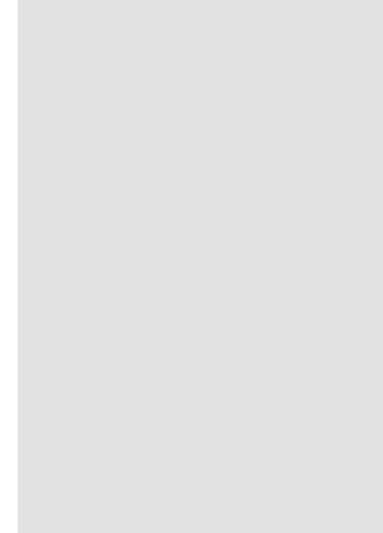
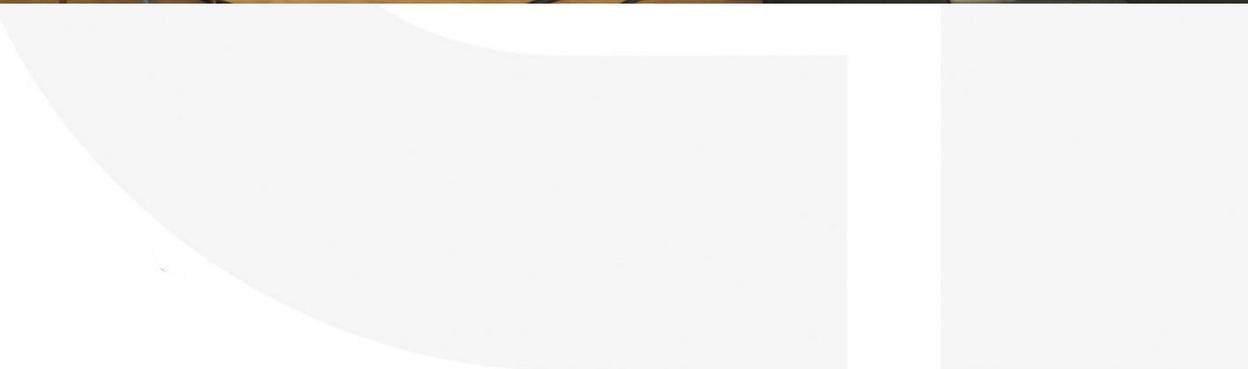
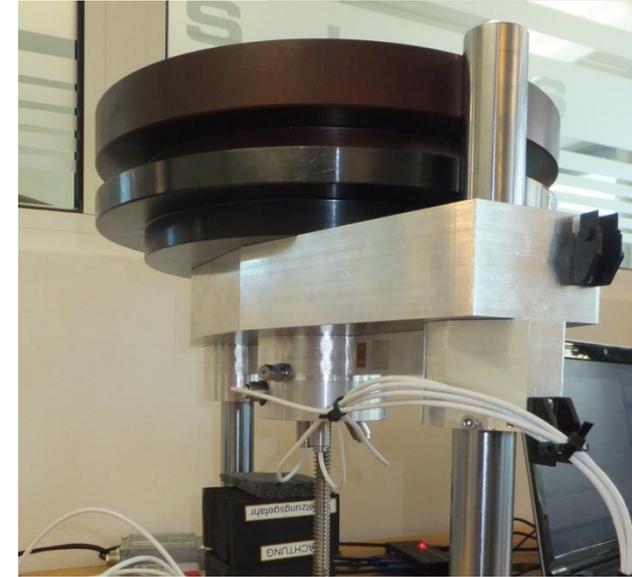
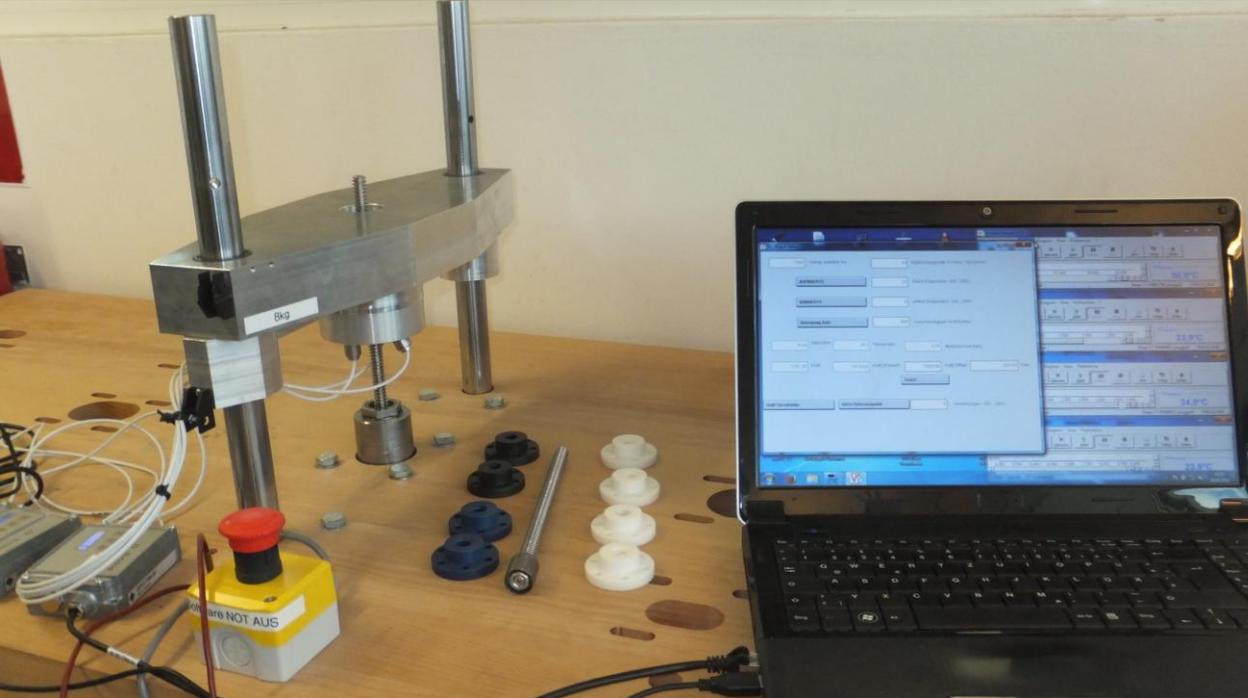
- Insgesamt 4 IR-Sensoren, um den zeitlichen Verlauf der Temperatur von Mutter und Spindel messen zu können.
- 1 IR-Sensor misst die Temperatur der Spindel (allerdings erst ab 50°C möglich)
- 3 IR-Sensoren messen die Temperatur der Mutter in unterschiedlichem Abstand zur Spindel; damit kann die örtliche und zeitliche Temperaturentwicklung gemessen werden



© 4a Engineering GmbH, all rights reserved

# 4a Tribocompound – Prüfstand

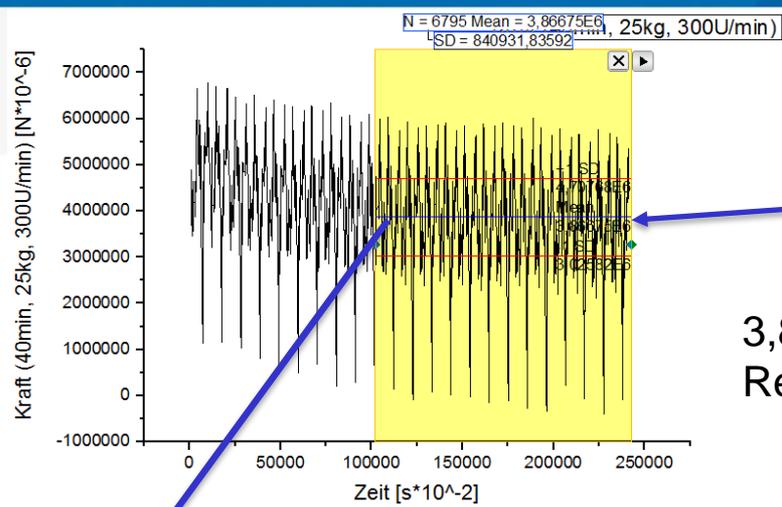
Aktueller Stand



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

# 4a Tribocompound – Prüfstand

## Auswertung



**Mittelwert**

3,866 N entsprechen einer Reibzahl  $\mu=0,045$

### Reibzahl:

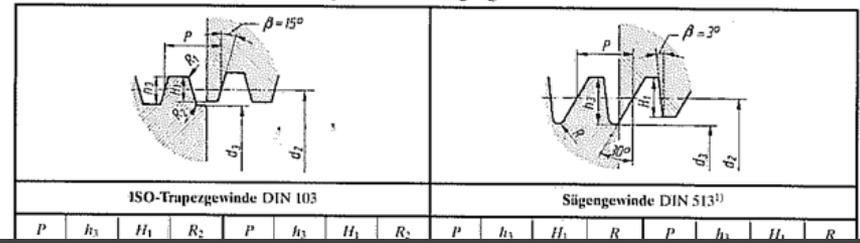
Mittelwert der gemessenen Kraft:	F_mess	3 866 700	$10^{-6}$ N
Standardabweichung:	stabw_F_mess	102 869	$10^{-6}$ N
Axialkraft	F_A	250	N
Länge des Hebelarms:	l_hebel	100	mm
Flankenwinkel im Achsschnitt:	beta	0,26179939 rad	15°
Steigung des Gewindes:	P_h	3	mm
Nenn Durchmesser Spindel:	d_sp	12	mm
Reibwert im Lager:	u_g	0,03	(Für Wälzlager)
mittlerer Radius der Lagerstützfläche:	r_l	27	mm

