Anwendungsnaher tribologischer Prüfstand und Simulation von Verschleiß

Artur Fertschej, Benjamin Hirschmann,
Peter Reithofer

4a Technologietag 2016

26. Februar 2016, Schladming

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Inhalt

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Motivation

- **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 Temperatur-verhältnisse zu ermitteln.

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

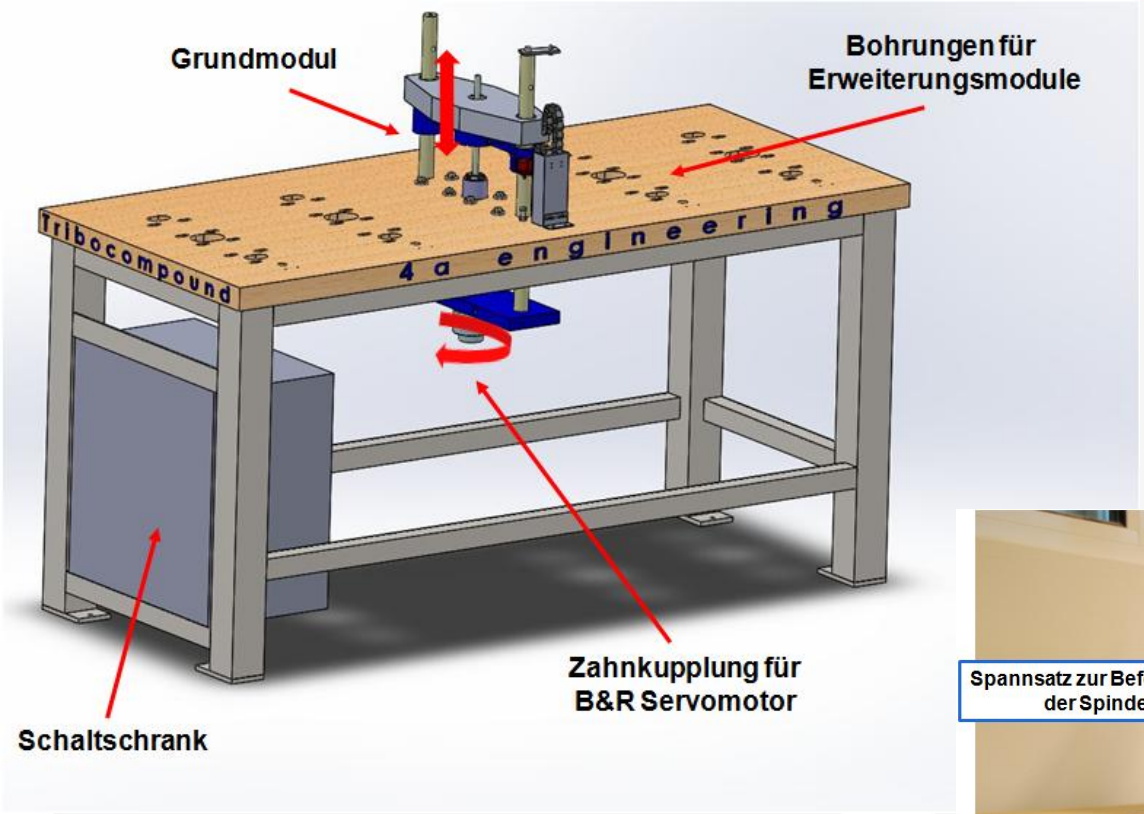
Anforderungen an den Prüfstand:

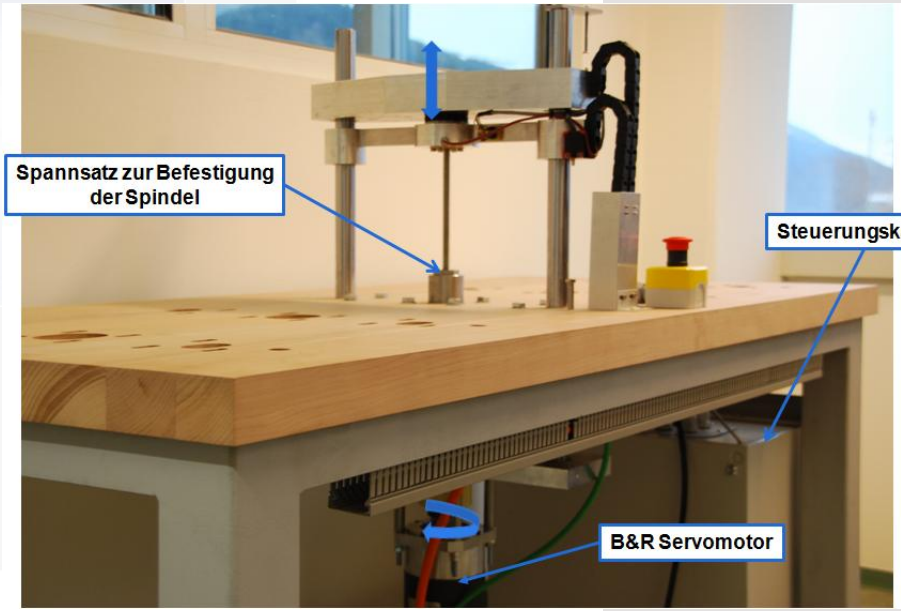
- variierbare Versuchsbedingungen
- modular erweiterbar
- Drehmoment- und Temperaturmessung
- für Dauerbetrieb geeignet

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

Gesamtübersicht





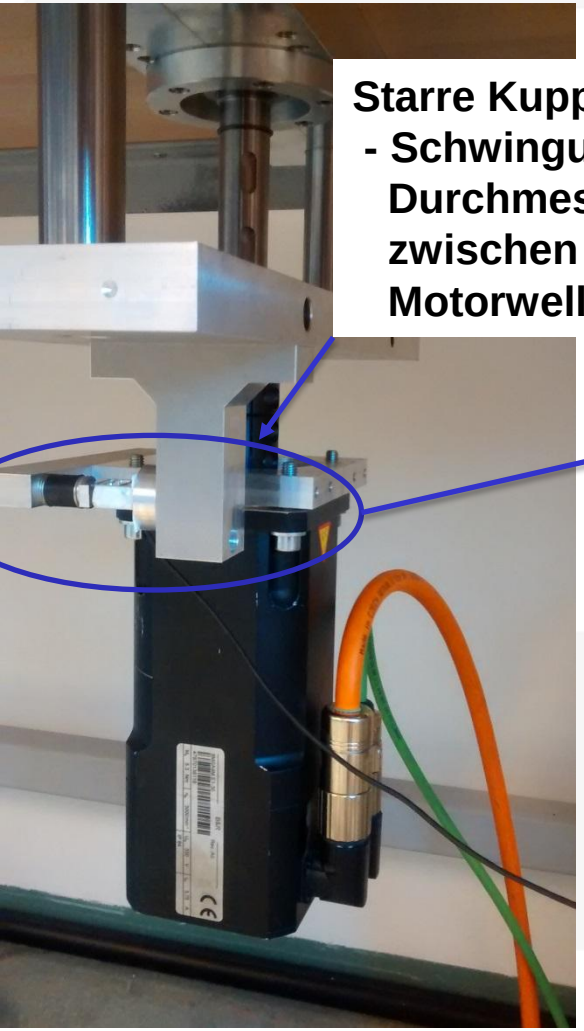
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

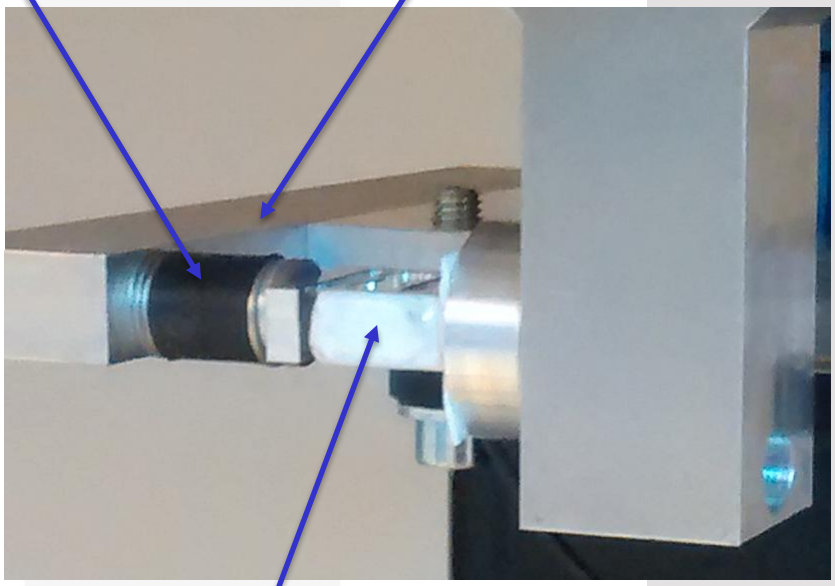
Drehmomentmessung

Dämpfungselement
- um unerwünschte Schwingungen zu dämpfen

Hebelarm
10cm (Welle – Kraftmessdose)



Starre Kupplung
- Schwingungen durch Durchmesserdifferenz zwischen Welle und Motorwelle



