

Messung und Simulation von Verschleiß in einem anwendungsnahen tribologischen Prüfstand

Benjamin Hirschmann, Artur Fertschej, Peter Reithofer (4a engineering GmbH)

1 Einleitung

Materialkombinationen Metall/Kunststoff werden heutzutage bevorzugt für tribologische Systeme eingesetzt, die einen langlebigen, wartungs- und schmierungsfreien Einsatz garantieren sollen, wie z.B. die Paarung Metallspindel/Kunststoffmutter. Spezielle dafür geeignete Kunststoffcompounds wurden an einem anwendungsnahen Tribologieprüfstand charakterisiert. Für die virtuelle Abbildung des Verschleißes wurde eine Simulationsmethodik entwickelt, anhand realer Messungen am Tribometer und dem zuvor genannten Tribologieprüfstand überprüft und verbessert. Ziel ist es, zukünftig dem Anwender durch virtuelle Vorhersage eine raschere und zielgerichtetere Produktentwicklung und Materialauswahl zu ermöglichen.

2 Versuche & Messergebnisse

2.1 Kugel/Scheibe Tribometer

Standard-Prüfgeräte zur Untersuchung tribologischer Eigenschaften sind Tribometer, die von einem einfachen Kontaktmodell wie z.B. Kugel/Scheibe ausgehen (siehe Abb. 1 links). Ein großer Vorteil solcher Tribometer ist der geringe Aufwand bei der Durchführung der Messung. Bei diesen wird ein fest eingespannter kugelförmiger Körper auf eine scheibenförmige drehbar gelagerte Probe mit einer festgelegten Kraft gedrückt. Während des Versuches wird die horizontale Kraft auf der Kugelhalterung aufgezeichnet, aus dem sich der Reibkoeffizient ergibt (siehe Abb. 2 links). Das Verschleißprofil (siehe Abb. 2 Mitte und rechts) wird anschließend mit einem Weißlichtinterferometer gemessen. Diese Art der Messung kann jedoch nur nach Auftragen einer Beschichtung erfolgen, sodass das entstehende Probekörperprofil erst einige Zeit nach Versuchsende bestimmt werden kann. Es ist nicht möglich den Startzustand sowie Zwischenpunkte oder das Profil direkt nach Versuchsende, das in einem viskoelastischen Verformungszustand vorliegen könnte, zu erfassen.

Eine Temperaturmessung ist standardmäßig nicht vorgesehen. Für einen Versuch wurde eine Infrarotmessung durchgeführt. Diese ergab nach der Einlaufphase eine geringe Erwärmung des Probekörpers und eine Temperaturerhöhung im Kontaktbereich um ca. 10°C (Abb. 1 rechts).

Im absolvierten Prüfprogramm wurde der Einfluss der Prüfparameter (Normalkraft auf die Scheibe, Relativgeschwindigkeit und zurückgelegter Weg) untersucht.

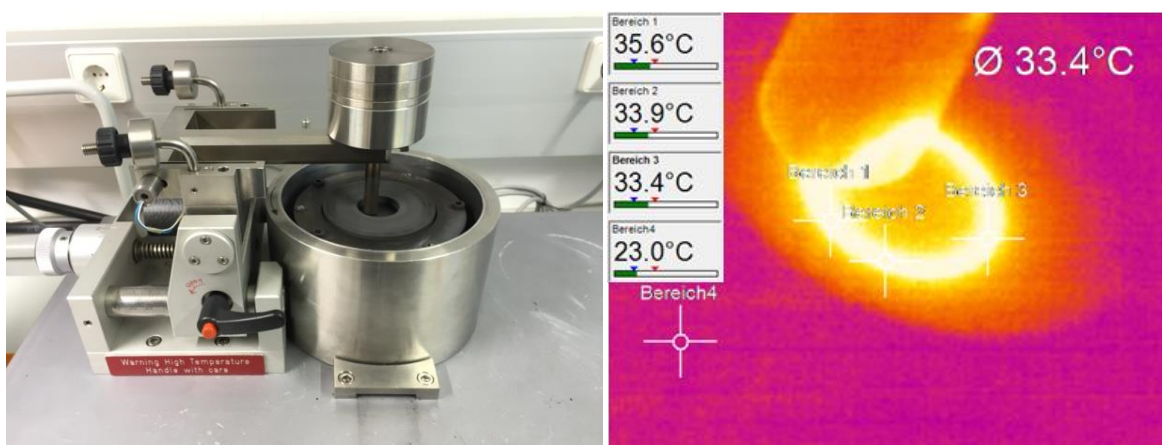


Abb. 1: Kugel-Scheibe Tribometer (links); Temperatur-Messergebnis nach Einlaufphase (rechts)

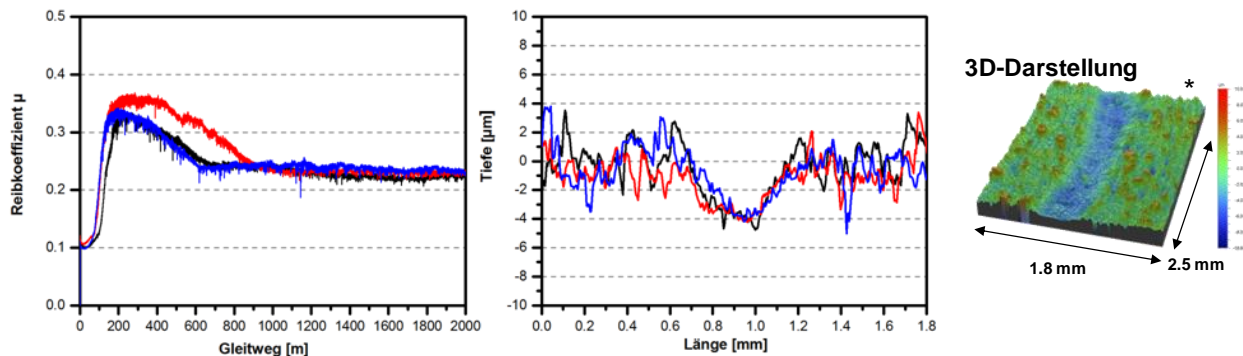


Abb. 2: Messergebnisse von 3 Proben am Kugel-Scheibe-Tribometer (Kraft 10N, Geschwindigkeit 15 cm/s, Gleitweg des untersten Kugelpunktes 2000m, Raumtemperatur), Messschrieb des Reibkoeffizienten (links), Profildaten einer Punktreihe (Mitte), 3D-Profil einer Probe (rechts)

2.2 Anwendungsnaher Tribologieprüfstand

Mit dem Tribologieprüfstand wurden anwendungsnahe Messungen an Mutter-Spindel-Systemen durchgeführt (Abb. 3). Dieser Prüfstand ist besonders geeignet, die realen Verhältnisse zwischen Mutter und Spindel (angepasste Geometrie, reale Lastverteilung und Temperaturentwicklung, diskontinuierliche Versuche etc.) bei variablen Versuchsbedingungen (Belastung, Drehzahl) wieder zu geben. Als Standard-Mutter ist eine Trapezgewindemutter TR12x3 vorgesehen.