Flankendurchmesser des Gewindes:	d_2	10,5	mm
Mittelwert Antriebsmoment:	M_A	38,57	Nmm
Standardabweichung	stabw_M_A	10,2869	Nm
Steigungswinkel des Gewindes:	alpha	0,090696178 rad	5,19650822 °
Flankenwinkel im Normalschnitt:	beta_N	0,260771585 rad	14,9411113 °
Reibwinkel des Gewindes:	roh_G	0,046201352	
<b>Reibzahl der Mutter:</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>0,045</b>	
<b>Pressung der Flanken des Gewindes:</b>	<b>p</b>	<b>1,12</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>

### Flankenpressung:

tragende Mutterhöhe:	m_mutter	18	mm
Gewindetragtiefe (Tab 11.1):	H_1	1,5	mm
Gewindetragfaktor:	k_g	0,75	

Tab. 11.1 Abmessungen in mm des Trapez- und des Sägewindes



ISO-Trapezgewinde DIN 103				Sägewindes DIN 513 <sup>1)</sup>			
P	h <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	P	h <sub>3</sub>	H <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>

- Mit dem 4a Tribocompound – Prüfstand wurden Versuche durchgeführt, um folgende Einflüsse zu untersuchen:
  - Materialien: POM-Batch; PA66-Batches
  - Geschwindigkeit
  - Laufleistung (Weg)
  - Belastung (Gewicht)
  - Pausenzeit im Versuch

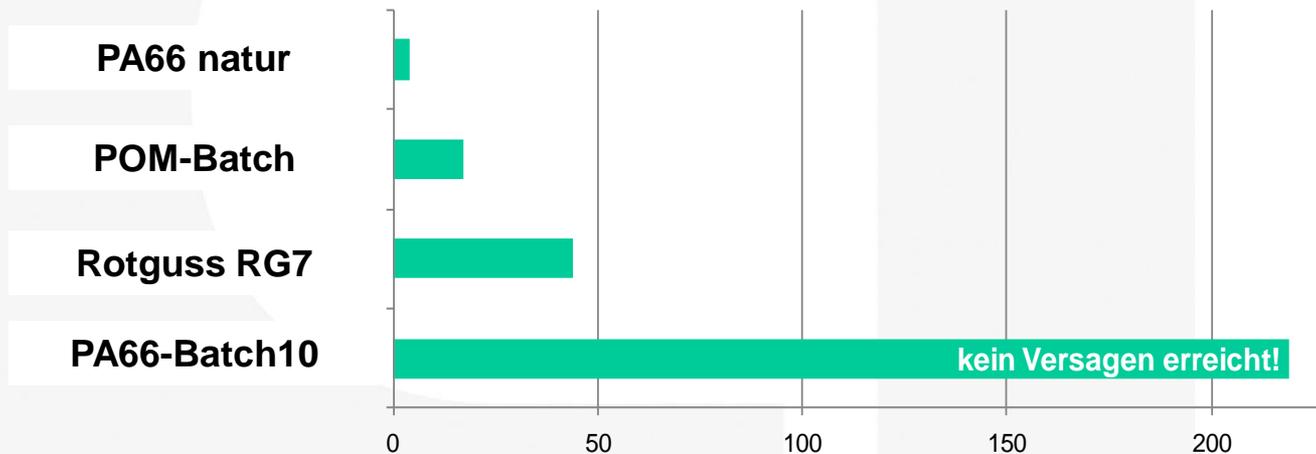
kein Versagen  
erreicht!

# Ergebnisse

## Versagenszeiten der geprüften Muttern

- Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Materialien zu erkennen (50 kg, 450 U/min, keine Pause).

Ausfallszeiten [min]



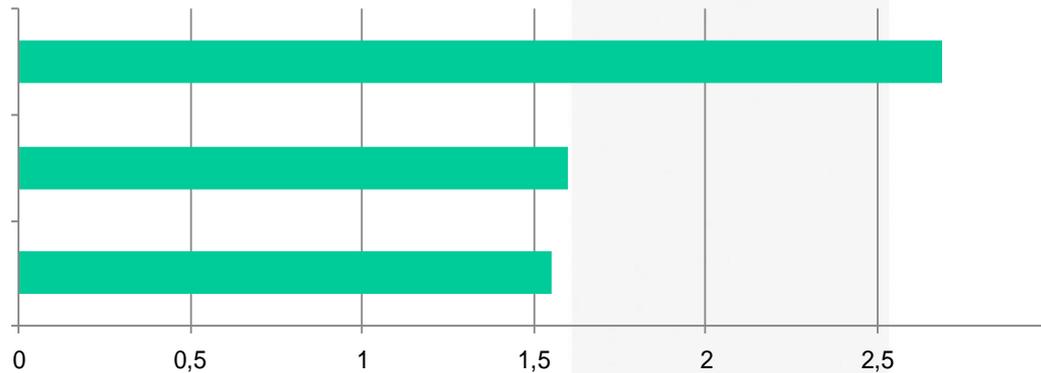
- Beim PA66-Batch10 bildete sich auf der Spindel eine schwarze Schicht.



- Der Unterschied ist mit Ausnahme des Rotgusses deutlich geringer (8 kg; 286 U/min, 1 km)

Verschleiß [mg]

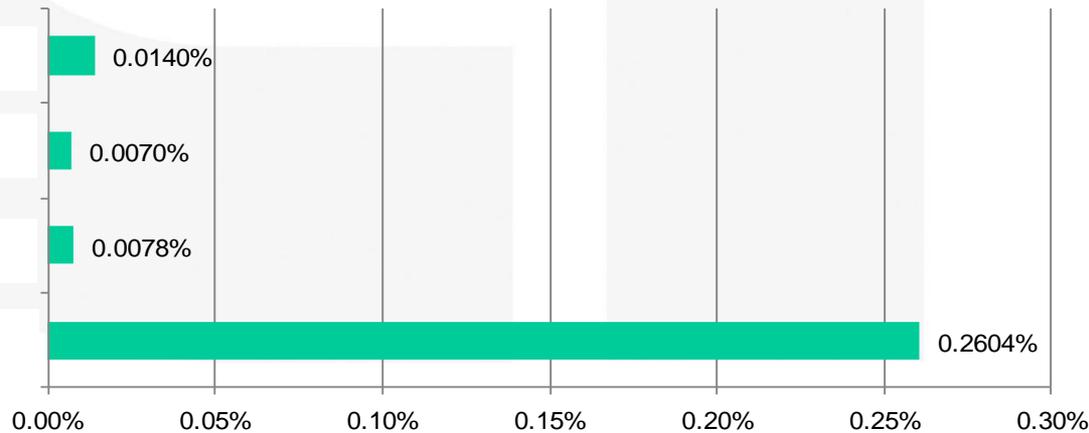
PA66 natur  
POM-Batch  
PA66-Batch10



vgl: Rotguss: 406 mg

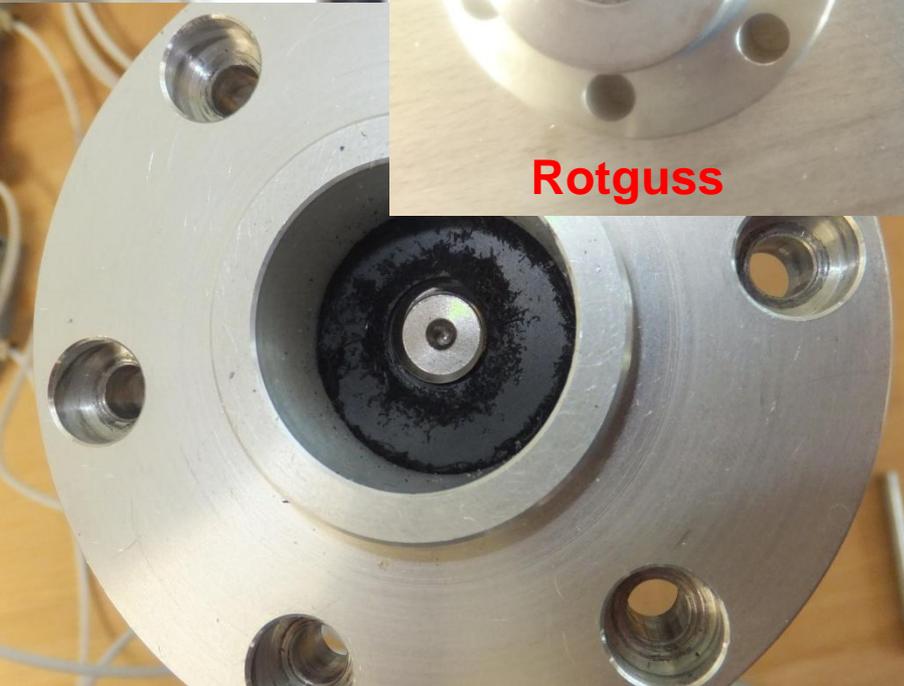
Verschleiß [%]