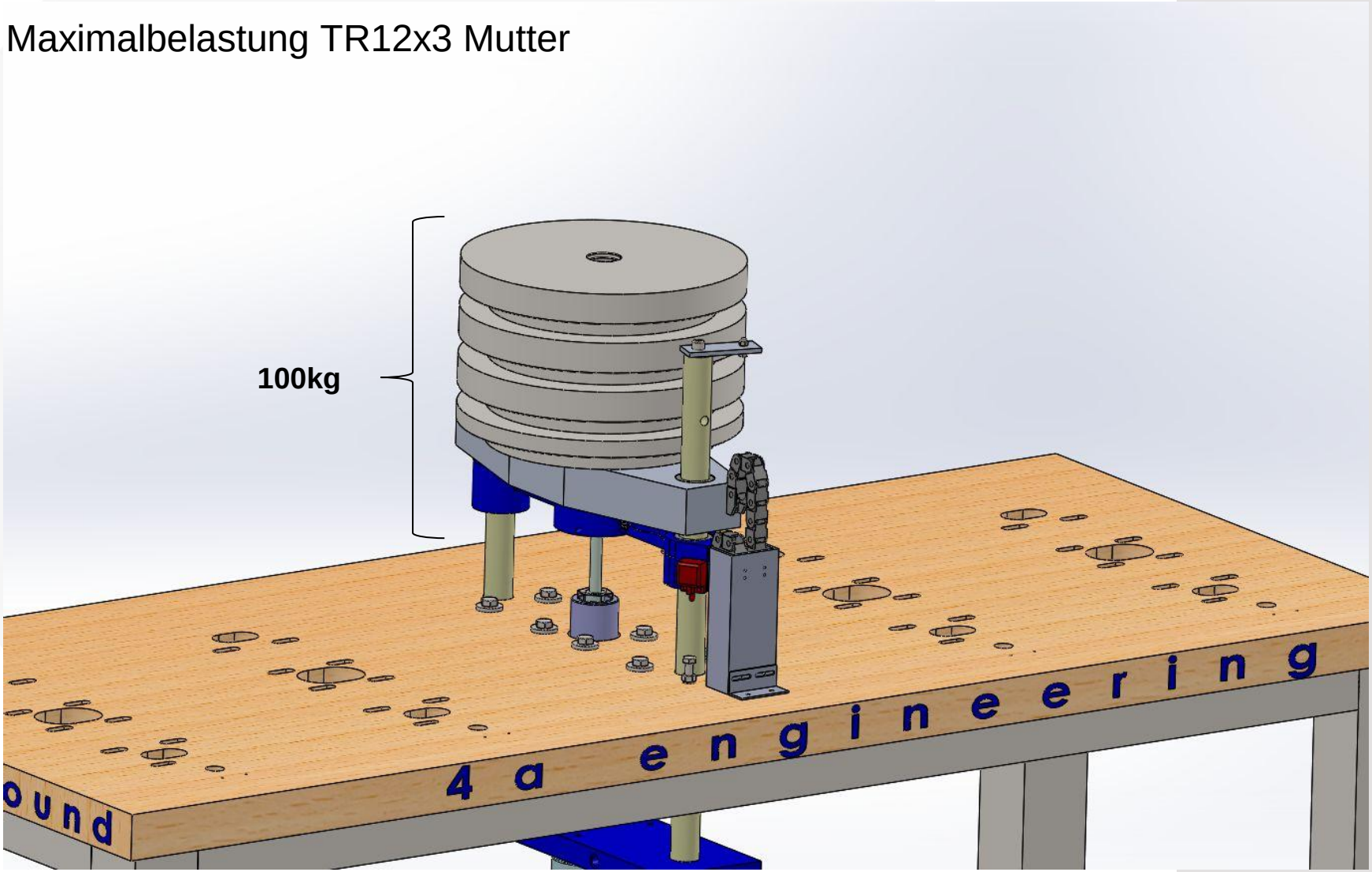
Zug/Druck-Kraftmessdose

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

Gesamtübersicht

- Maximalbelastung TR12x3 Mutter

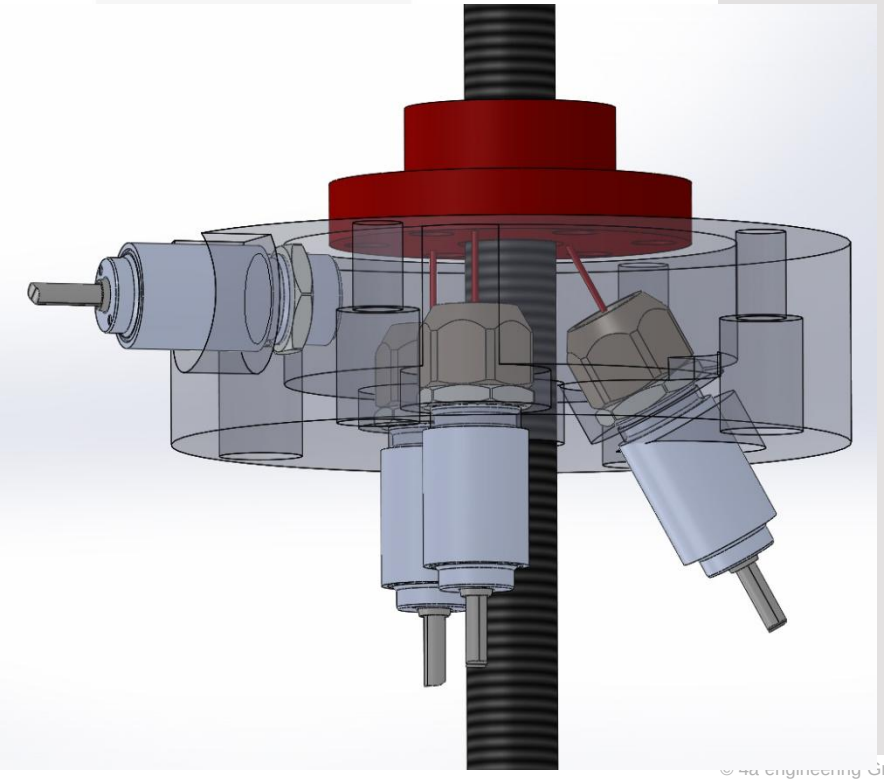


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

Temperaturmessung

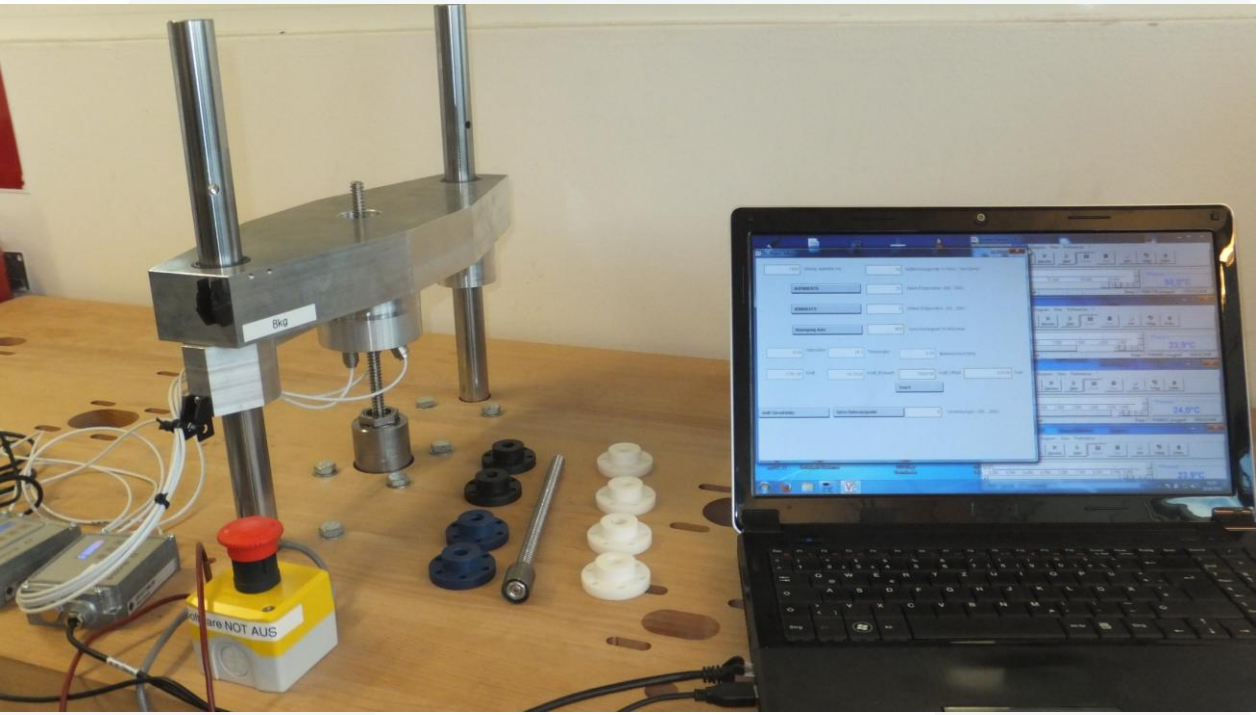
- Insgesamt 4 IR-Sensoren, um den zeitlichen Verlauf der Temperatur von Mutter und Spindel messen zu können.
- 1 IR-Sensor misst die Temperatur der Spindel (allerdings erst ab 50°C möglich)
- 3 IR-Sensoren messen die Temperatur der Mutter in unterschiedlichem Abstand zur Spindel; damit kann die örtliche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

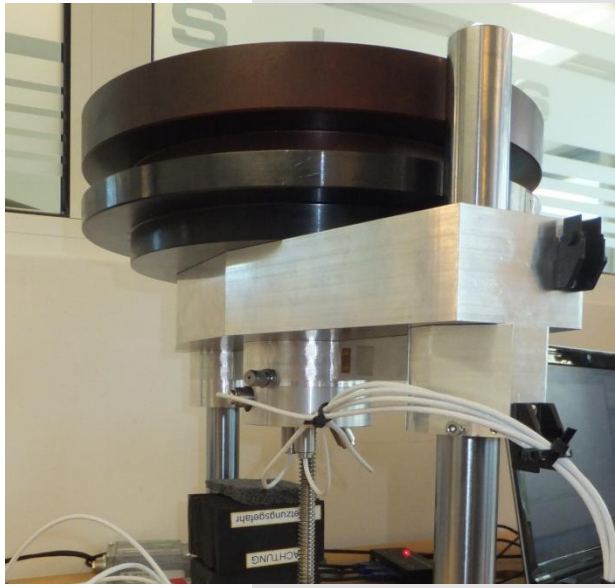


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

Aktueller Stand



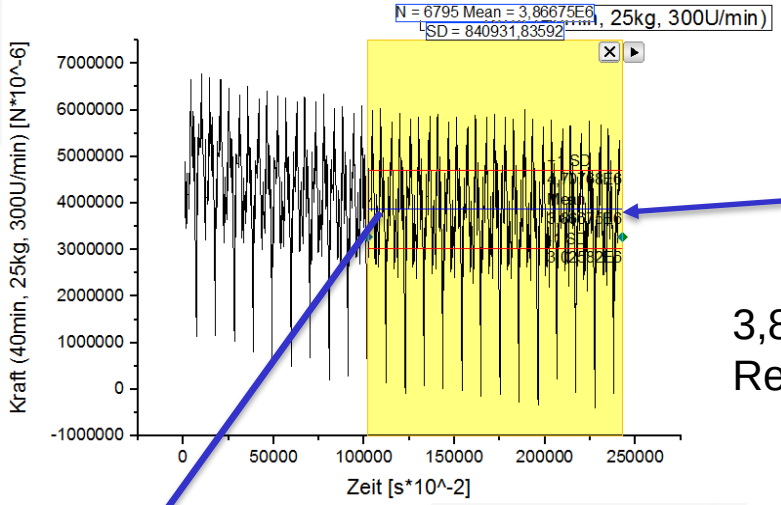


Versuchsstand ist auch im Seminarraum Grimming ausgestellt und im Einsatz.