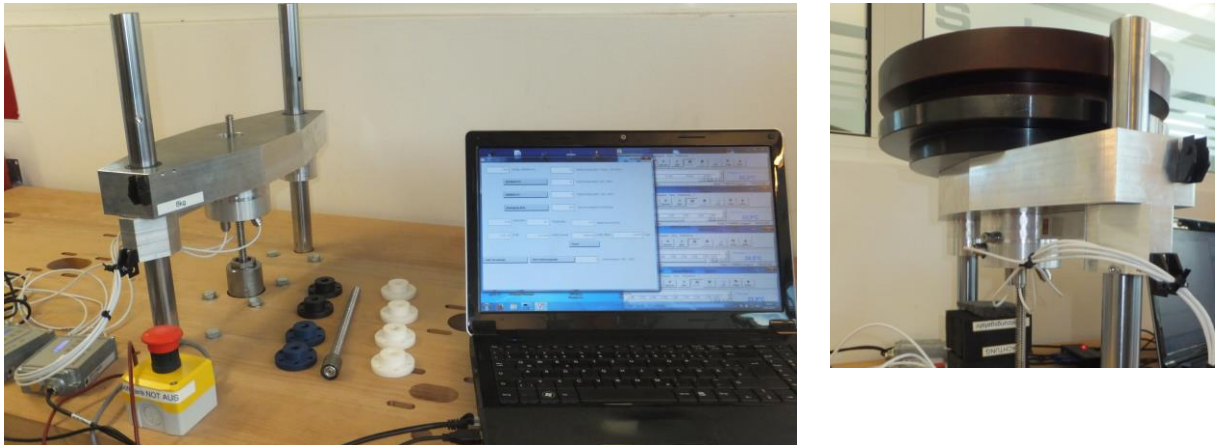


Abb. 3: Anwendungsnaher Tribologieprüfstand im Einsatz (links ohne und rechts mit Zusatzgewicht)

Um die örtliche und zeitliche Temperaturentwicklung von Mutter und Spindel messen zu können, wurden insgesamt 4 Infrarot-Sensoren im Messschlitten eingebaut. Ein IR-Sensor misst die Temperatur der Spindel, die anderen drei IR-Sensoren messen die Temperatur der Mutter in unterschiedlichem Abstand zur Spindel. Aus diesen drei Werten kann der Temperaturverlauf über den gesamten Bereich der Mutter für den Simulationsvergleich abgestimmt werden.

Abb. 4 (links) zeigt einen typischen gemessenen Temperaturverlauf. Die spindelnahe Muttertemperatur erreicht bis zum Ende des Versuchs ca. 65°C, die Muttertemperatur in der Mitte hingegen nur ca. 40°C. Die Spindeltemperatur kann messtechnisch erst ab 50°C gemessen werden und erreicht Temperaturen bis zu 115°C. Abb. 4 (rechts) zeigt vergleichsweise die Temperaturentwicklung, wenn eine Pause von 7.5 Sekunden pro Zyklus (eine Auf- und Abwärtsbewegung am Prüfstand) eingelegt wird. Die maximalen Temperaturen sind deutlich geringer. Abb. 5 zeigt am Tribologieprüfstand ausgewertete Reibkoeffizienten für zwei verschiedene Geschwindigkeiten. Für 100 U/min ergibt sich ein höherer Reibkoeffizient als für 400 U/min, der Grund könnte in der Temperaturentwicklung liegen. Bei 100 U/min ergibt sich eine geringere Spindel- und Muttertemperatur als bei 400 U/min. Möglicherweise bildet sich bei höheren Temperaturen ein Schmierfilm aus, der die Reibung senkt.

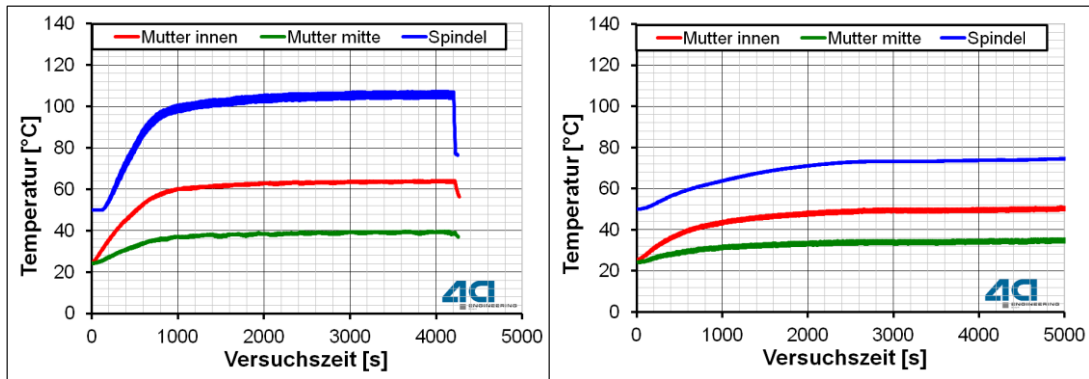


Abb. 4: Temperaturentwicklung der Mutter an 2 Messpunkten sowie mittlere Spindeltemperatur (400 U/min, 25kg); links: ohne Pause im Zyklus, rechts: 7.5 s Pause pro Zyklus