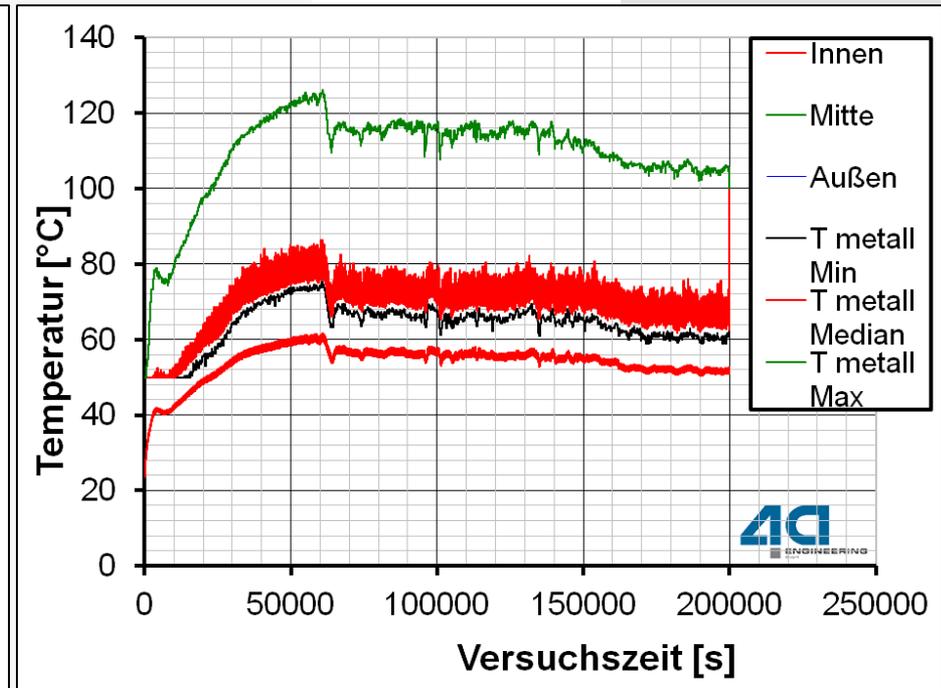
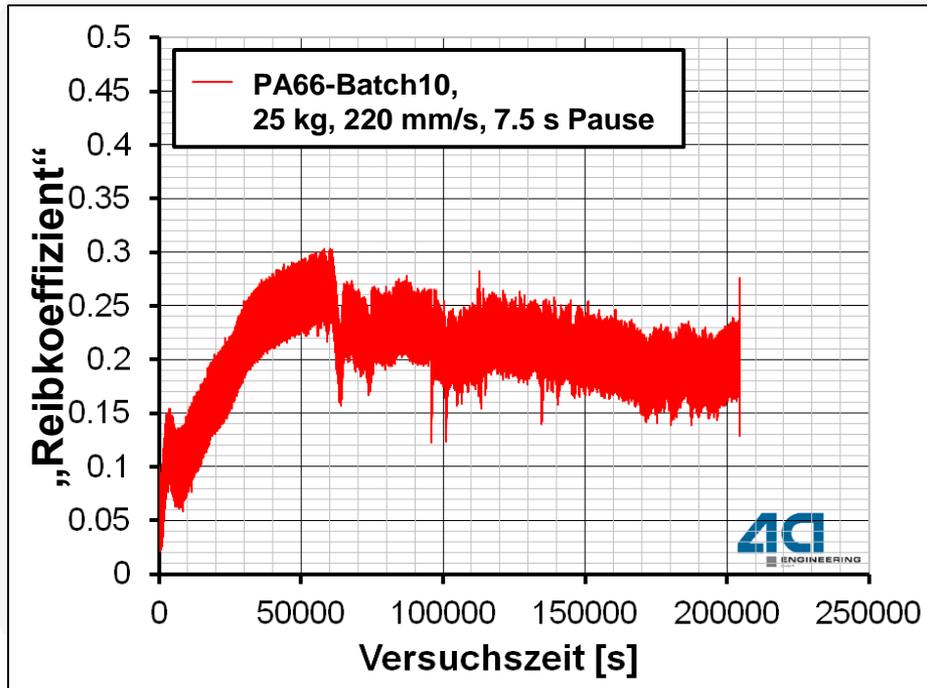
PA66 natur  
POM-Batch  
PA66-Batch10  
Rotguss RG7