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

Auswertung



Mittelwert

3,866 N entsprechen einer Reibzahl μ=0,045

Reibzahl:

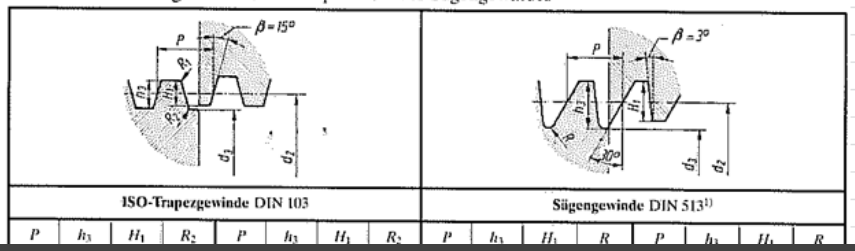
Mittelwert der gemessenen Kraft:	F_mess	3 866 700	10^-6 N	
Standardabweichung:	stabw_F_mess	102 869	10^-6 N	
Axialkraft	F_A	250	N	
Länge des Hebelarms:	l_hebel	100	mm	
Flankenwinkel im Achsschnitt:	beta	0,26179939	rad	15°
Steigung des Gewindes:	P_h	3	mm	
Nenndurchmesser Spindel:	d_sp	12	mm	
Reibwert 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	10,2369	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	0,046298552		
Reibzahl der Mutter:	**μ**	**0,045**	-	
Pressung der Flanken des Gewindes:	**p**	**1,12**	**N/mm²**	

Flankenpressung:

tragende Mutternhöhe:	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 Sägengewindes



ghts reserved

Ergebnisse
Versuche

- 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

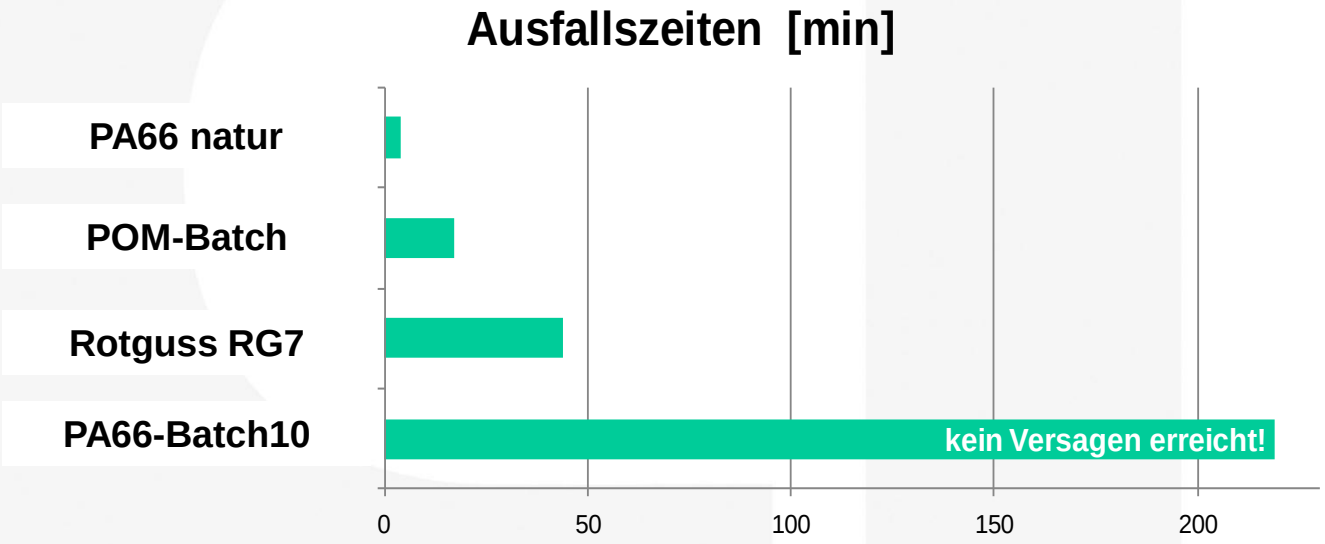
kein Versagen erreicht!

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Ergebnisse

Versagenszeiten der geprüften Muttern

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



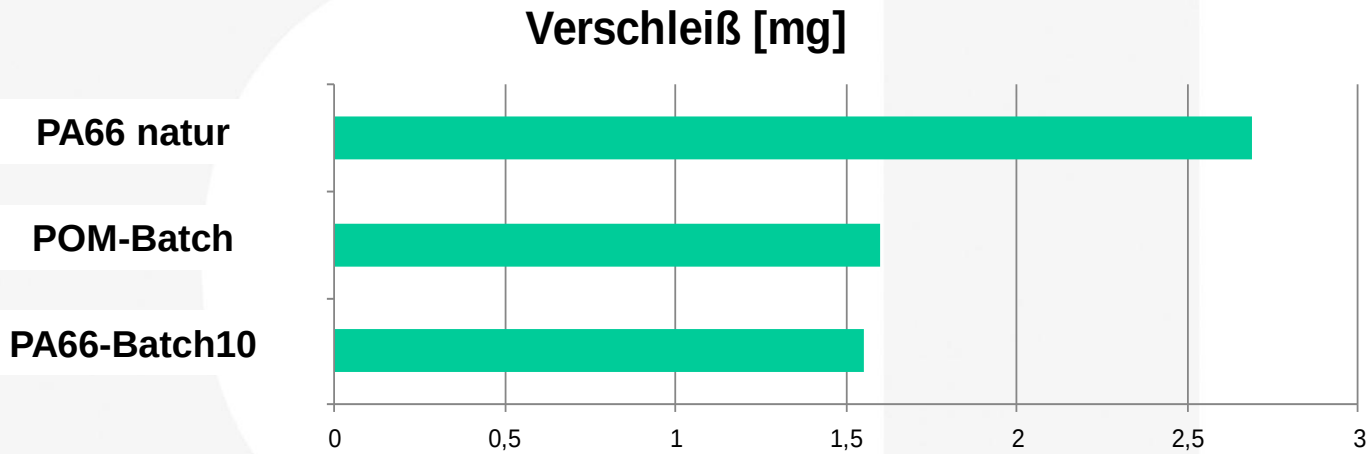
- Beim PA66-Batch10 bildete sich auf der Spindel eine schwarze Schicht.