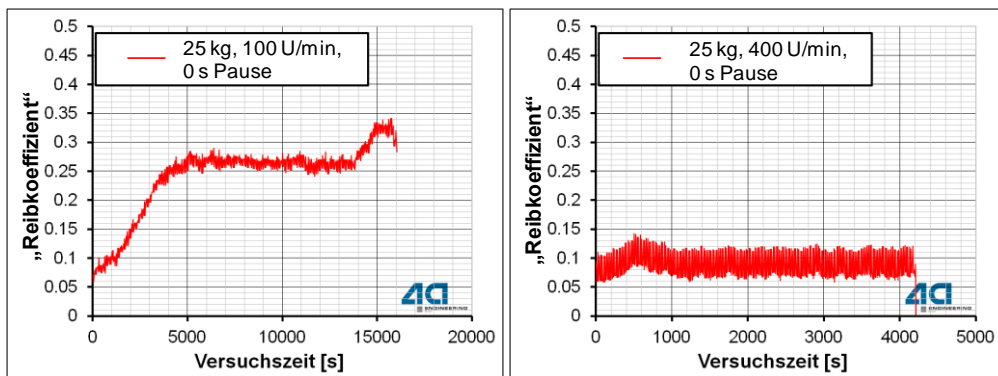


Abb. 5: Ausgewertete Reibkoeffizienten aus dem Versuch am Tribologieprüfstand

3 Simulation

Zur Vorhersage des Verschleißes von Metallspindel/Kunststoffmutter Paarungen wurde eine Simulationsmethodik erarbeitet und validiert. Die virtuelle Abbildung von tribologischen Vorgängen ist äußerst komplex. Es gibt viele gleichzeitig wirkende Mechanismen, die sich auch gegenseitig beeinflussen können, und von einer Vielzahl an Parametern abhängen.. Das Ergebnis einer simulativen Abbildung des Verschleißes ist zwangsläufig in seiner Aussagekraft begrenzt. Je nach dem in der Anwendung auftretenden tribologischen Belastungsfall ist es vorteilhaft oder notwendig, Ansätze unterschiedlicher Komplexität einzusetzen, um sinnvolle Abschätzungen treffen zu können. Die Verschleißmodellierung ist somit sehr aufwändig und keineswegs mit standardmäßig verfügbaren Simulationswerkzeugen umsetzbar. Zur Methodenentwicklung wurden drei verschiedene Modelle verwendet (Abb. 6):

einfach: Simple-Mind Modell zum Austesten auf prinzipielle Funktionalität

komplex: typisch verwendetes Kugel/Scheibe-Tribometer

realitätsnah sehr komplex: Tribologieprüfstand

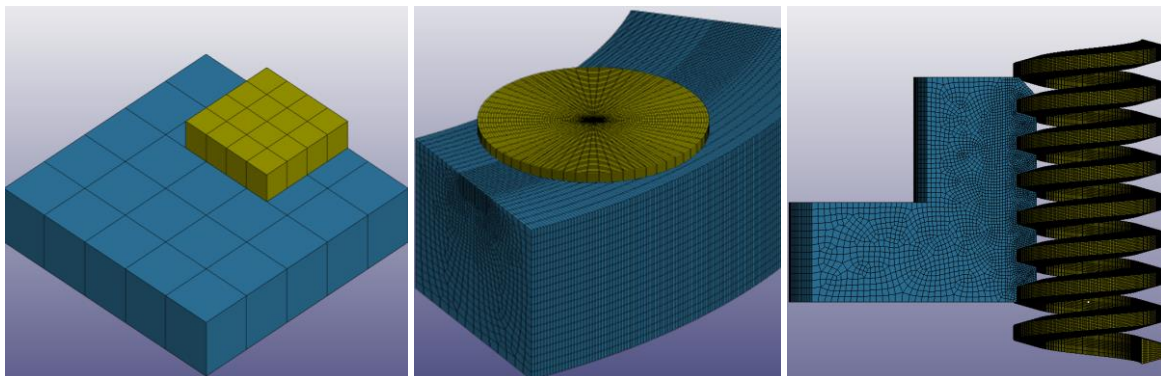


Abb. 6: Simple-Mind Modell (links), Kugel/Scheibe Modell (Mitte) und Tribologieprüfstand (rechts)

Die Idealisierung im Kontaktbereich bzw. Verschleißzone wurde wie aus den Abbildungen hervorgeht sehr fein gewählt (Elementkantenlänge 25µm bzw. 100µm). Dies stellt einen Kompromiss zwischen möglichst genauer Abbildung und Rechenzeit dar.

3.1 Simple-Mind Modell

Aufgrund der einfachen Geometrie und geringen Elementanzahl können mit einem solchen Modell sehr rasch verschiedene Methoden oder Materialmodelle auf ihre prinzipielle Funktion für die Problemstellung untersucht werden.

In einer Literaturrecherche wurden verschiedene Verschleißansätze gesichtet und bewertet. Im ersten Schritt wurde das Archard's Verschleißgesetz (Formel 1) verwendet. Es stellt das Verschleißvolumen V_w (m³) als Funktion der wirkenden Normalkraft F_N (N), des Gleitweges d (m), der Härte des Materials H (Pa) (in der Literatur meist die Brinell Härte) und des dimensionslosen Verschleißkoeffizienten K (-) dar, wobei im Verschleißkoeffizienten die restlichen Einflüsse des Verschleißprozesses zusammengefasst werden. Gängige Praxis zur Ermittlung des Verschleißkoeffizienten ist das Nachschlagen in Tabellen/Diagrammen (so genannte Verschleißkarten (engl. wear maps) nach Lim/Ashby oder Podra) aufgrund der Abschätzung des vorherrschenden Belastungsfalles (Einfluss: Druck, Geschwindigkeit, Temperatur, Schmierung, etc).

$$V_w = K * \frac{F_N * d}{H} \quad (1)$$

Berechnungen mit LS-Dyna unter Zuhilfenahme der Kontaktformulierung *CONTACT_ADD_WEAR und einer abgewandelten Form von Archard's Verschleißgesetz (direkt oder mittels USERSUBROUTINE) zeigten sich als eine erste einfache Möglichkeit, Verschleiß zu prognostizieren bzw. die Gültigkeit und die Problemstellungen des hier verwendeten Ansatzes zu untersuchen. Archard's Verschleißgesetz wird für die Verwendung in der FEM auf die lokale Verschleißtiefenrate \dot{w} (m/s) umgeformt (Formel 2), wobei p (Pa) der Kontaktflächendruck am Knoten und \dot{d} (m/s²) die relative Gleitgeschwindigkeit der berührenden Flächen zueinander ist. Die Verschleißtiefe w wird als History-Variable des Knotens gespeichert und in jedem Rechenschritt aktualisiert.

$$\dot{w} = \frac{K}{H} * p * \dot{d} \quad (2)$$

Zum Zeitpunkt der Arbeit war diese Funktion nur in der LS-DYNA Development Edition 8.1 in Kombination mit LS-PrePost 4.3beta verfügbar und ist mittlerweile im letzten Release enthalten. Als Ergebnis erhält man eine örtliche Verschleißintensität als Ausgabewert, die jedoch somit keinen Einfluss auf die weitere Berechnung hat. Für die Anpassung der Geometrie aufgrund des auftretenden Verschleißes wurde daher unterschiedliche Ansätze (LS-PrePost, Skripte oder USERSUBROUTINEN) untersucht und verglichen (Kopplung zwischen Verschleiß und Geometrie, vgl. Abb. 8 Mitte).

Im ersten Schritt wurde ein rein elastisches Materialmodell in Kombination mit dem Verschleißmodell nach Archard gewählt. Als Materialparameter werden der Elastizitätsmodul, die Querkontraktion, der Reibkoeffizient und der Verschleißkoeffizient aus dem Gesetz nach Archard benötigt. Der Verschleißkoeffizient kann entweder der Literatur entnommen oder mit tribologischen Versuchen (z.B. Kugel/Scheibe Tribometer) bestimmt werden.

3.2 Kugel/Scheibe Tribometer

Um die Verschleißtiefenprognose der entwickelten Methodik zu überprüfen und zu validieren, wurden im 2. Schritt die Ergebnisse der Kugel/Scheibe-Tribometer-Messungen herangezogen.