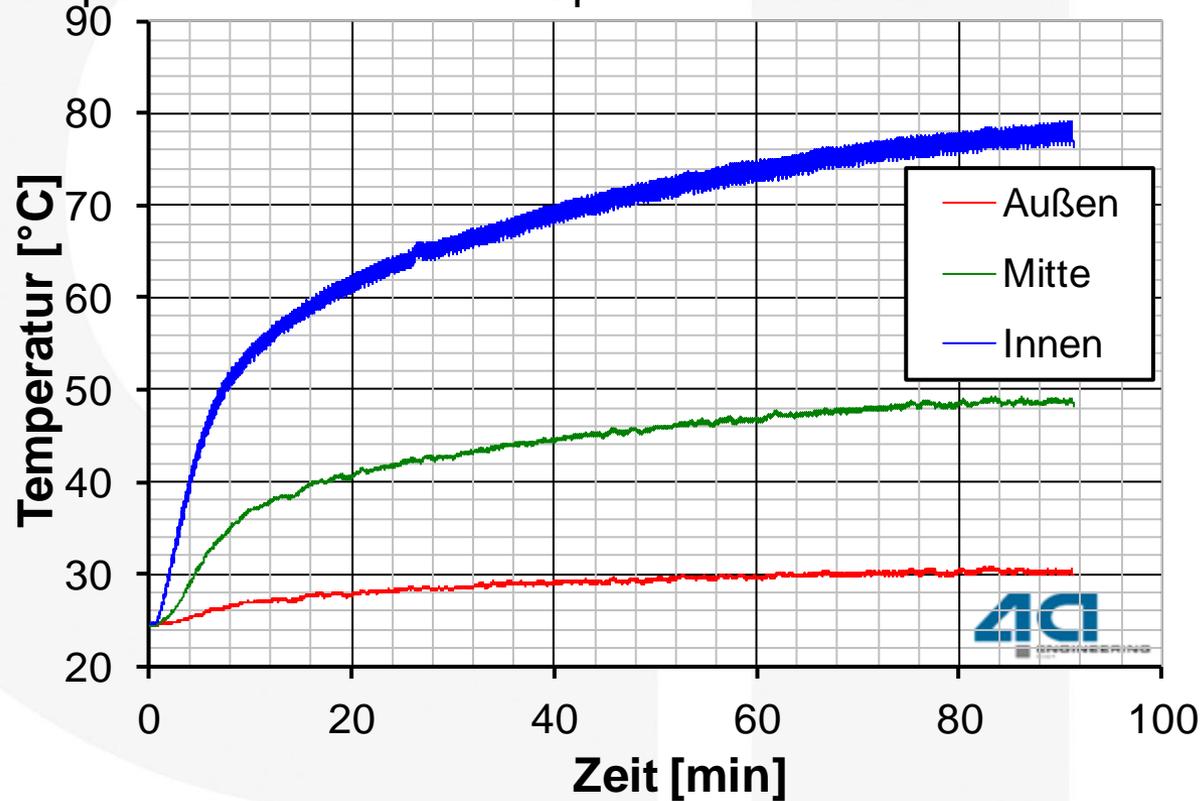
# Ergebnisse

## Verschleiß der geprüften Muttern





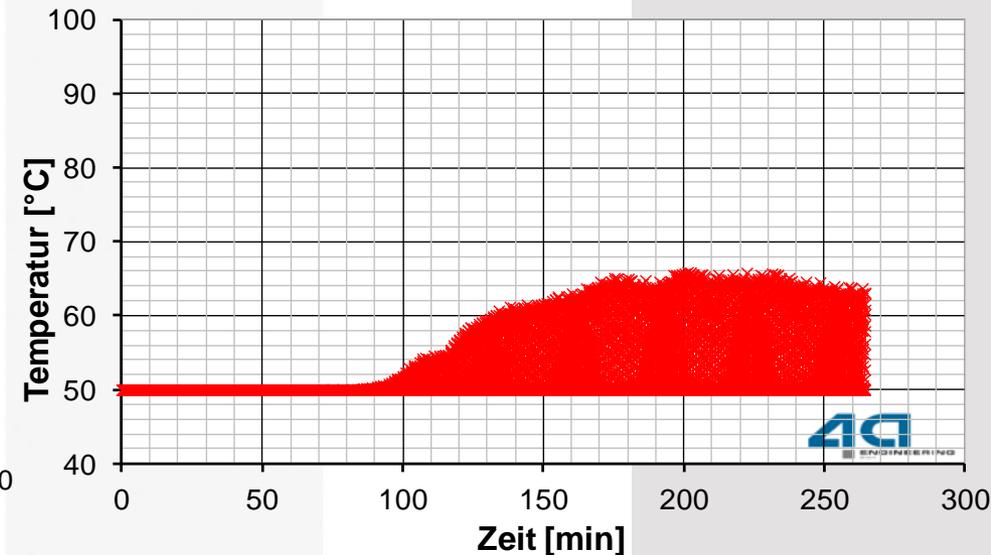
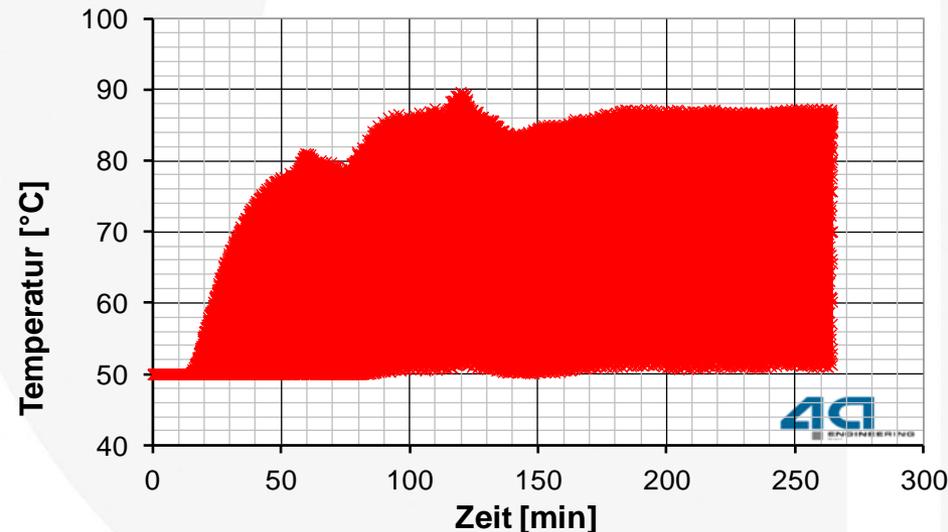
- Beispiel: POM-Batch mit 25 kg Belastung, 450 U/min, keine Pause
- vgl: Temperaturmaximum der Spindel: 123.6 °C



- Einfluss der Pause auf Temperatur der Metallspindel (100 U/min, 1 km, PA66-Batch15)

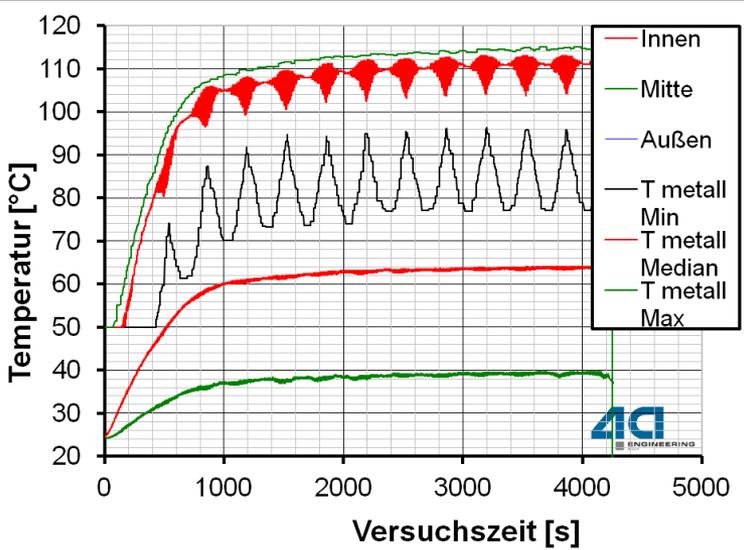
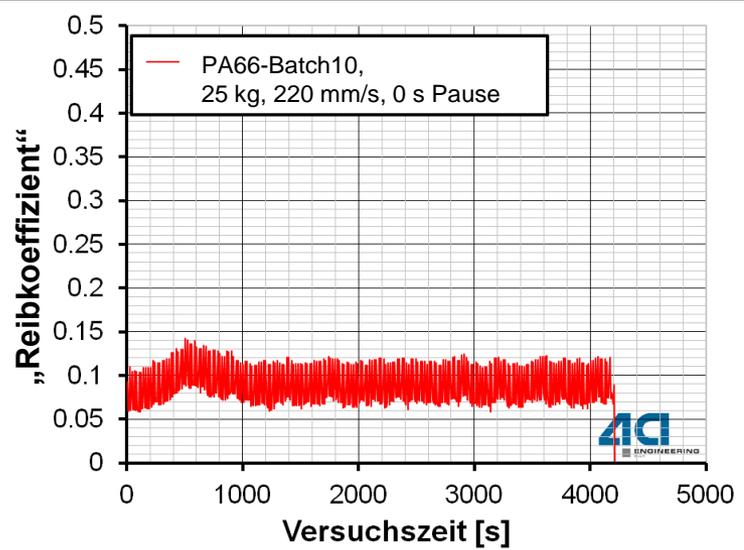
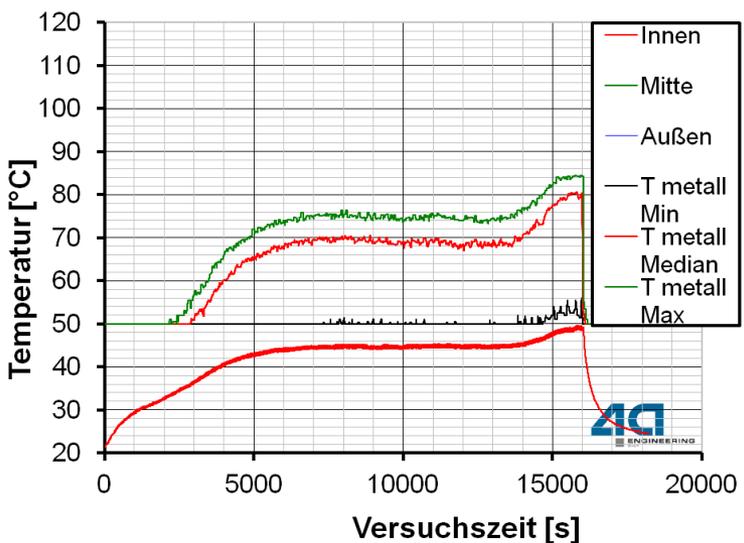
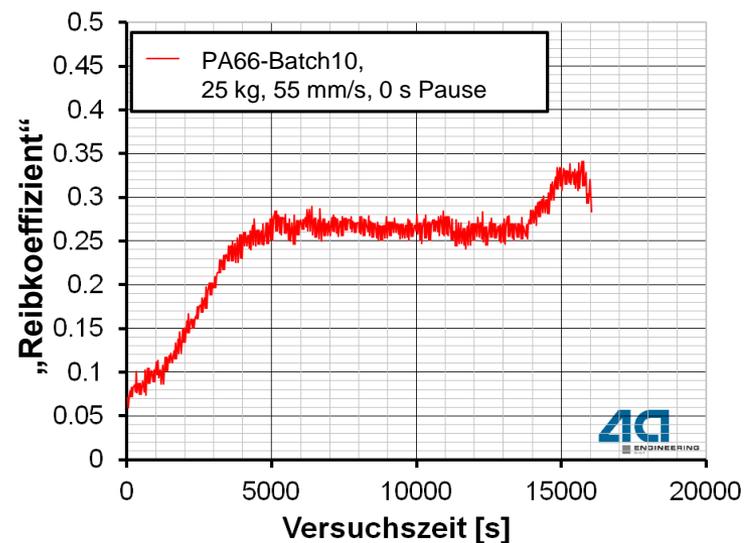
links: ohne Pause; rechts: mit 30 Sekunden Pause

Messung der Temperatur technisch erst ab 50°C möglich



# Ergebnisse

## Einfluss Geschwindigkeit



# Simulation

- In der Literatur kommen viele Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung des Verschleißes vor. Eine der einfachsten Gesetzmäßigkeiten wurde von **Archard** aufgestellt<sup>[1]</sup>:

$$V_w = \frac{k}{H} * F * s$$

$V_w$  Verschleißvolumen [ $\text{mm}^3$ ],  $k$  dimensionslose Verschleißkoeffizient [-],  
 $H$  Härte [MPa],  $F$  Normalkraft [N],  $s$  Verschleißweg [mm]

- Diese kann zweckmäßig für die FEM-Simulation umgeformt werden:

$$w_d = K * p * s$$

$w_d$  Verschleißtiefe [mm],  $K$  Verschleißkoeffizient [ $\text{MPa}^{-1}$ ],  $p$  Kontaktdruck [MPa]

- Zur Simulation von Verschleiß bei Kunststoffen wurde von Martinez eine empirischer Parameteransatz verwendet<sup>[2]</sup>:

$$V_w = \alpha * s * A * \left(\frac{p}{E}\right)^\beta$$

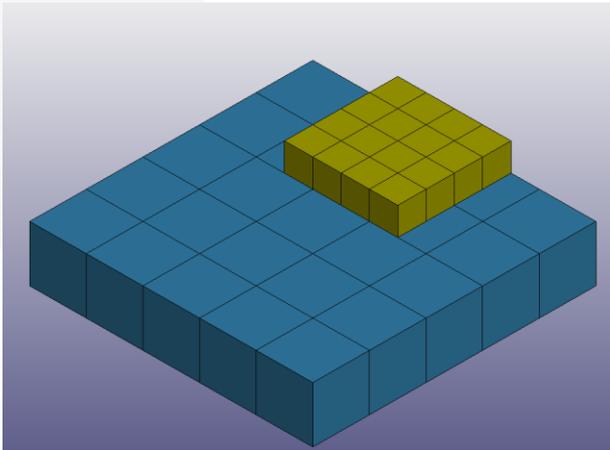
$\alpha, \beta$  Modellparameter [-],  $A$  Kontaktfläche [ $\text{mm}^2$ ],  $E$  Elastizitätsmodul [MPa]

[1] Uetz H, Wiedemeyer J. Tribologie der Polymere: Grundlagen und Anwendungen in der Technik ; Reibung - Verschleiß - Schmierung. München ; Wien: Hanser; 1985.