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

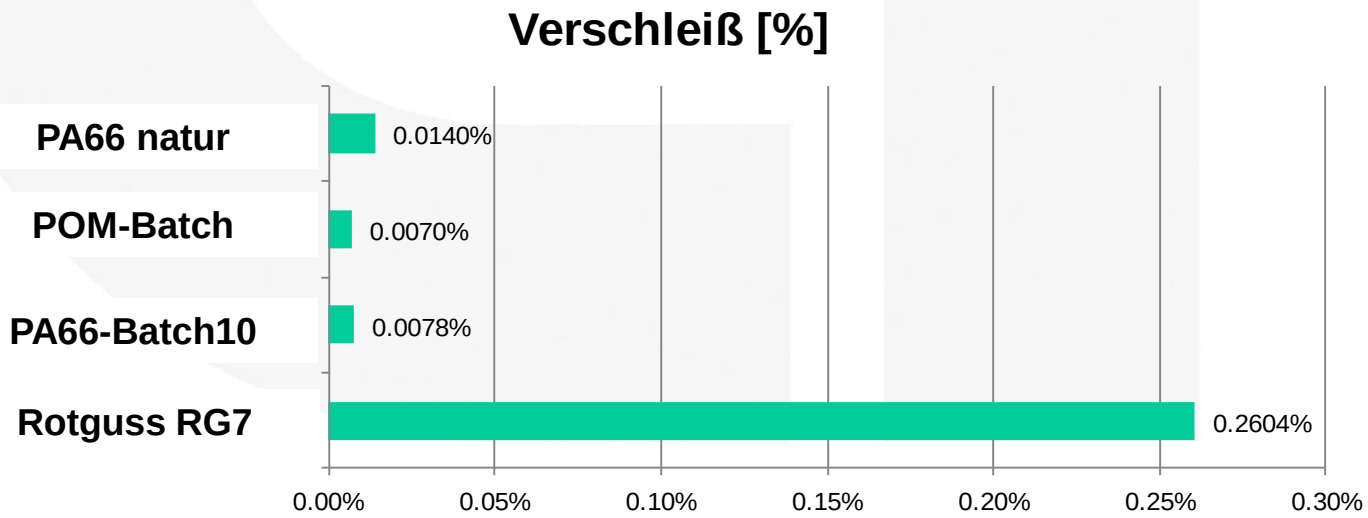
Ergebnisse

Verschleiß der geprüften Muttern

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



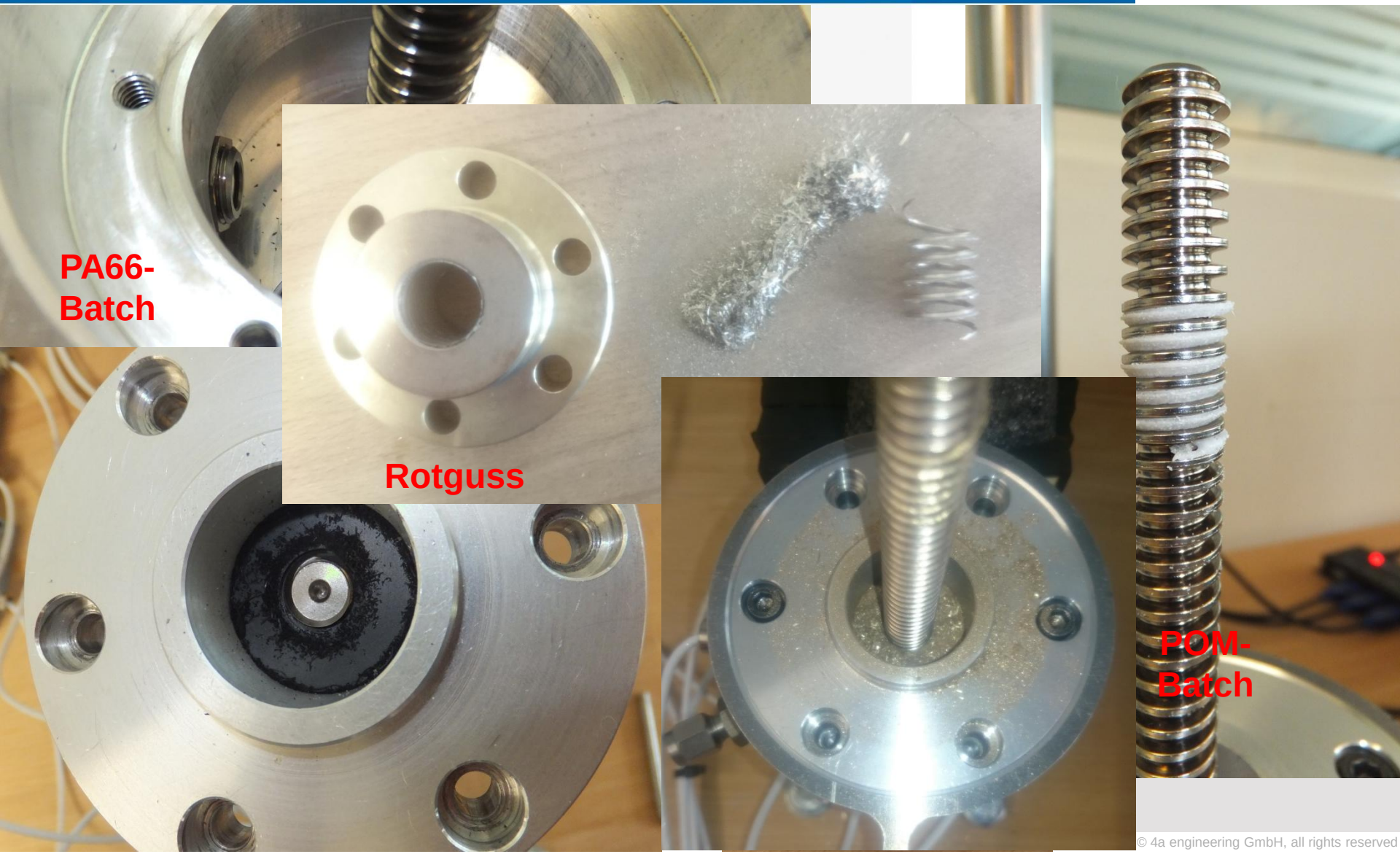
vgl: Rotguss: 406 mg



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Ergebnisse

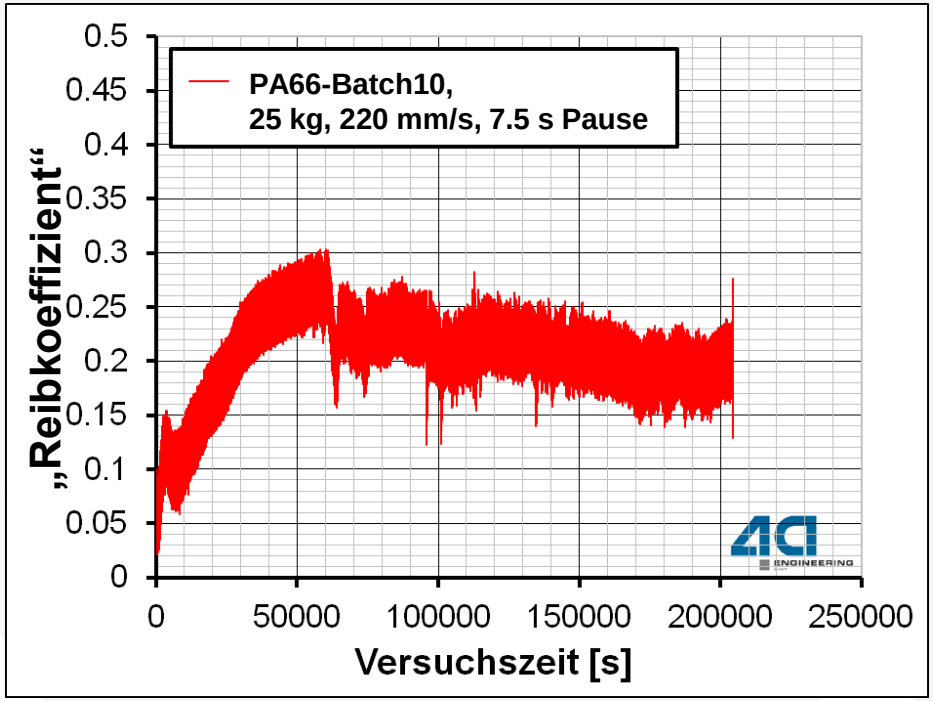
Verschleiß der geprüften Muttern

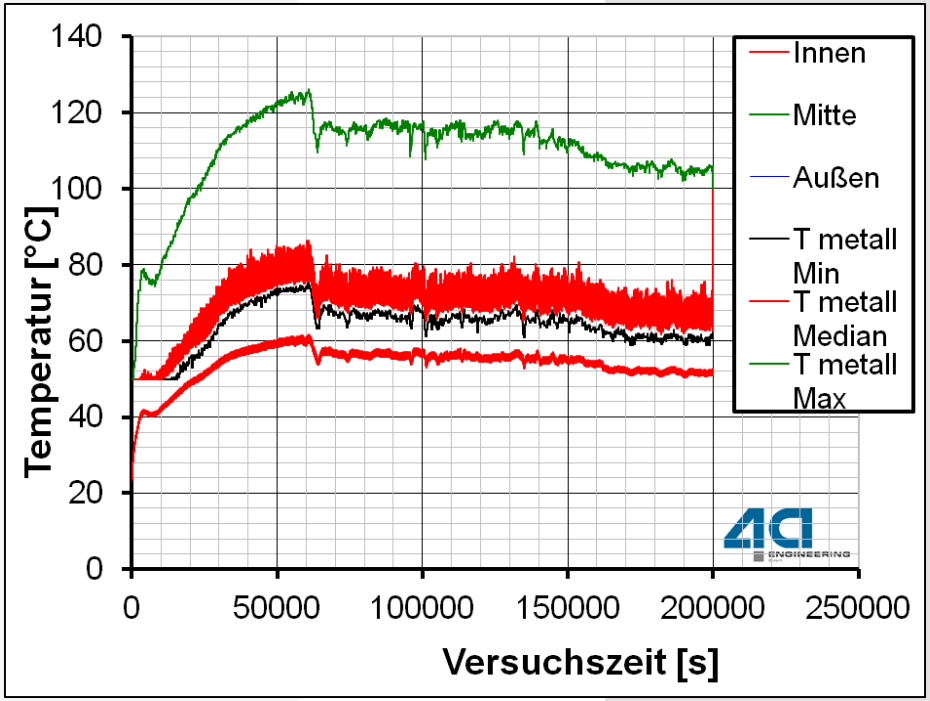


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Ergebnisse

Temperatur, „Reibkoeffizient“



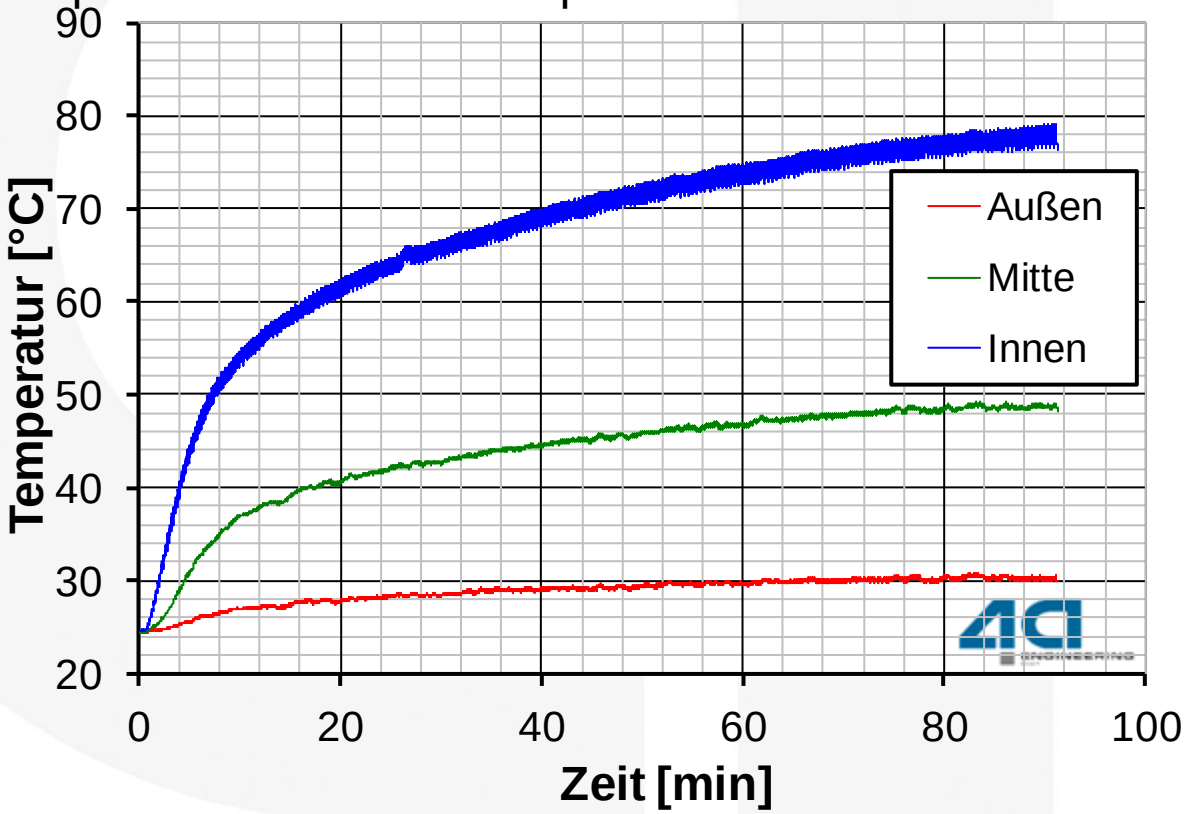


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Ergebnisse

Temperaturentwicklung bei den geprüften Muttern

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

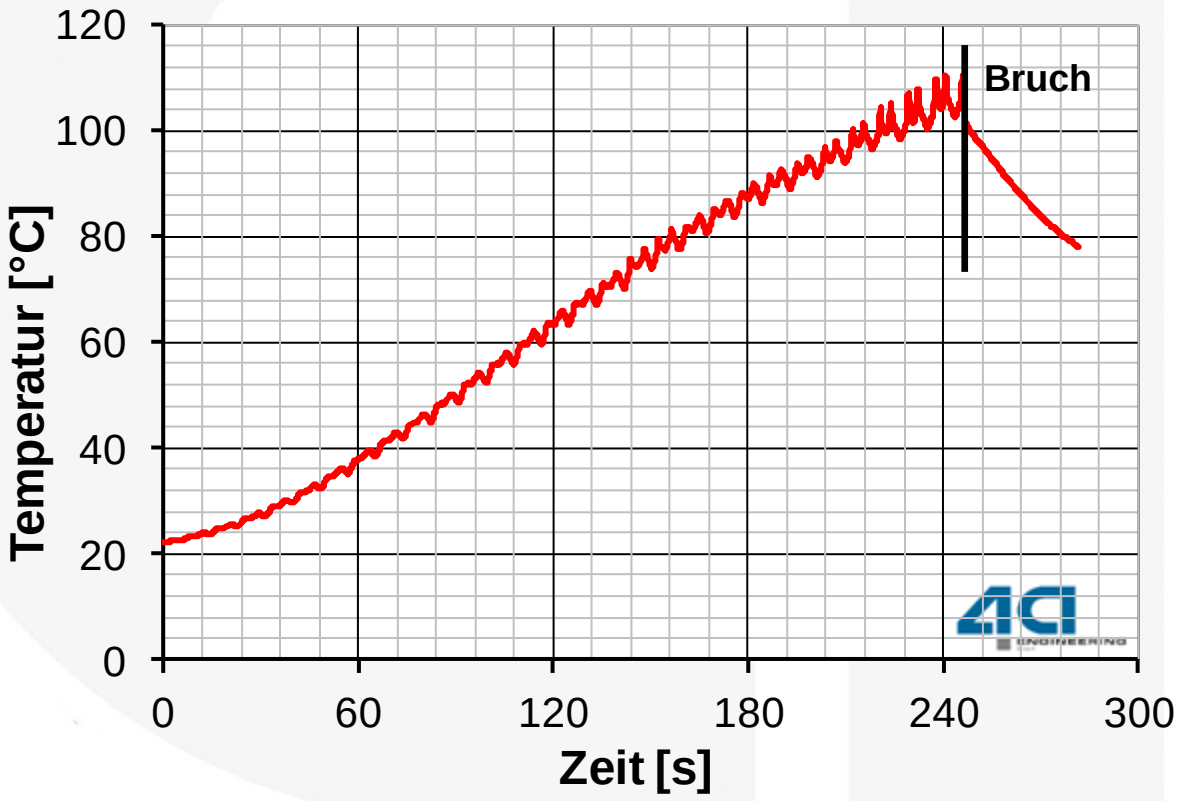


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Ergebnisse

Temperaturentwicklung bei den geprüften Muttern

- Beispiel: PA natur mit 50 kg Belastung , 450 U/min, ohne Pause
- vgl: Maximale Spindeltemperatur 237°C