Diese Verschleißversuche benötigen eine hohe Belastungszeit, um messbare reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, daher kann die Simulation des Versuches nicht direkt erfolgen. Abb. 7 zeigt die entwickelte und verwendete Berechnungsroutine, um die Geometrie aufgrund der berechneten Verschleißtiefe schrittweise zu aktualisieren. Die Routine kann prinzipiell in beliebige Zeitschritte unterteilt werden, wobei nach jedem Zeitschritt das Ergebnis mit einem dem Zeitschritt entsprechenden Skalierungsfaktor auf Basis eines Verschleißgesetzes beaufschlagt wird.

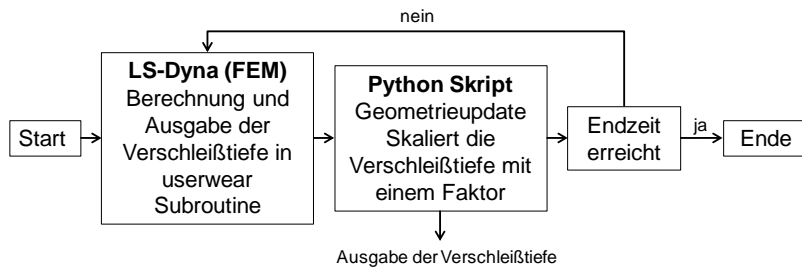


Abb. 7: Berechnungsroutine zur Ermittlung des Verschleißes

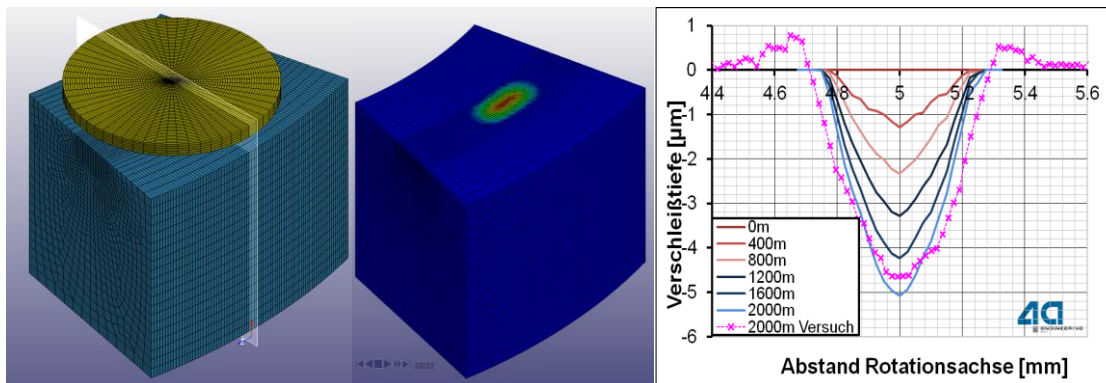


Abb. 8: Kugel/Scheibe Modell (links); Simulationsergebnis der Verschleißtiefe nach 1. Rechenschritt (Mitte); Vergleich Simulation (mit Zwischenergebnissen) mit Experiment nach 2000m (rechts)

In Abb. 8 Mitte ist das Verschleißergebnis des 1. Rechenschrittes dargestellt. Bei 5-fachem Durchlaufen der Schleife (Abb. 7) mit einem konstanten Verschleißkoeffizienten ergibt sich ein schmaleres Verschleißprofil im Vergleich zur gemittelten Versuchsprofilkurve (Abb. 8 rechts). Die Berücksichtigung der Plastizität und der viskosen Eigenschaften, an deren Implementierung gearbeitet wird, sollte ein breiteres Profil und somit ein bessere Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation ergeben.

3.3 Tribologieprüfstand

Als anwendungsnahen Fall wurde die Simulationsmethodik am Tribologieprüfstand validiert. Um die Rechenzeiten in einem sinnvollen Bereich zu halten, wurde ein Sechzehntel-Modell des Mutter-Spindel Tribometers erstellt (Abb. 9). Die Berechnungsmethode wird analog zum Kugel/Scheibe-Tribometer angewandt. Ein Rechenschritt bedeutet somit eine Drehung um einen bestimmten Winkel. Dieser wird dann wie zuvor auf eine Anzahl an Umdrehungen hochskaliert.

Aufgrund der Geometriediskretisierung können lokale Unstetigkeiten an der Oberfläche auftreten, welche diskontinuierliche Kontaktkraftverläufe und Verschleißtiefen bewirken. Durch die langen Belastungszeiten im realen Versuch muss das Ergebnis des einzelnen Simulationszyklus' bei Einhaltung von realisierbaren Rechenzeiten für tausende reale Belastungszyklen skaliert werden. Dies führt zu unrealistischen stark diskontinuierlichen Oberflächenverläufen und in weiterer Folge zu unphysikalischen Folgeergebnissen, die meistens zum Abbruch der Routine führen. Es wurde daher eine Methode zur Glättung der Ergebnisse eingeführt, die zu einer stetigeren Verteilung des Verschleißes auf die Knoten im Belastungsbereich führt. In LS-Prepost 4.3 beta ist ebenfalls eine Glättungsmethodik implementiert, die die Verschleißergebnisse auf die nächsten Knoten glättet. Diese funktionierte allerdings nur für einfache Kontaktflächen, wie z.B. beim Kugel/Scheibe Modell, beim Mutter/Spindel Modell ergaben sich falsche Verschleißergebnisse bei Übergängen zu benachbarten Flächen. Daher konnte die implementierte Glättungsmethode nicht verwendet werden.

Mithilfe der entwickelten Methode gelingt ein erster Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit, an einer Optimierung der Rechenzeitschrittweite wird derzeit noch gearbeitet. Abb. 10 zeigt erste Ergebnisse der Verschleißsimulation und den Einfluss der Rechenzeitschrittweite (10 bzw. 40 Iterationen) auf das Ergebnis. Für 40 Iterationen und einem Versuchsweg von 25 km liegt das Simulationsergebnis schon nahe an der Streubreite der Versuchsergebnisse.