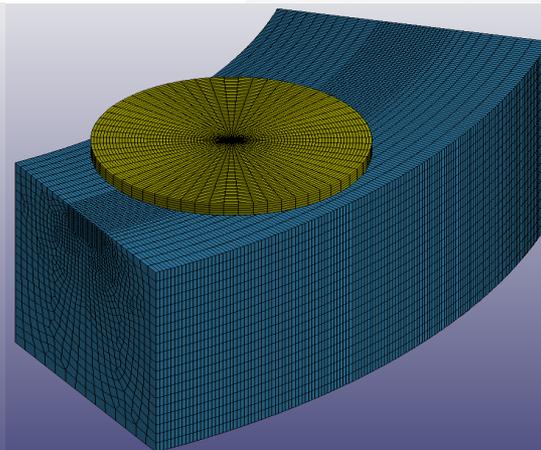
[2] Martinez F.J. et al., Finite element implementation and validation of wear modelling in sliding polymer-metal contacts, Wear 284-285 (2012) 52-64

- Die korrekte Darstellung des Spannungszustandes im Simulationsmodell erfordert eine hohe Anzahl an Elementen.
- Der anfallende Verschleiß aus den Versuchen ist sehr gering. Es werden lange Versuchszeiten bzw. Verschleißwege benötigt, um messbare Ergebnisse zu erhalten (min. 250 m).
  - sehr lange Rechenzeiten
  - keine direkte Abbildung des Versuchs.
- Es muss ein Ersatzmodell bzw. eine eigene Routine erstellt werden.

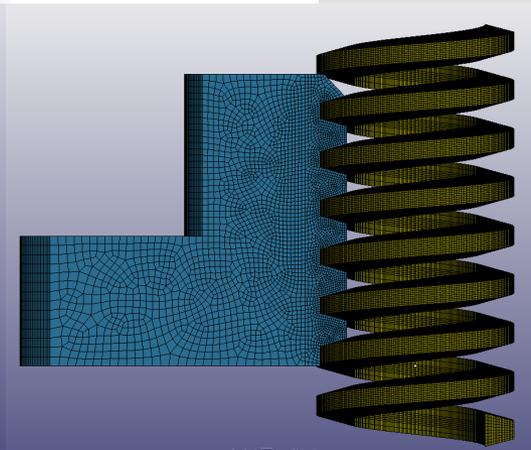
- Die Methodenentwicklung erfolgt über 3 verschiedene Simulationsmodelle:
  - 1. Simple Mind Modell → entwickelte Methoden testen
  - 2. Simulation eines standardmäßig eingesetzten Tribometerprüfstandes (Kugel-Scheibe/Stift-Scheibe Aufbau) → einfacher Aufbau
  - 3. Simulation des 4a Tribocompound Versuchsstandes → realer, komplexer Aufbau



1. Simple Mind Modell



2. Kugel/Scheibe Tribometer Modell



3. 4a Tribocompound Prüfstand Modell

# 1. Simple Mind Modell

## Wahl für Modelle und Implementierung in LS-DYNA

- Möglichkeiten, die LS-Dyna anbietet:
  - \*CONTACT\_ADD\_WEAR: der Verschleiß kann entkoppelt mitgerechnet werden. Hierbei wird standardmäßig Archard's Verschleißgesetz verwendet. Kein Geometrieupdate möglich.
  - Implementierung von eigenen Methoden über User Subroutinen. Die Einbindung erfolgt über einen Fortran-Compiler.  
Im speziellen bietet LS-Dyna die **User Subroutine** „**userwear**“ an, die die Verwendung von eigenen Verschleißgesetzen ermöglicht.
- Im Projekt wurde die 2. Option unter Zuhilfenahme von Python-Skripts angewendet → Geometrieadaptation, Archard's Verschleißgesetz

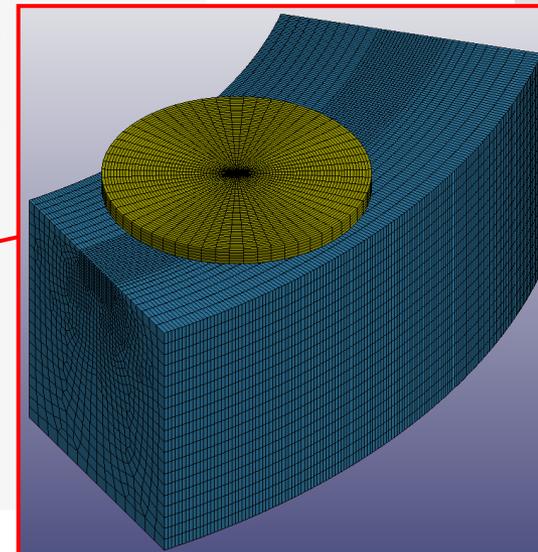
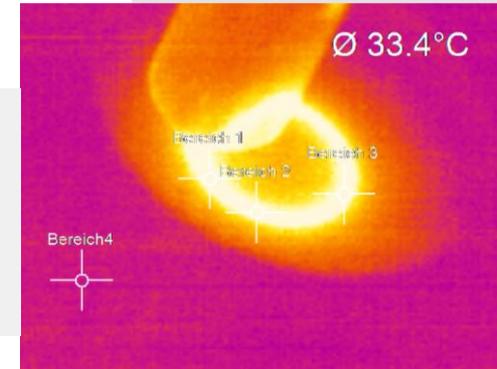
# 2. Kugel-Scheibe Tribometer

## Modellaufgaben

- Das Kugel-Scheibe Tribometer bietet die Möglichkeit bei einer einfacheren Geometrie und den sich daraus ergebenden einfacheren Belastungszuständen Verschleißmodelle auszutesten und mit Messergebnissen von einem optischen Profilometer zu vergleichen.

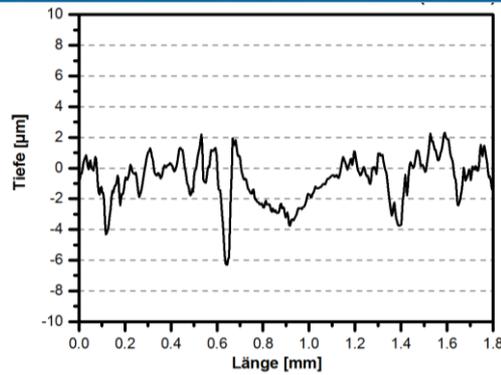
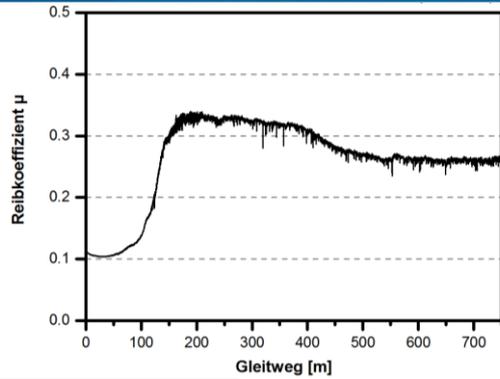


Bereich 1	35.6°C
Bereich 2	33.9°C
Bereich 3	33.4°C
Bereich 4	23.0°C



# 2. Kugel-Scheibe Tribometer

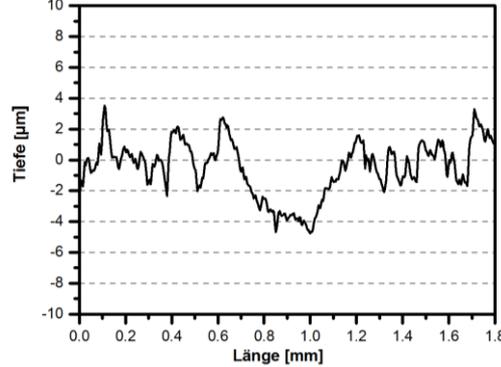
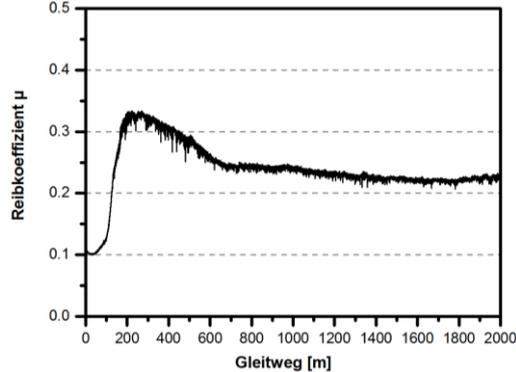
## Ergebnisse PA66–Batch10