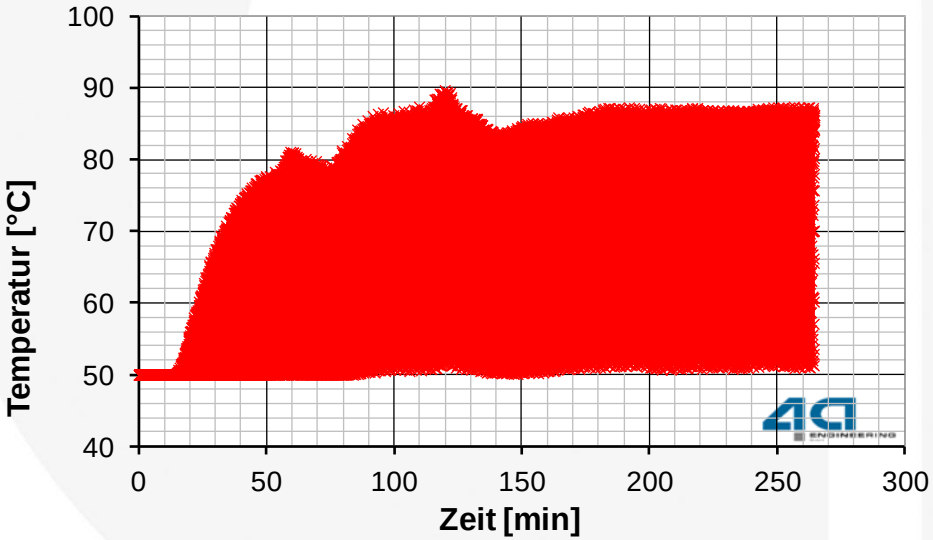


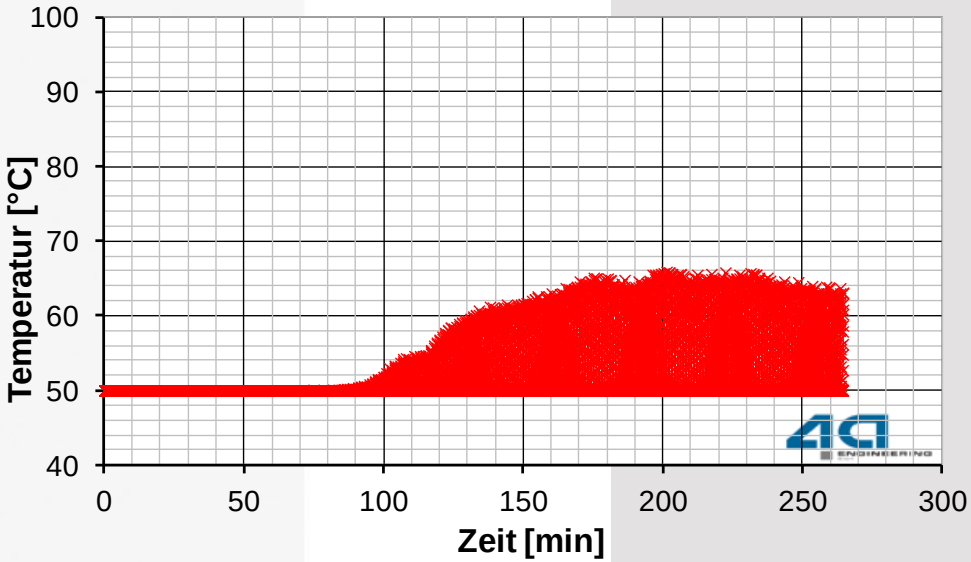
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Ergebnisse
Einfluss der Pausenzeit

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

  links: ohne Pause; rechts: mit 30 Sekunden Pause

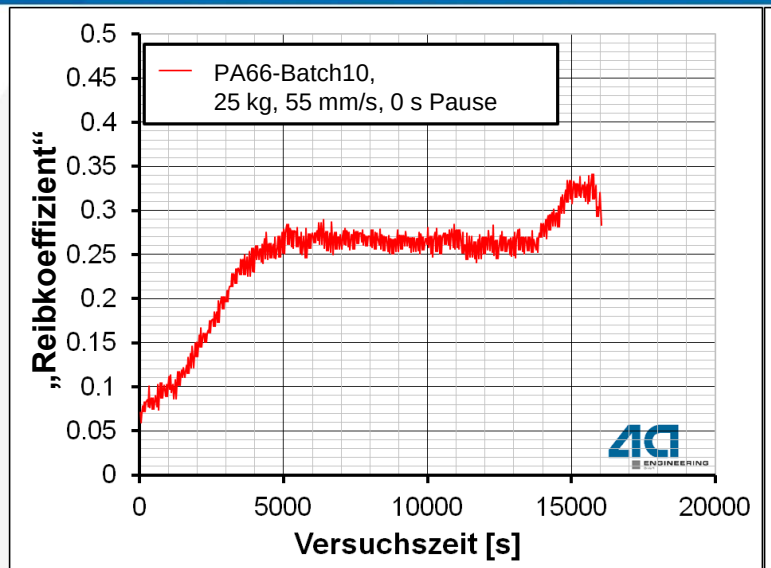


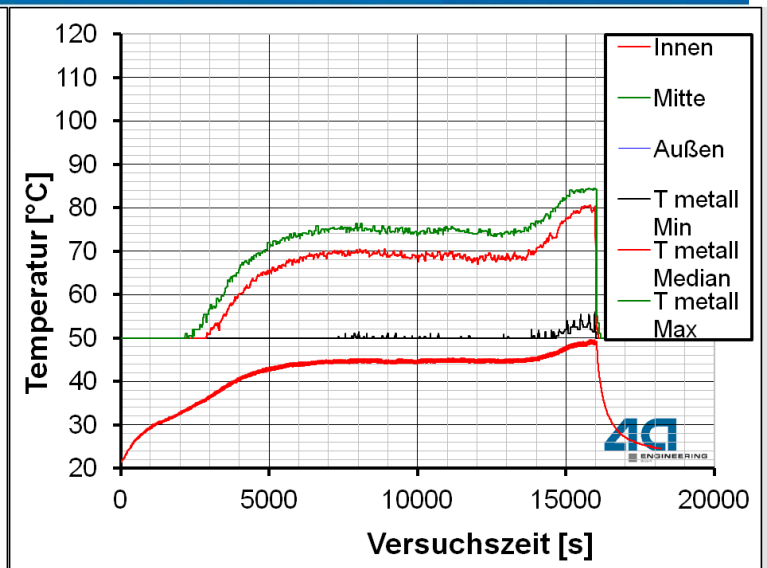


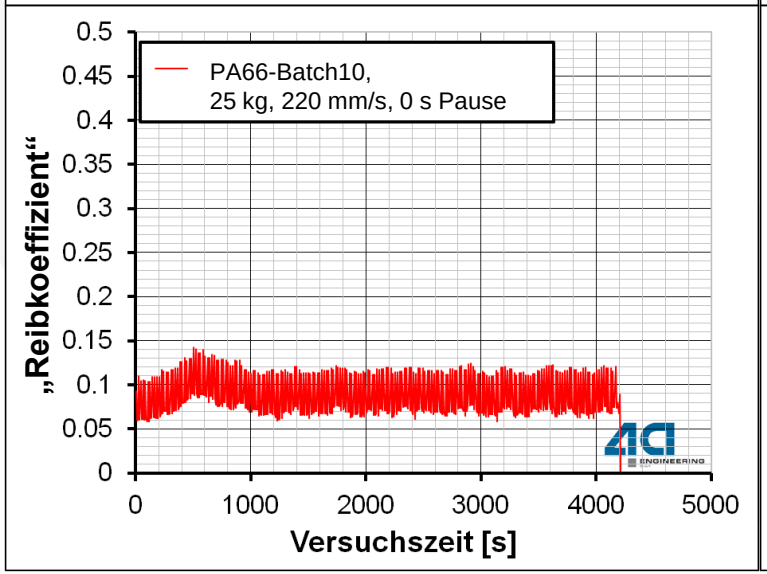
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

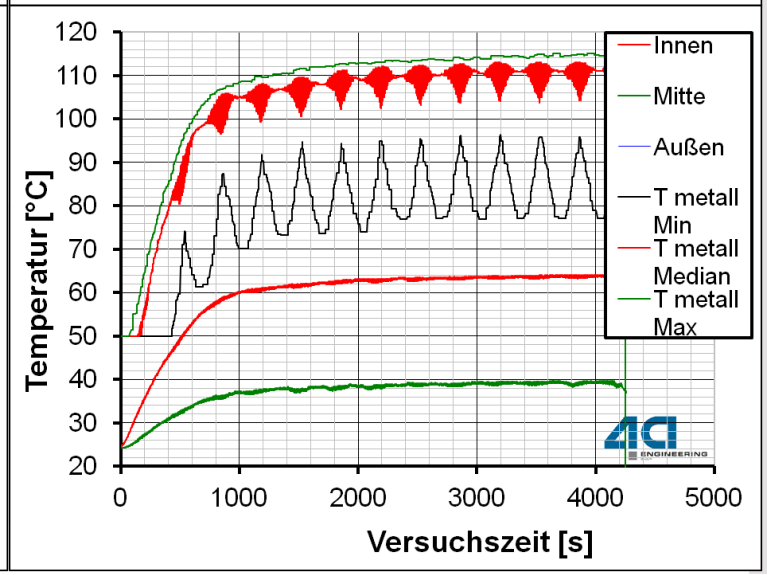
Ergebnisse

Einfluss Geschwindigkeit









© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Simulation

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Verschleißgesetz

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

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

V_w *Verschleißvolumen* $[mm^3]$, 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* $[MPa^{-1}]$, p *Kontaktdruck* $[MPa]$

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

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

α, β *Modellparameter* $[-]$, A *Kontaktfläche* $[mm^2]$, 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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Verschleißgesetz

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 → Geometrieadaption, Archard‘s Verschleißgesetz

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

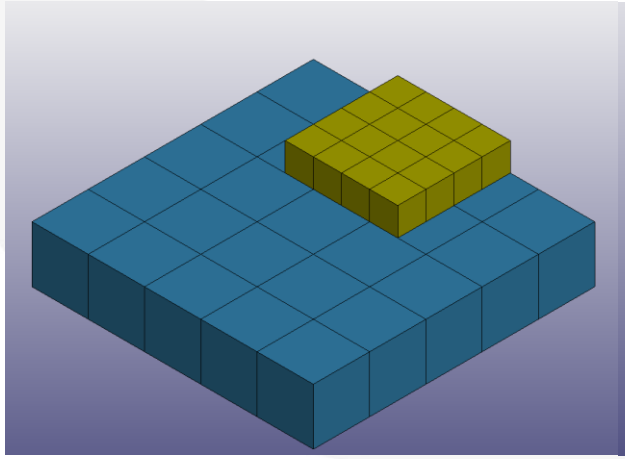
Simulation
Auftretende Probleme

- 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.