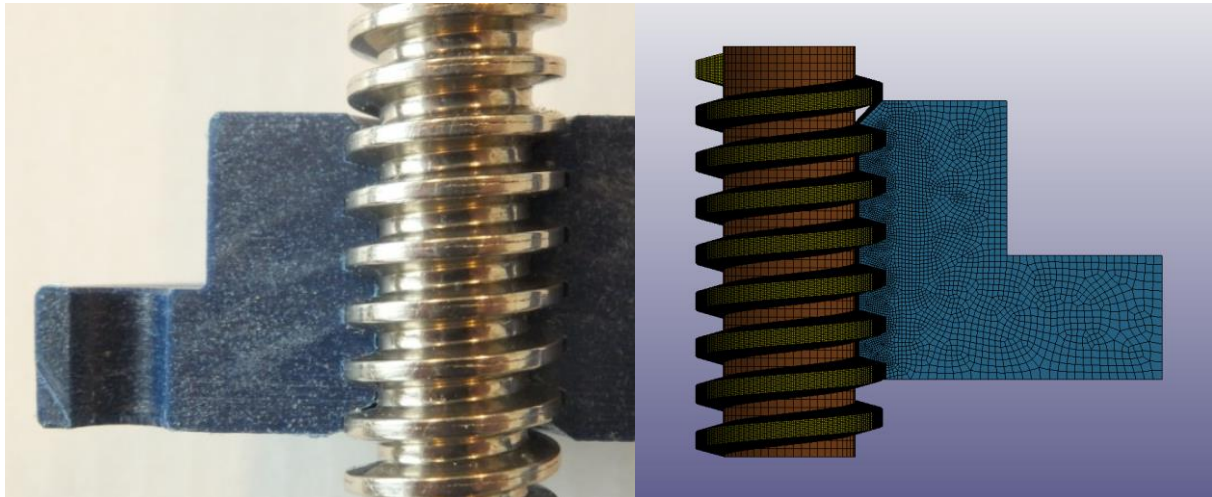


Abb. 9: Querschnitt einer Mutterprobe mit Trapezspindel (links), Sechzehntel-Modell des Tribologieprüfstands (rechts)

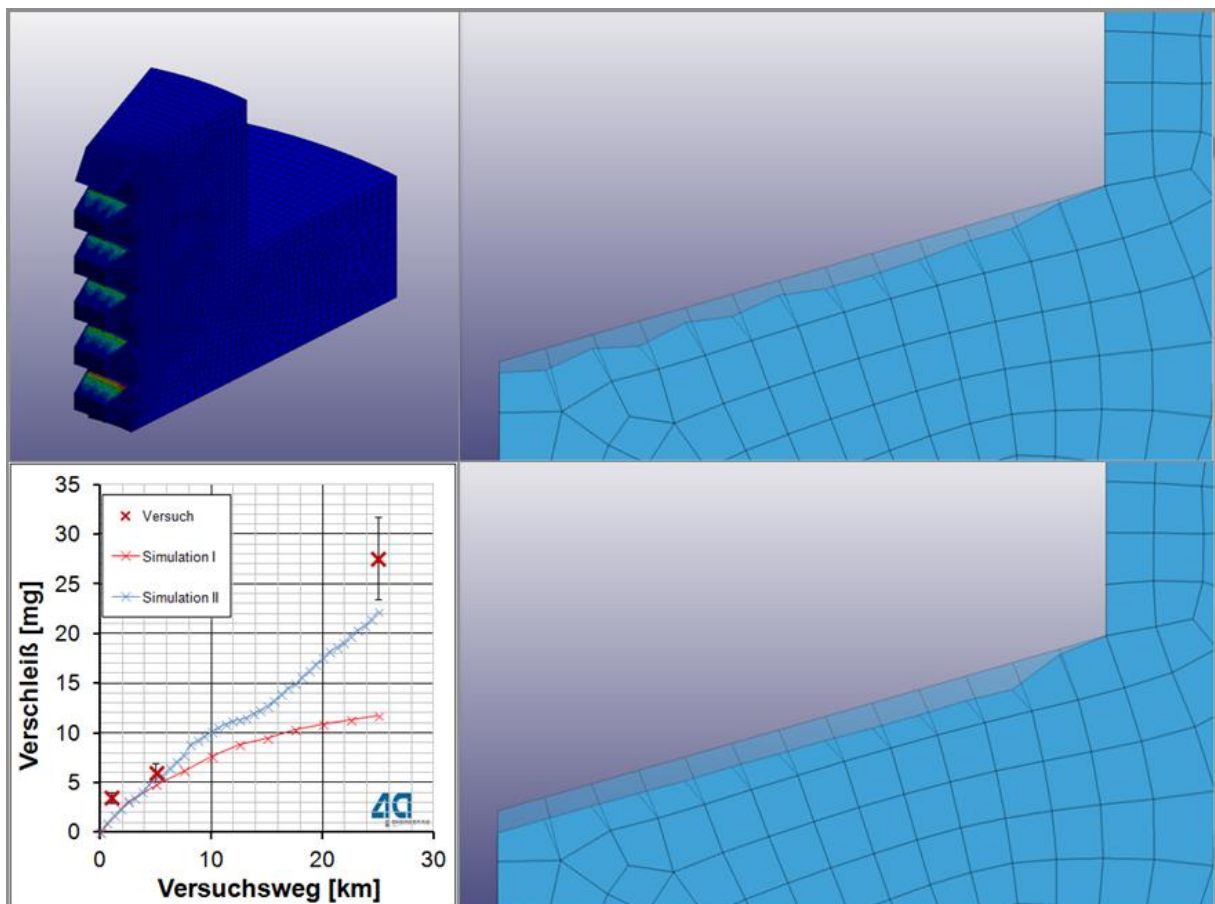


Abb. 10: Verschleißsimulationsergebnis der Ausgangsgeometrie (links oben), Profilprognose eines Gewindeteilstücks für 25 km bei 10 Iterationen im Vergleich zur Ausgangsgeometrie aus Simulation I (rechts oben), Verschleiß über den Versuchsweg in Abhängigkeit der Rechenzeitschrittweite (links unten) und Profilprognose eines Gewindeteilstücks für 25 km bei 40 Iterationen im Vergleich zur Ausgangsgeometrie aus Simulation II (rechts unten)

4 Zusammenfassung & Ausblick

Mit dem Tribologieprüfstand können Mutter/Spindel-Kombinationen anwendungsnah geprüft werden. Der Vorteil solcher Messungen gegenüber Standard-Tribometern liegt in den realitätsnahen Geometrien und Versuchsbedingungen. Erste Berechnungsergebnisse von verschiedenen tribologischen Versuchen zeigen, dass mit der entwickelten Simulationsmethodik der Verschleiß und die dadurch

resultierende Geometrieabnahme bereits gut berechnet werden können. Diese Arbeit liefert eine Unterstützung zur Verständnisgenerierung der auftretenden Probleme und ermöglicht somit eine deutliche Aufwandsreduktion in der Entwicklungsphase. Als Ausblick für die Simulation können einerseits die weitere Untersuchung der Rechenzeitschrittweite und deren Einfluss auf das Simulationsergebnis, die Verbesserung der Glättungsfunktionen, ein Remeshing nach teilweisem Abtrag der Oberflächenelemente und andererseits die Verwendung komplexerer Material- (Plastizität, Temperatur-, Zeitabhängigkeit) und Verschleißmodelle genannt werden. Bei den Verschleißmodellen wäre die Untersuchung der Abhängigkeit des Verschleißes vom herrschenden Druck, der Belastungsgeschwindigkeit, der Kontakttemperatur, der bisherigen Verschleißtiefe (aufgrund von Partikelablagerungen/Umformungen von bereits gelösten Partikeln oder unterschiedlicher Randschichtaufbauten, der Dauer der Belastungszeit, Schmierfilmbildung) interessant. Die Entwicklung auf Kunststoffe abgestimmter Labortests kann ebenfalls auf Basis dieser Arbeiten erfolgen. Dies würde vor allem zu einer besseren zeitlichen Abbildung des Verschleißfortschrittes und der Ausfallszeit führen.