750 m

Reibkoeffizient  $\mu$

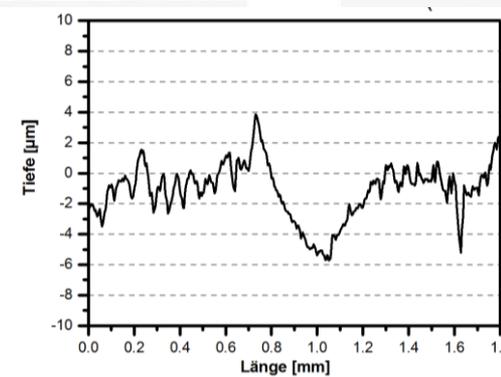
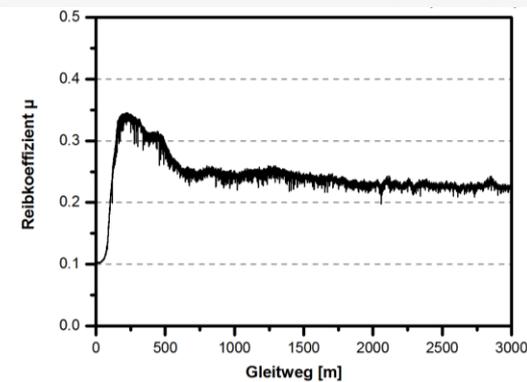
~0.26



2000 m

Reibkoeffizient  $\mu$

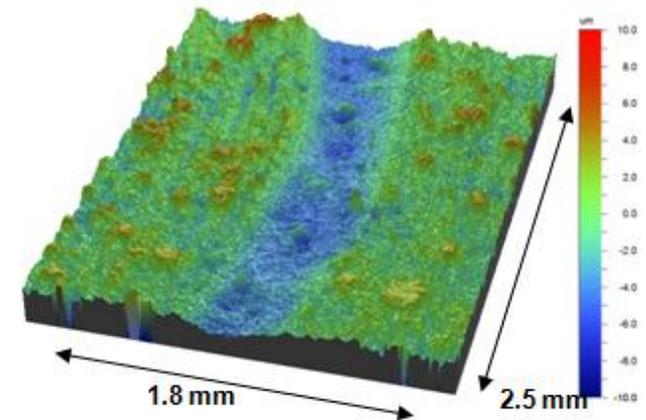
~0,24



3000 m

Reibkoeffizient  $\mu$

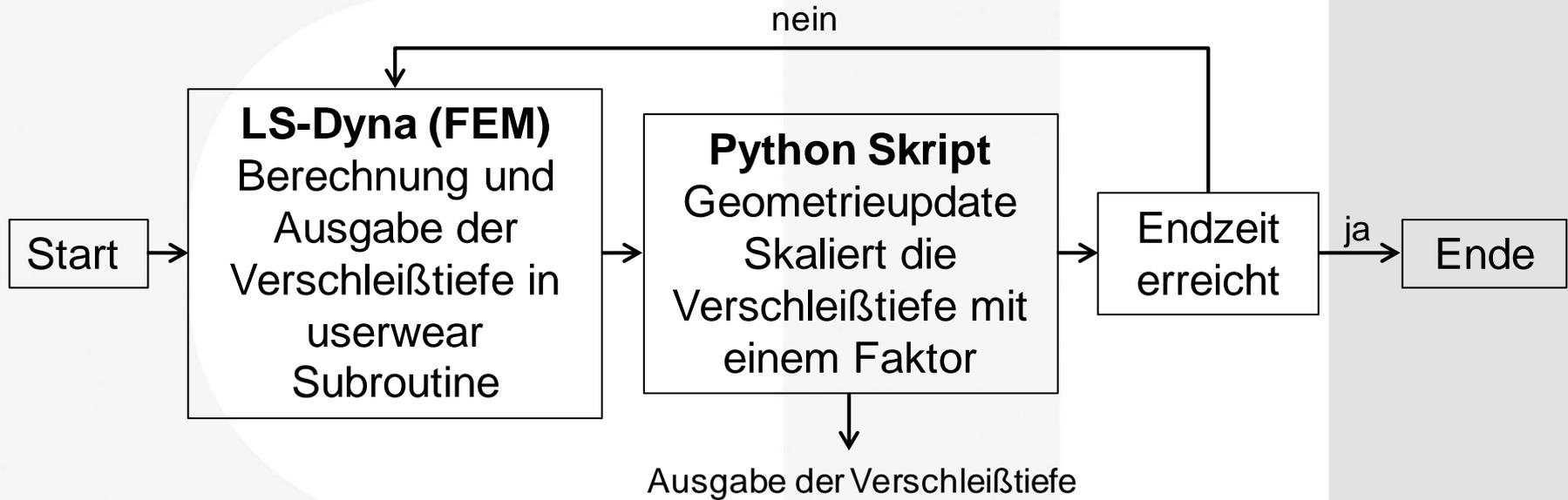
~0,24



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

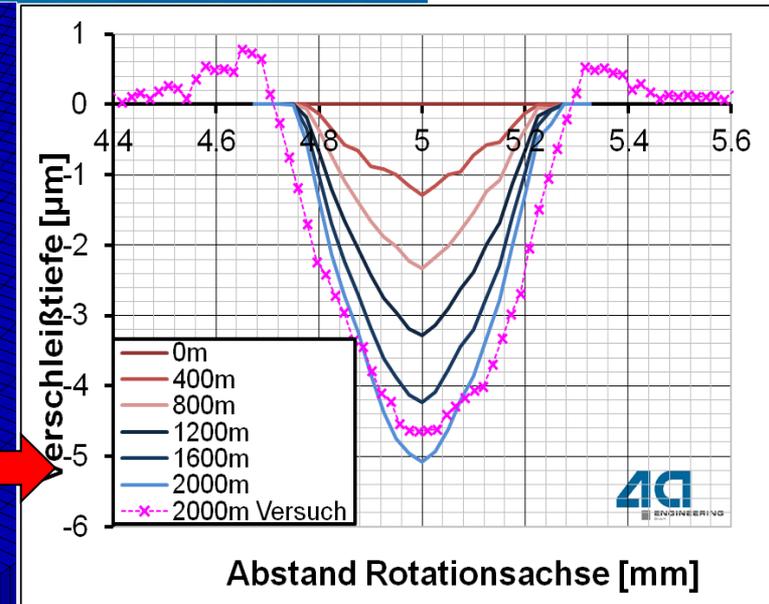
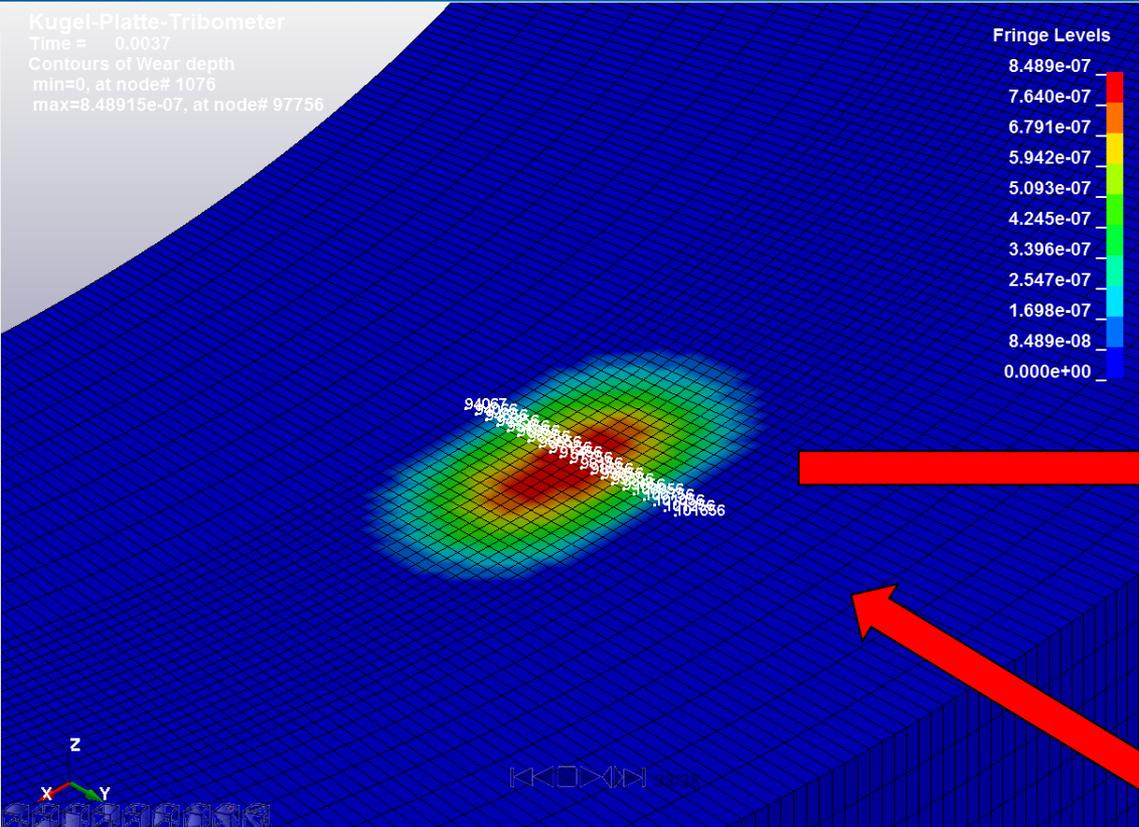
# 2. Kugel-Scheibe Tribometer