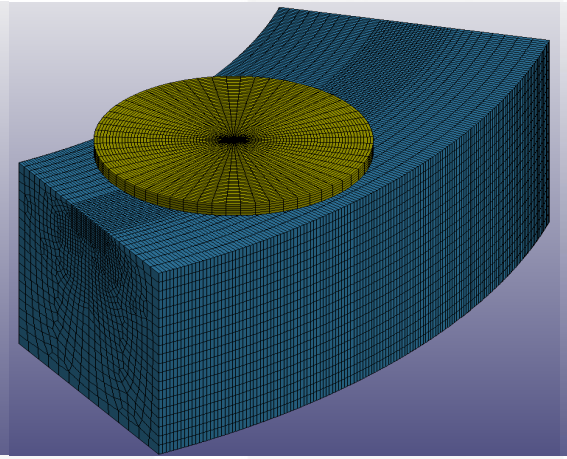
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Methodenentwicklung

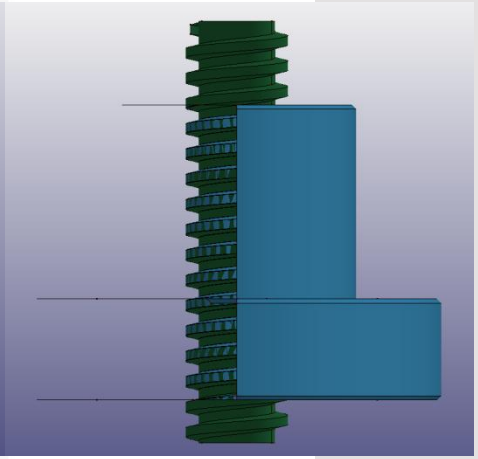
- Die Methodenentwicklung erfolgt über 3 verschiedene Simulationsmodelle:
  - 1. Simple Mind Modell – Aufgabe ist es die entwickelten Methoden auszutesten.
  - 2. Simulation eines standardmäßig eingesetzten Tribometerprüfstandes (Kugel-Scheibe/Stift-Scheibe Aufbau)
  - 3. Simulation des 4a Tribocompound Versuchsstandes



1. Simple Mind Modell



2. Kugel/ScheibeTribometer Modell



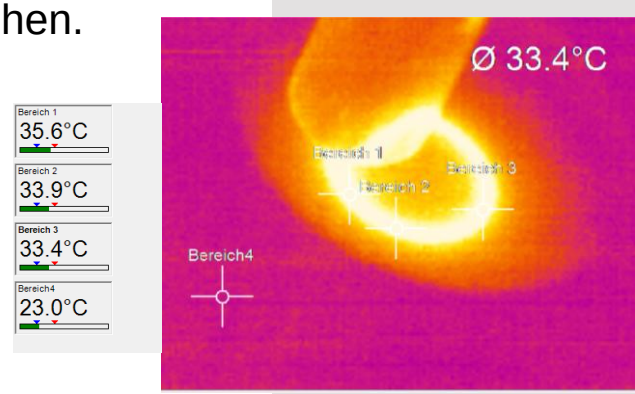
3. 4a Tribocompound Prüfstand Modell

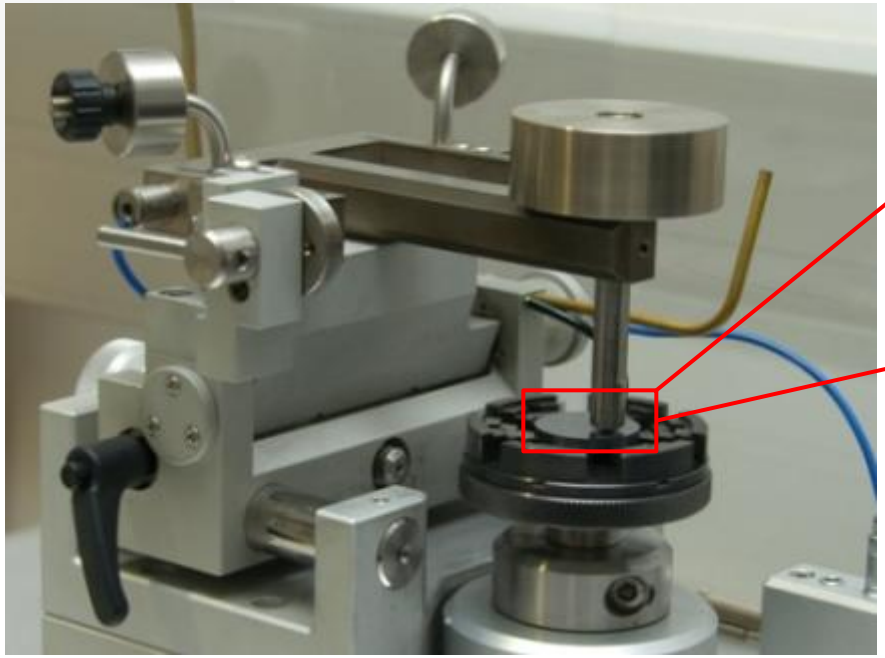
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

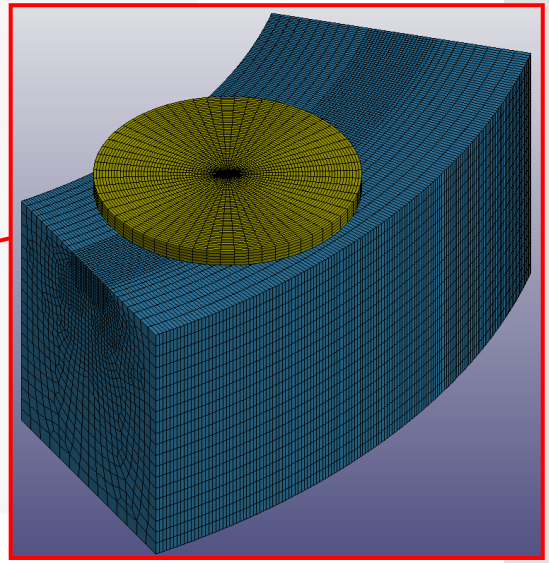
2. Kugel-Scheibe Tribometer

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.



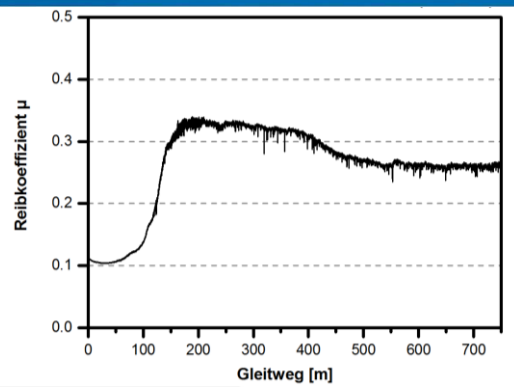


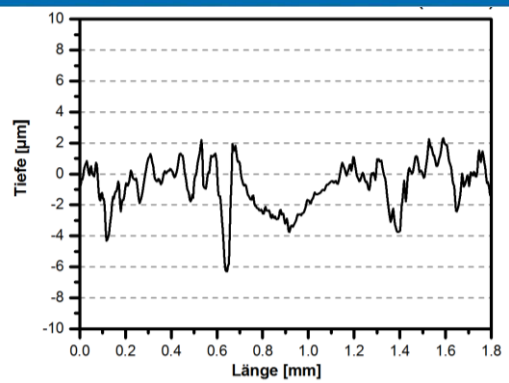


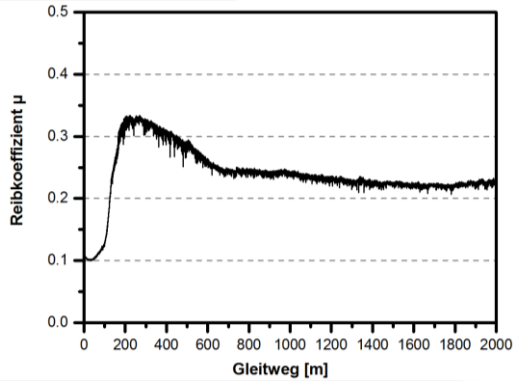
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