5 Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurde von der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AiF) im Rahmen von ERA SME gefördert. Unser Dank gebührt ebenso den im Projekt „Tribocompound“ beteiligten Partnern:

- Montanuniversität Leoben (www.ausseninstitut-leoben.at)
- APC Advanced Polymer Compounds (www.a-p-c.at)
- Faigle Kunststoffe GmbH (www.faigle.com)
- Lubas Spezialplastik (www.lubasplastics.at)
- Philipp Lahres GmbH & Co. KG (www.philipp-lahres.de)

6 4a engineering GmbH

Die 4a engineering GmbH ist ein universitätsnahes Forschungs- und Entwicklungsunternehmen. Die Kernkompetenz von 4a liegt in der Entwicklung von Kunststoffprodukten und -prozessen. Neben der Werkstoffkompetenz liegt ein weiterer Schwerpunkt in der Entwicklung von Simulationsmethoden zur verbesserten Abbildung werkstoff- und verarbeitungsbedingter Eigenschaften und darauf basierende wissenschaftliche, verständnisorientierte Lösungsfindung.

Kontaktdaten:

4a engineering GmbH
Industriepark 1
8772 Traboch
Österreich
+43 (0) 3842 80106 619
fertschej@4a.co.at

Anwendungsnaher tribologischer Prüfstand und Simulation von Verschleiß

B. Hirschmann, A. Fertschej, P. Reithofer, (4a engineering GmbH)



**14. Deutsche LS-DYNA Konferenz
10. – 12. Oktober 2016, Bamberg, Deutschland**

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

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

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

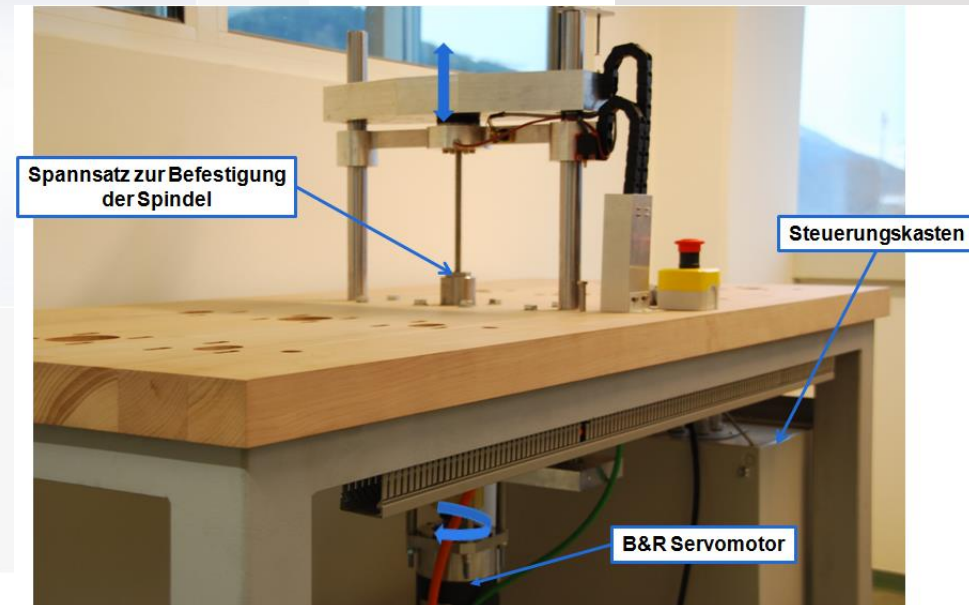
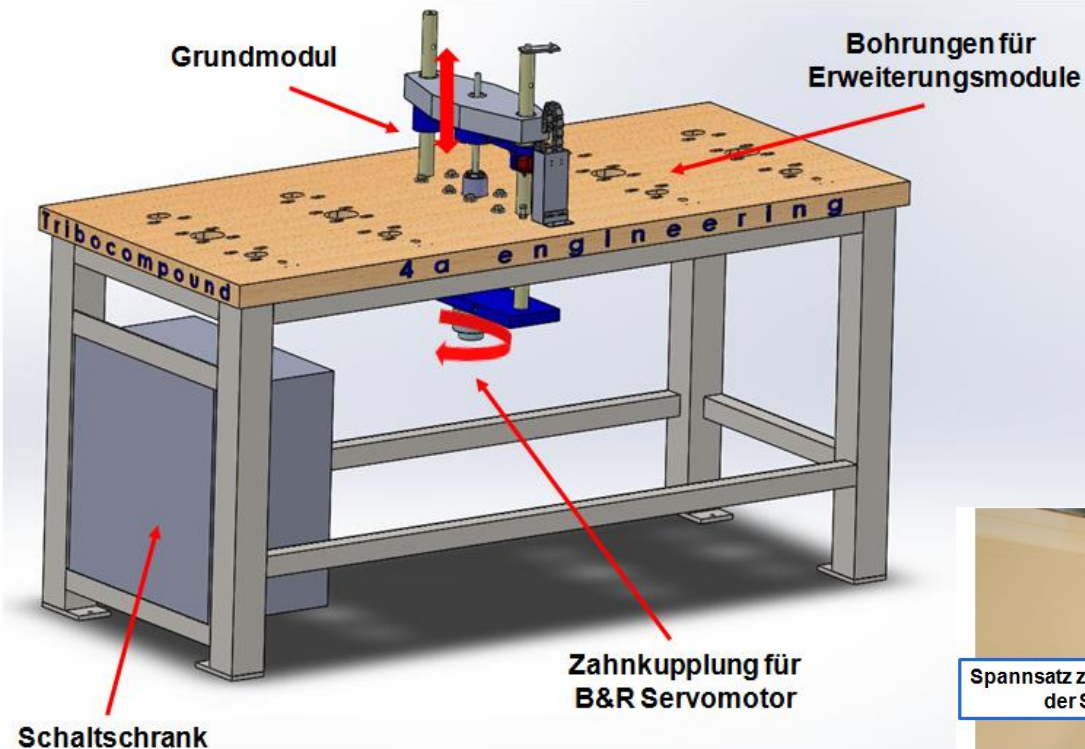
- **EraSME Projekt: „Tribocompound“**
„Innovative Werkstofflösungen für Antriebskomponenten basierend auf neuen Polymercompounds“
- Konzeptionierung, Auslegung, Konstruktion und Umsetzung eines **anwendungsnahen**, prototypischen **Tribologieprüfstands** und Entwicklung erforderlicher Antriebs-, Steuer-, 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