## Verschleißsimulationsablauf

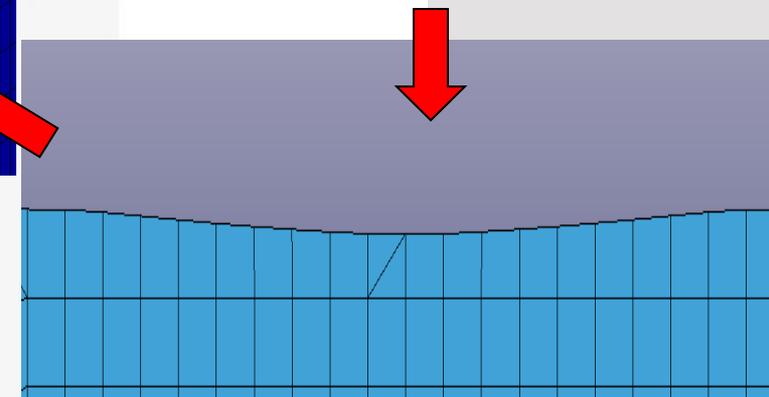


# 2. Kugel-Scheibe Tribometer

## Geometrieupdate



Verschleißtiefenentwicklung für eine Knotenreihe



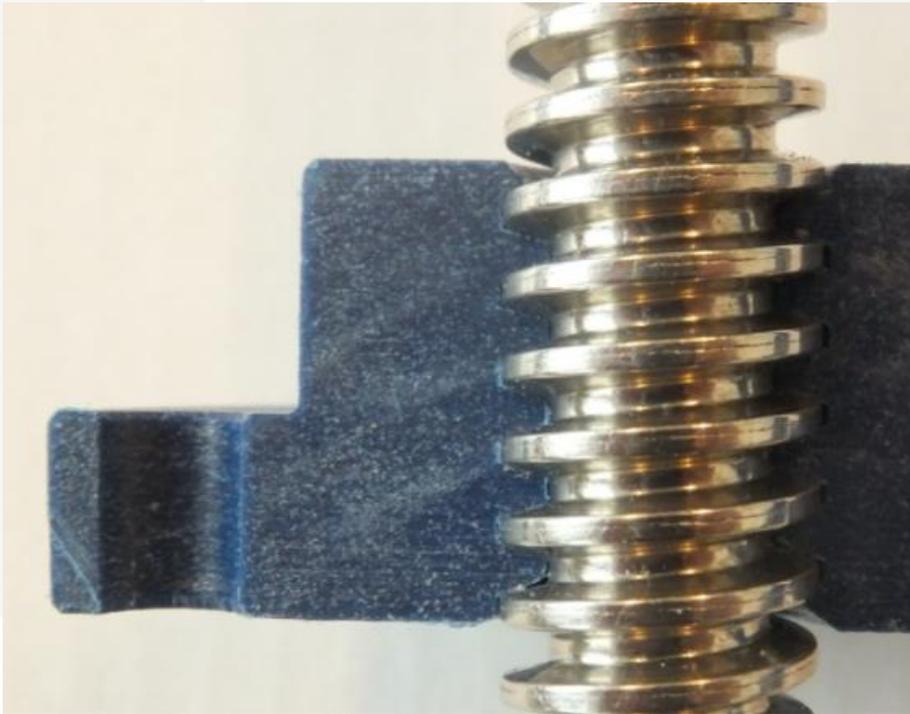
Radialer Schnitt durch Plattenmodell nach Geometrieupdate

➤ Die Verschleißtiefe aus dem rechten Diagramm wird herangezogen, um die Knoten in der Spur mit Hilfe des Python-Skriptes zu verschieben.

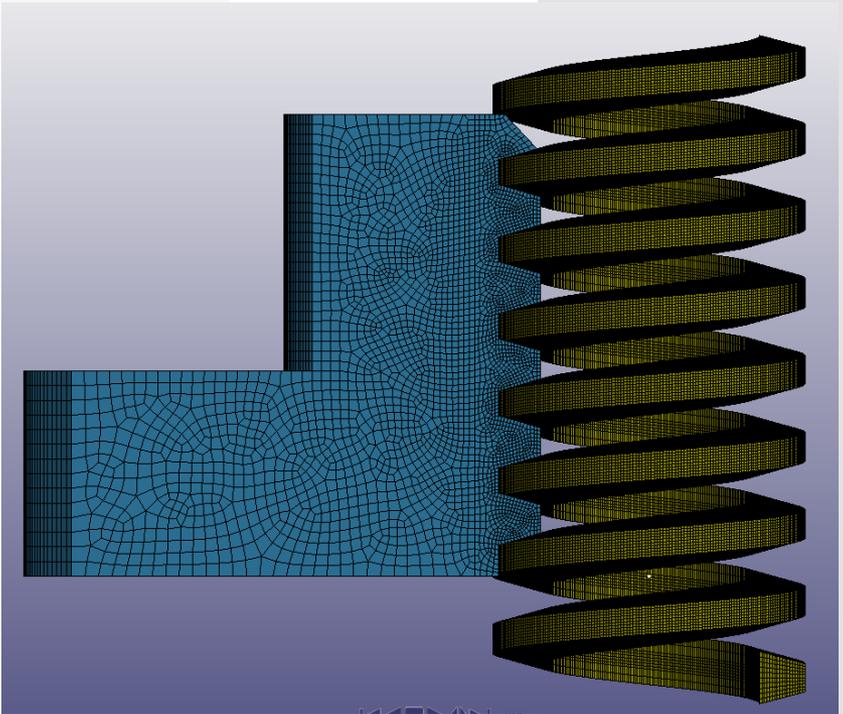
# 3. 4a Tribocompound – Prüfstand

## Modellgeometrie

- Es wurde 1/16-Modell der Mutter-Spindel Geometrie erstellt.



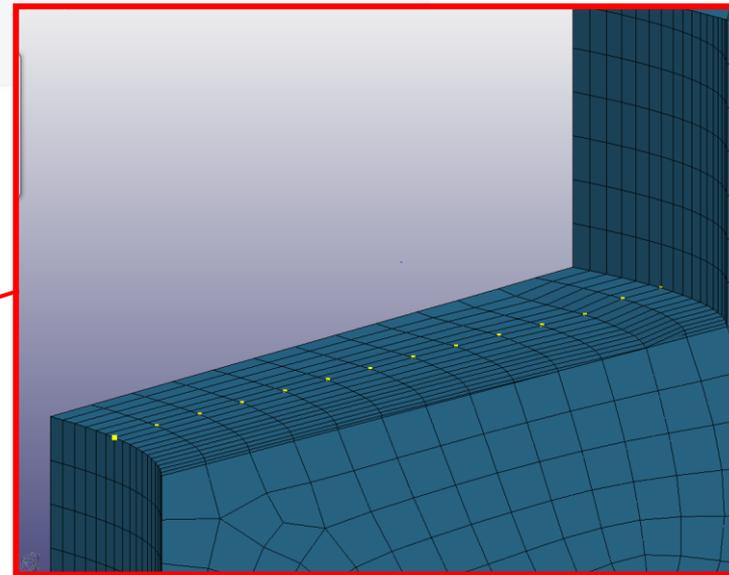
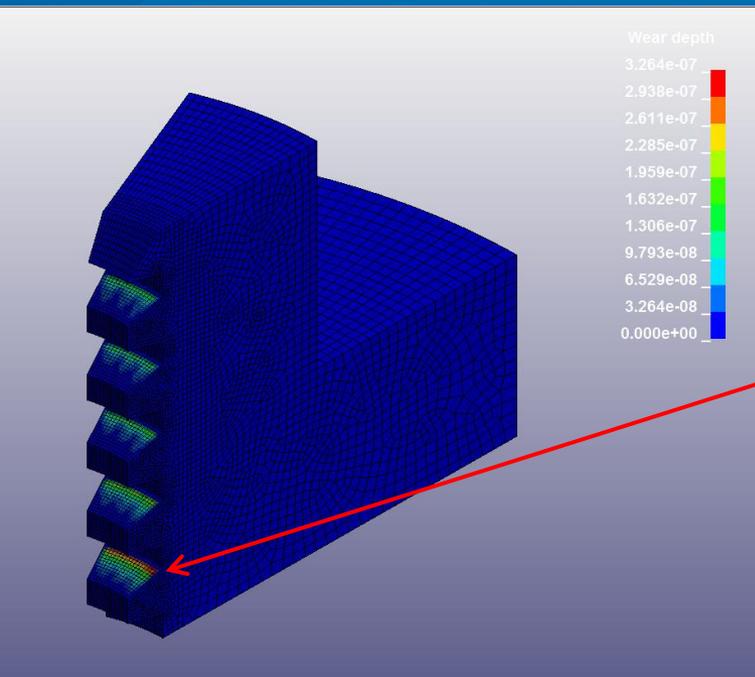
*Mutter-Spindel Geometrie*