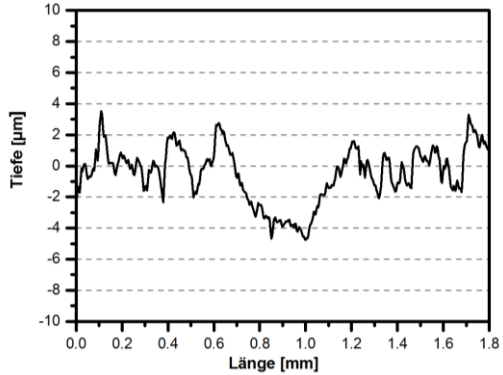
2. Kugel-Scheibe Tribometer

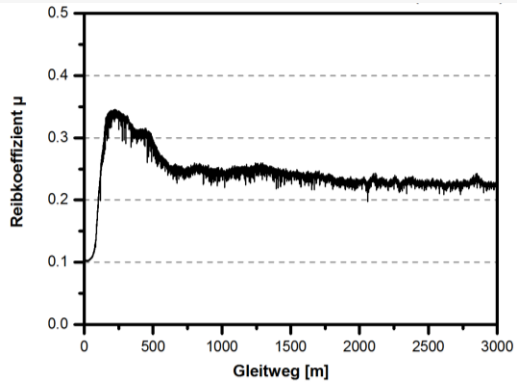
Ergebnisse PA66–Batch10

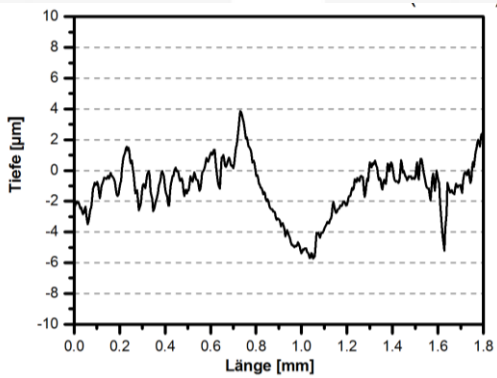








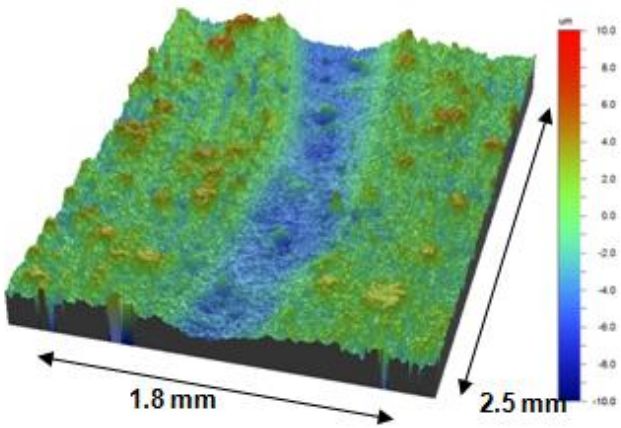




750 m	
Reibkoeffizient µ	~ 0.26

2000 m	
Reibkoeffizient µ	~0,24

3000 m	
Reibkoeffizient µ	~0,24

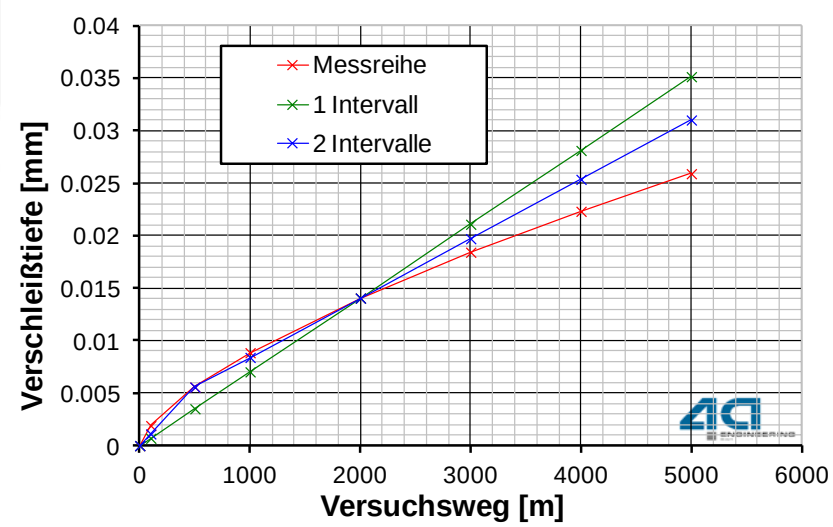


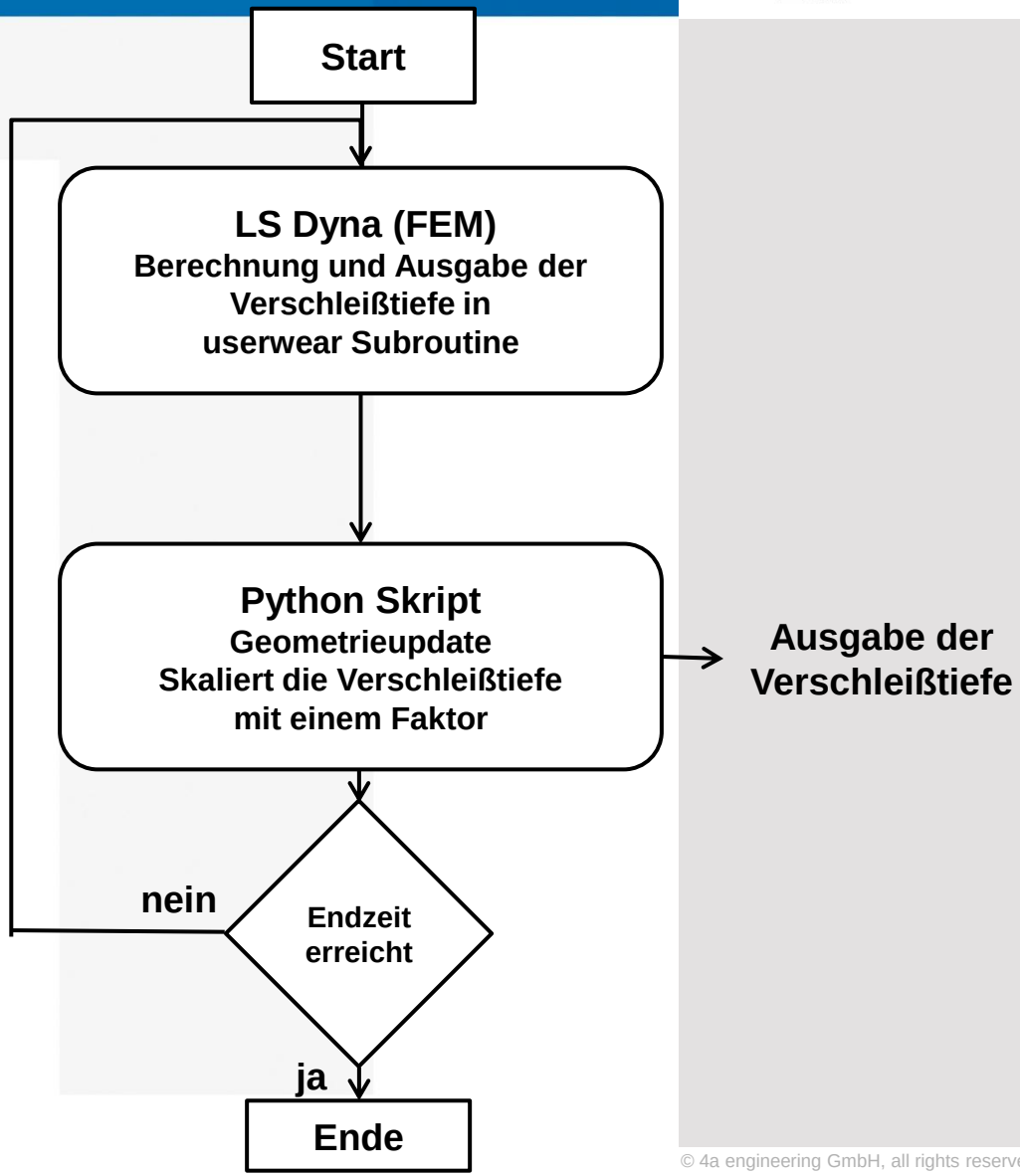
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

2. Kugel-Scheibe Tribometer

Verschleißsimulationsablauf

- Versuchsweg wird in Intervalle unterteilt.
- Für jedes Intervall wird eine FEM Simulation durchgeführt, die Verschleißtiefe nach Verschleißgesetz berechnet → Ergebnis: einmalige Belastung.
- Ergebnis wird mit einem Faktor skaliert, Geometrieänderung durchführen.
- Berechnung des nächsten Intervalls

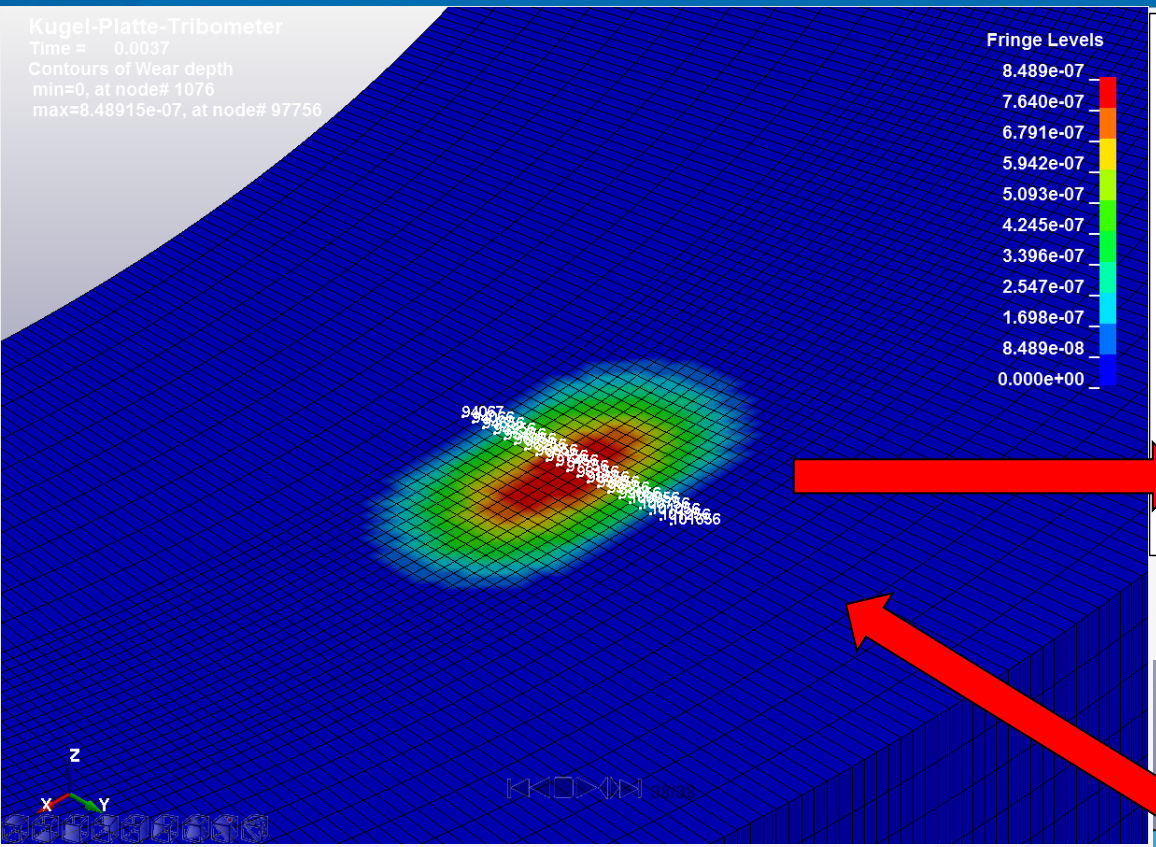


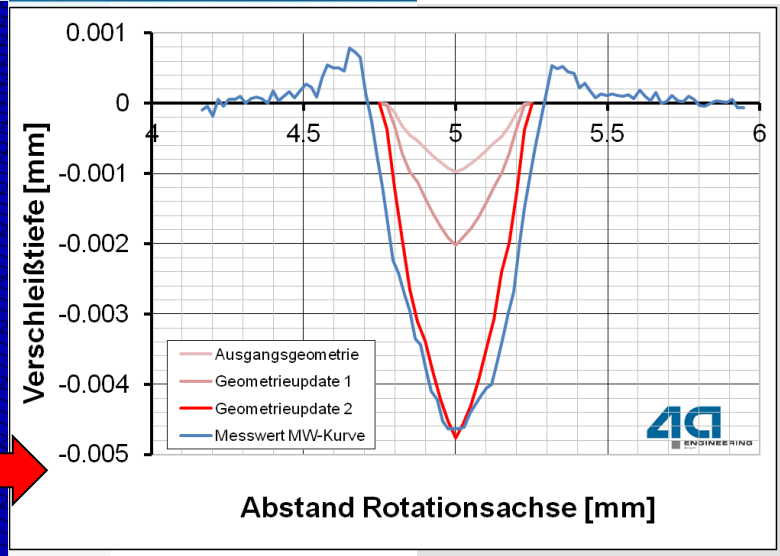


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

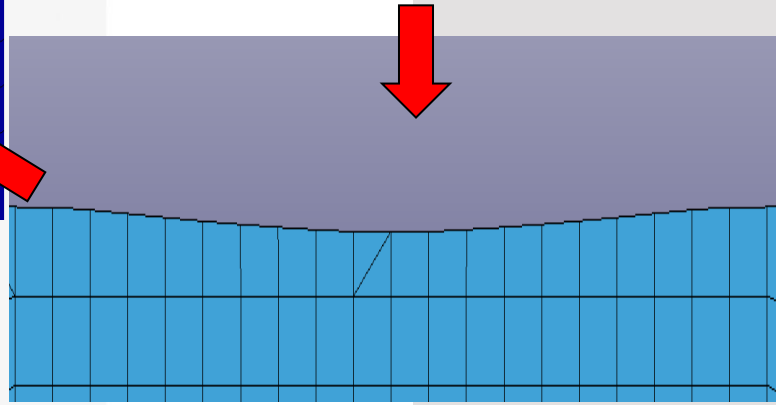
2. Kugel-Scheibe Tribometer

Geometrieupdate





Verschleißtiefenentwicklung für eine Knotenreihe



Radialer Schnitt durch Plattenmodell nach Geometrieupdate

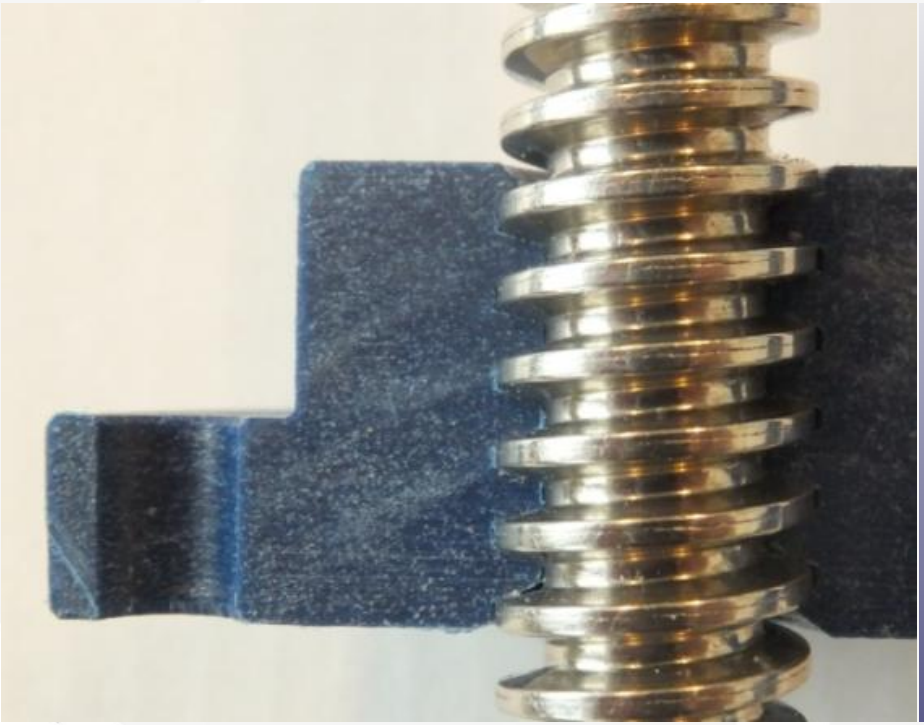
- Die Verschleißtiefe aus dem rechten Diagramm wird herangezogen, um die Knoten in der Spur mit Hilfe des Python-Skriptes zu verschieben.