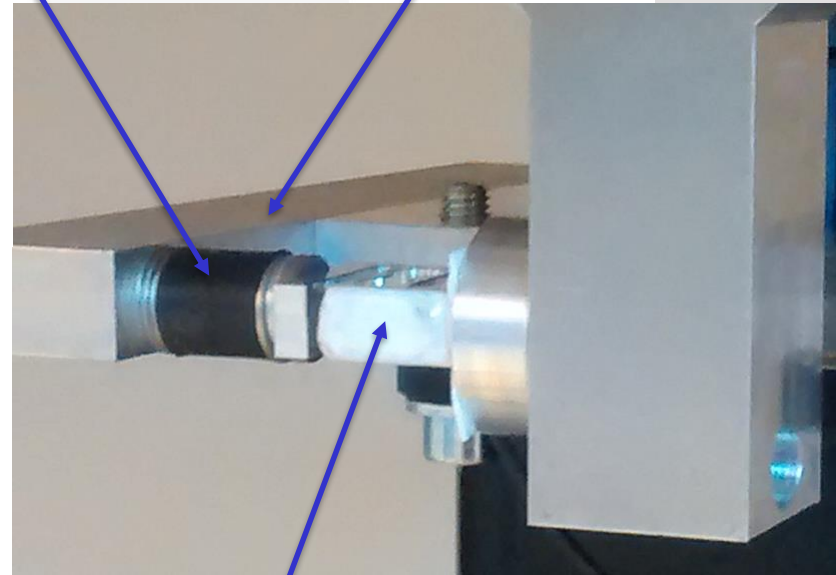
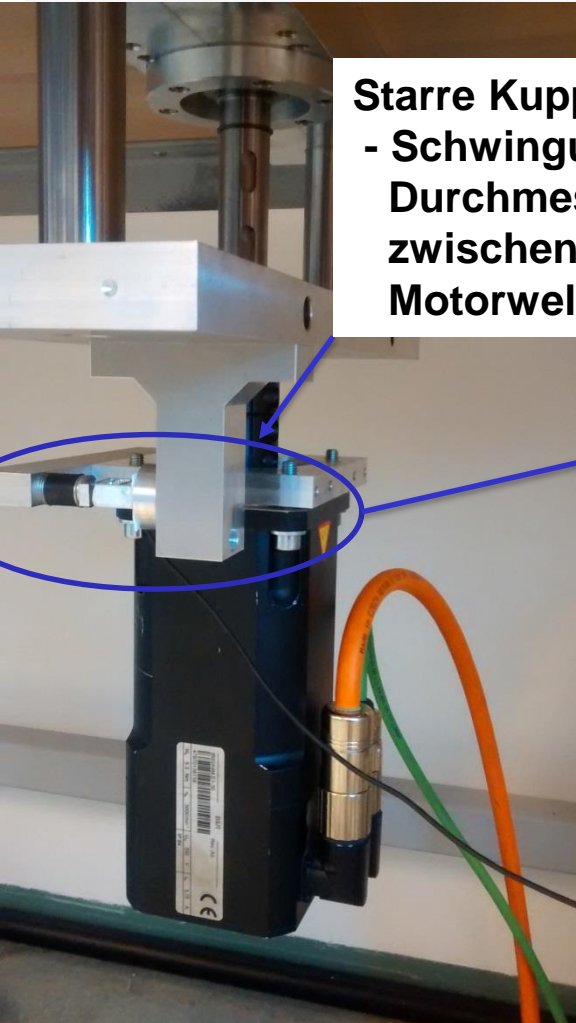
- um unerwünschte Schwingungen zu dämpfen

Hebelarm

10cm (Welle – Kraftmessdose)