*Vereinfachte Mutter-Spindel Geometrie 1/16-Modell  
Elementgröße im Kontaktbereich = 0.1 mm  
Anzahl Elemente Mutter ~54000*

# 3. 4a Tribocompound – Prüfstand

## Modell



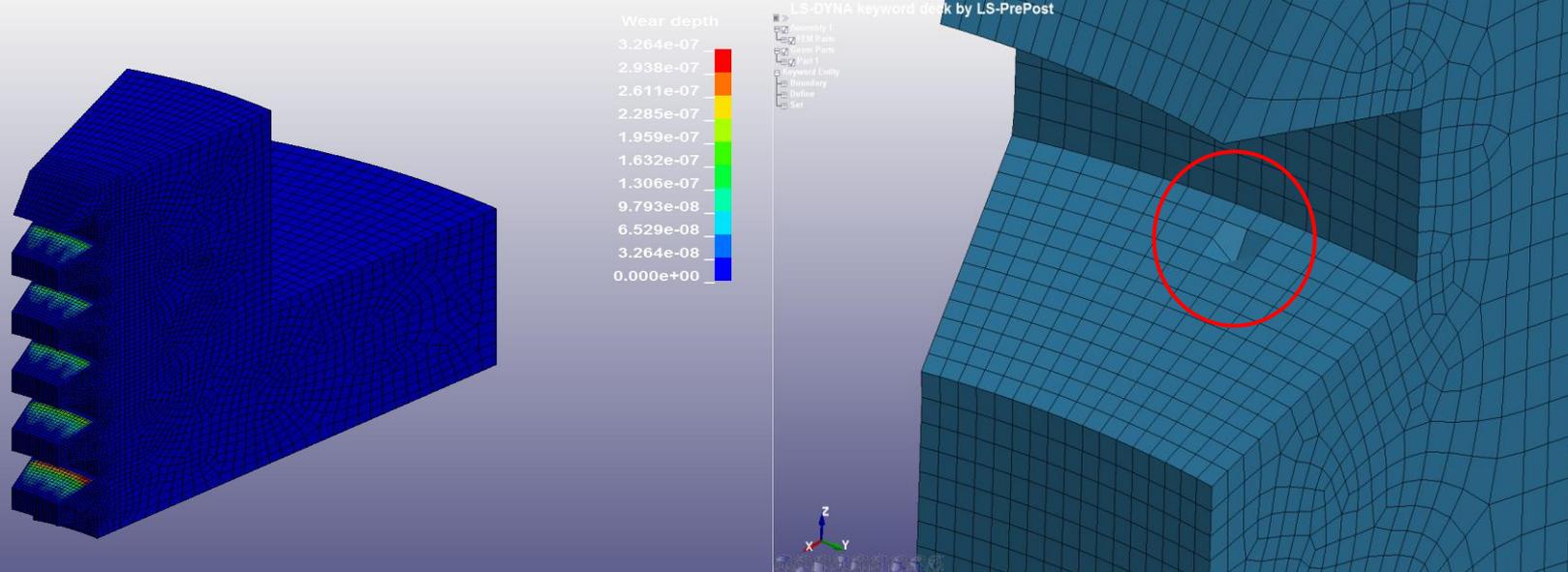
*Angepasste Geometrie*

*Verschleißtiefe Ausgangsgeometrie*

- 1 Rechenschritt benötigt ca. 20 min Rechenzeit
- Der Verschleiß im Anfangsbereich folgt dem Spannungsverlauf über der Höhe
- Die Werte der Randknoten sind 0 → Extrapolation notwendig.
- Vollmodell möglicherweise notwendig → Rechenzeit

# 3. 4a Tribocompound – Prüfstand

## Problematik Extremwerte



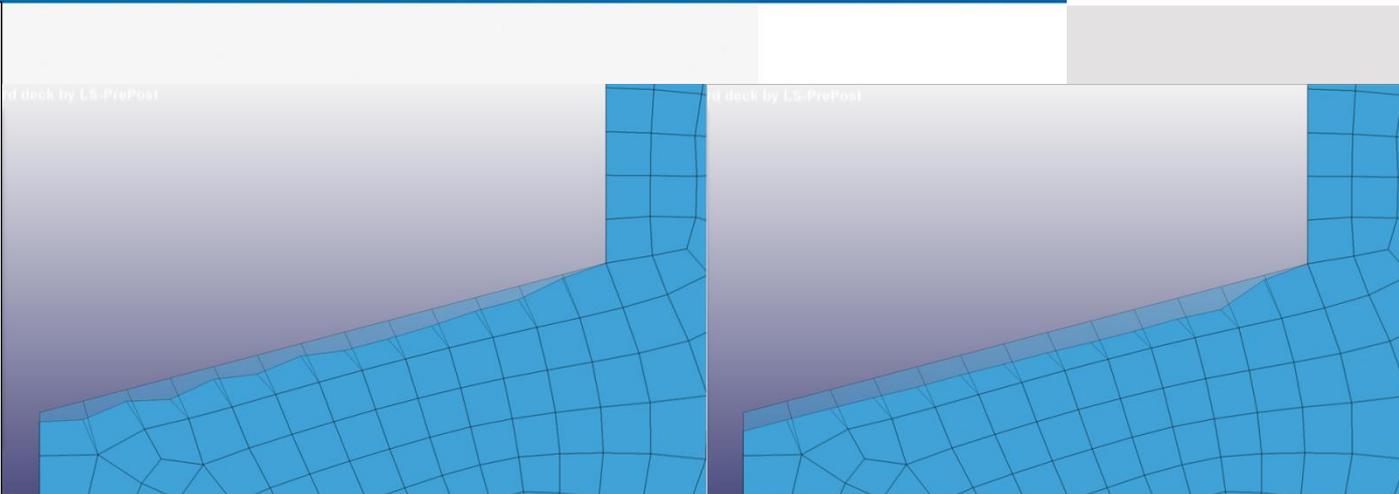
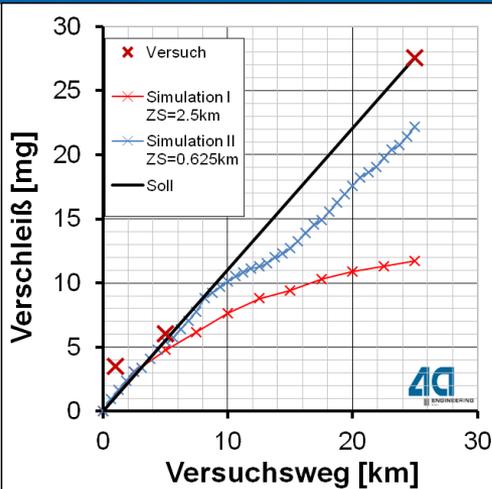
*Verschleißtiefe bei Mutter-Spindel-Modell nach einer Iteration*

*Modellgeometrie nach Skalierung der Verschleißtiefe (mit Ausreißer)*

- Bei den bisherigen Berechnungen mit LS-DYNA kam es in einzelnen Punkten aus ungeklärter Ursache zu Extremwerten im Verschleiß.
- Bei der gewählten hohen Skalierung führt dies zu unrealistischen Ergebnissen.

# 3. 4a Tribocompound – Prüfstand

## Simulationsfortschritt



*Einfluss der Skalierungsschrittweite  
Abweichung von Sollkurve durch  
Extremwertmittelung*

*Vergleich Ausgangsprofil zu Profil bei 25 km  
10 Iterationen*

*Vergleich Ausgangsprofil zu Profil bei  
25 km 40 Iterationen*

- Die Diskretisierung der Geometrie führt zu un stetigen Knotenkräften, die bei einer zu hohen Skalierung ebenfalls zu unrealistischen Ergebnissen führen.
- Durch eine Erhöhung der Schrittanzahl konnte dieser Effekt vermieden werden.
- Mit einem passenden Kriterium und einer automatischen Anpassung der Schrittweite könnten unnötige Rechenschritte vermieden werden.

- Tribologieprüfstand ermöglicht anwendungsnahe Prüfung von Mutter/Spindel-Kombinationen → realitätsnahe Geometrie und Versuchsbedingungen.
- entwickelte Simulationsmethodik bildet die Versuche qualitativ gut ab, Genauigkeit ist noch verbesserungswürdig
- Ausblick:
  - Optimierung Simulationsmethodik
  - verbesserte Verschleißmodelle

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