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

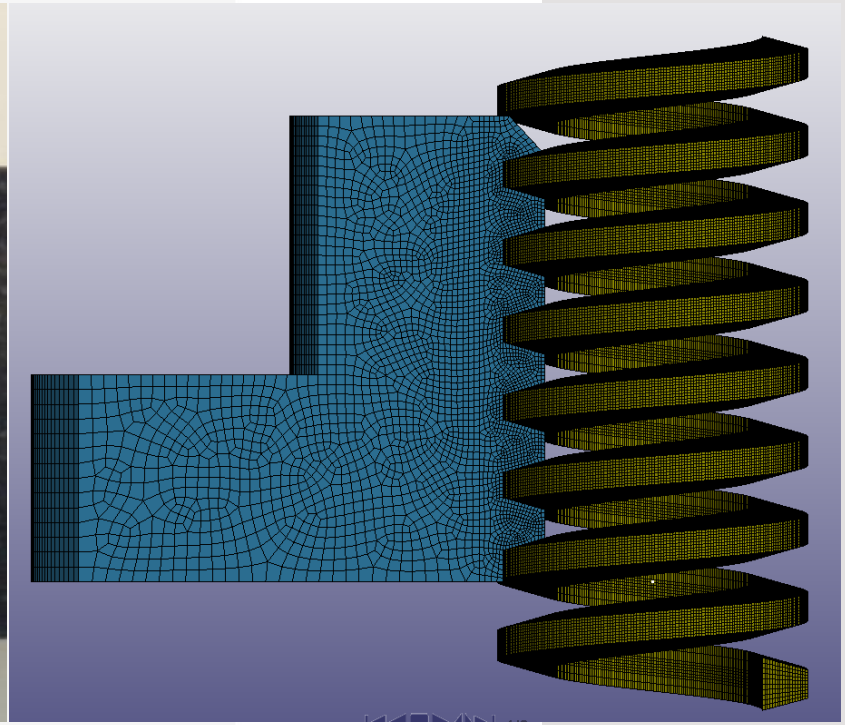
3. 4a Tribocompound – Prüfstand

Modellgeometrie

- Es wurde nur ein sechzehntel der Mutter modelliert.



Vereinfachte Mutter-Spindel Geometrie

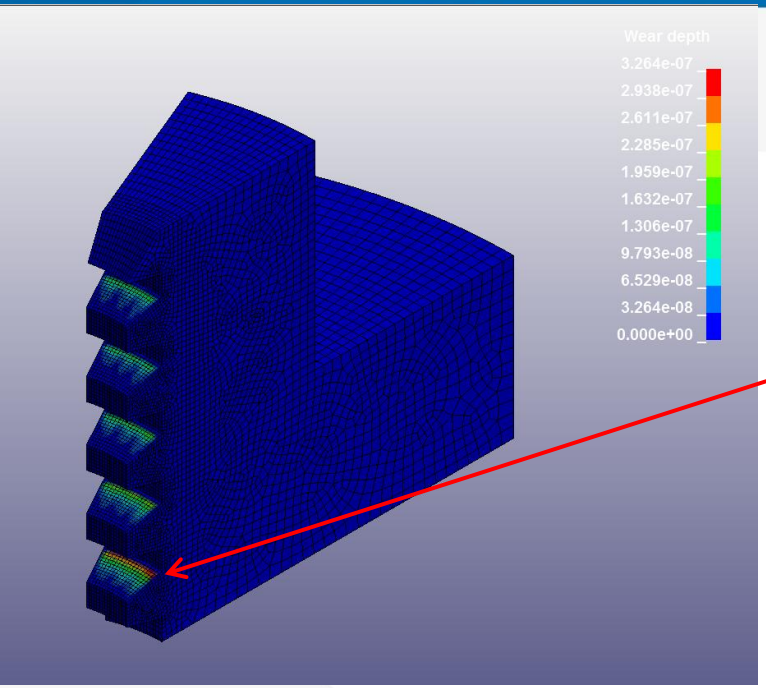


Vereinfachte Mutter-Spindel Geometrie 1/16
Elementgröße im Kontaktbereich = 0.1 mm
Anzahl Elemente Mutter = 53703
~3GB RAM benötigt

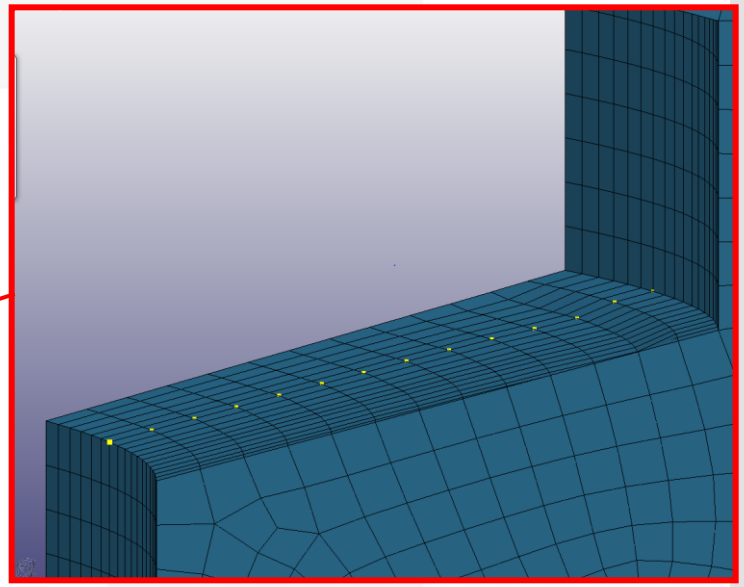
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

3. 4a Tribocompound – Prüfstand

Modell



Verschleißtiefe Ausgangsgeometrie



Angepasste Geometrie

- 1 Rechenschritt benötigt ca. 20 min Rechenzeit
- Der Verschleiß im Anfangsbereich folgt dem Spannungsverlauf über der Höhe
- Die Werte der Randknoten sind 0. Eine Extrapolation ist notwendig.
- Eventuell muss ein volles Modell genommen werden (problematisch, da Rechenzeit proportional dem Quadrat der Elementanzahl).

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Simulation
Ausblick

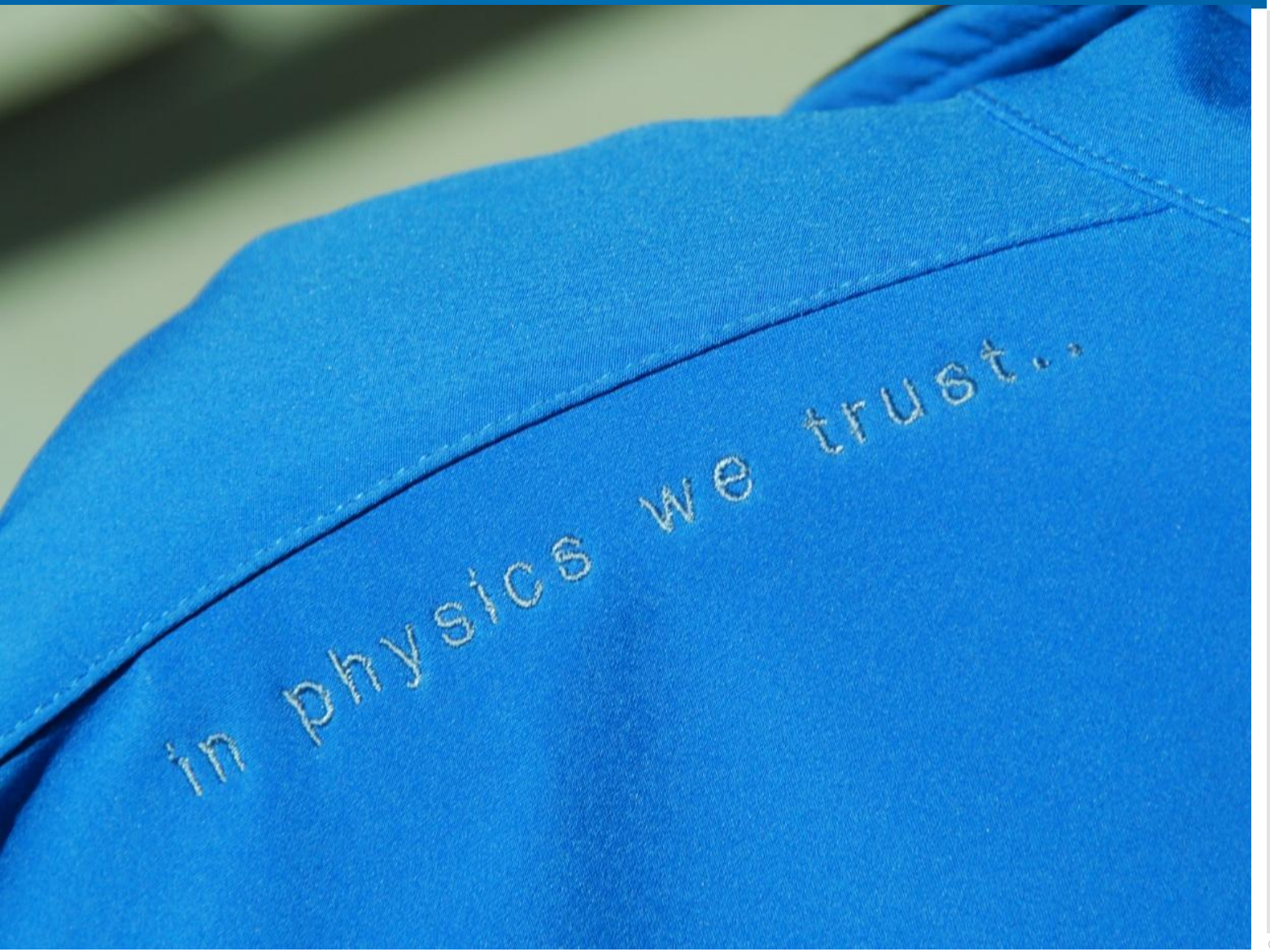
- Durchführung der Intervall-Berechnungen (Messdaten notwendig)
- Übertragung der Vorgehensweise auf 4a Tribocompound-Versuchsstand

- Ergebnisse werden auf der NAFEMS Regionalkonferenz in Bamberg (25. - 27. April 2016) präsentiert.

NAFEMS REGIONAL CONFERENCES 2016

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



© 4a engineering GmbH, all rights reserved