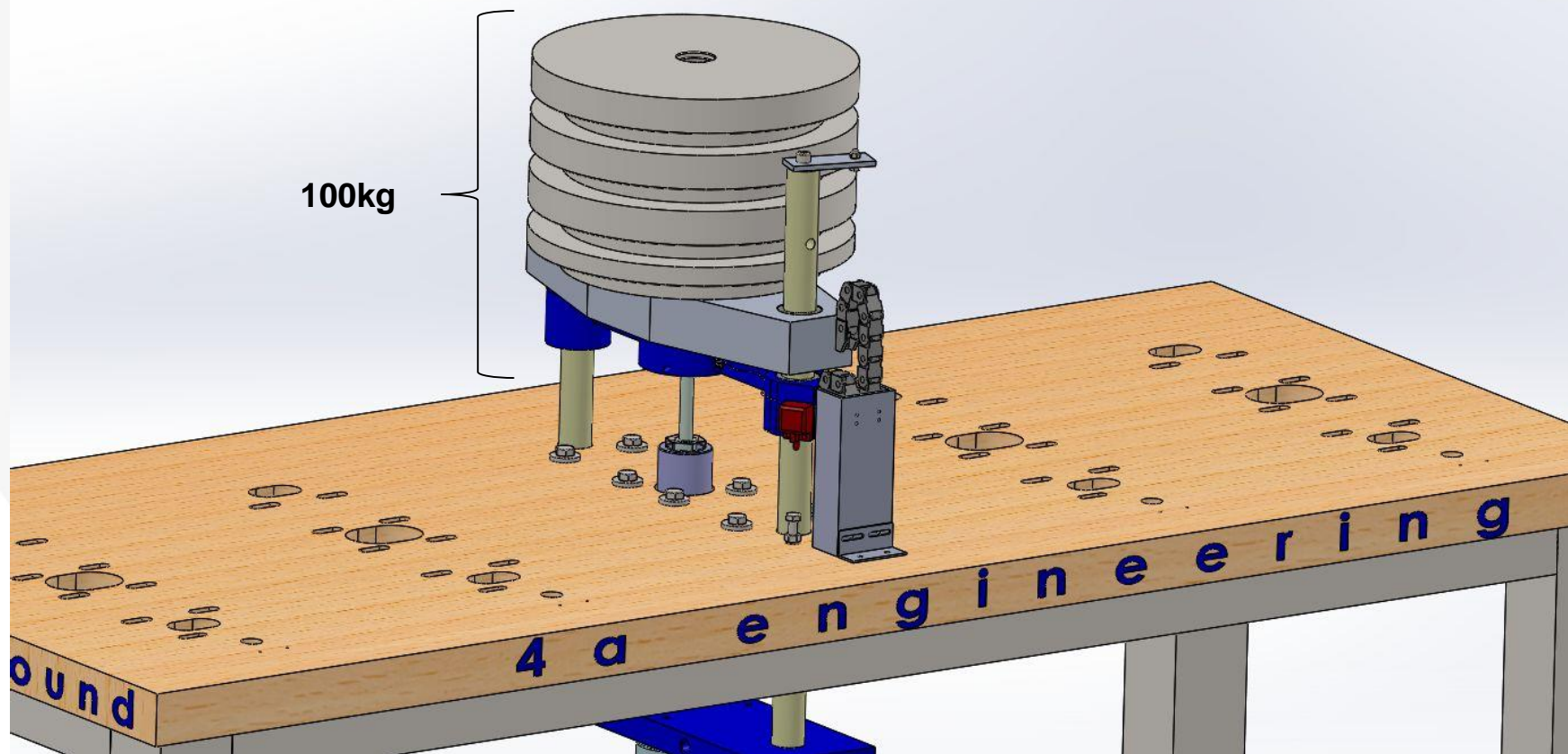
Starre Kupplung

- Schwingungen durch Durchmesser­differenz zwischen Welle und Motorwelle



Zug/Druck-Kraftmessdose

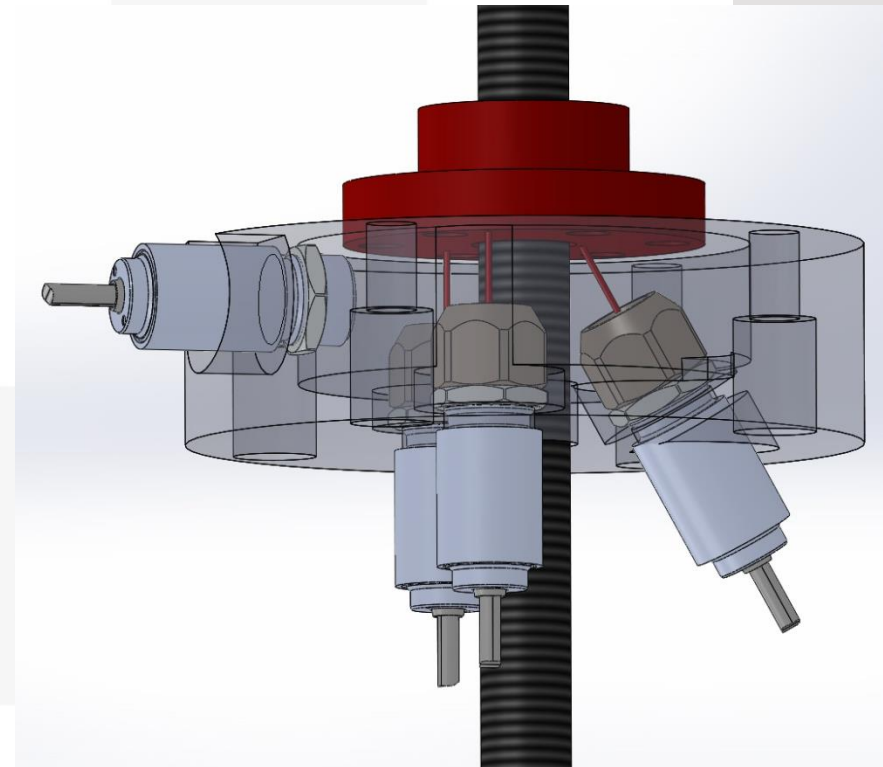
- Maximalbelastung TR12x3 Mutter



4a Tribocompound – Prüfstand

Temperaturmessung

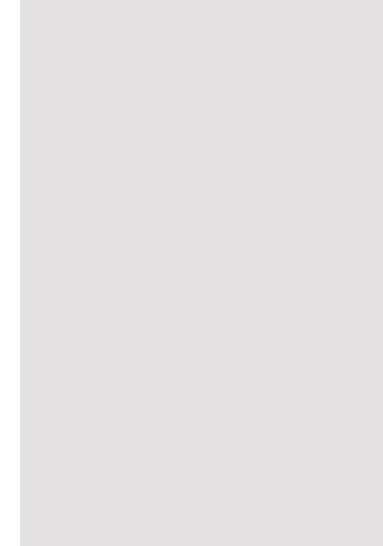
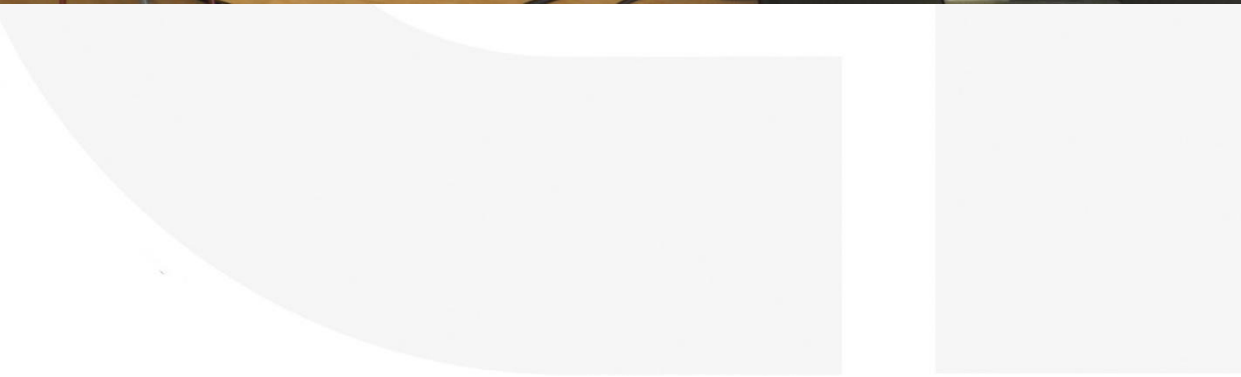
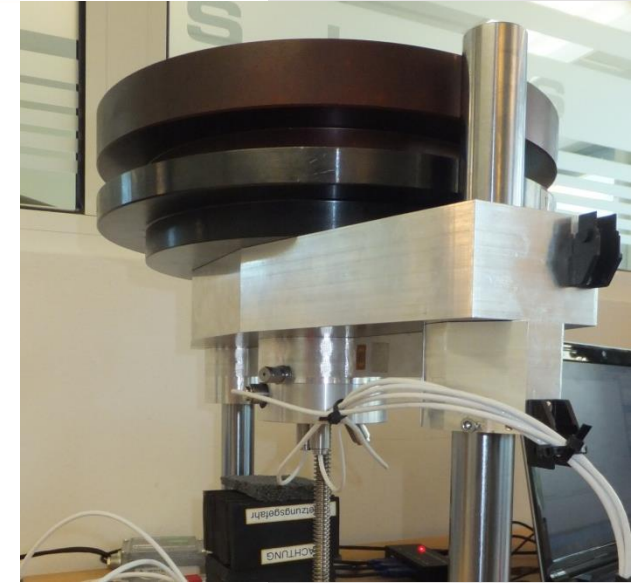
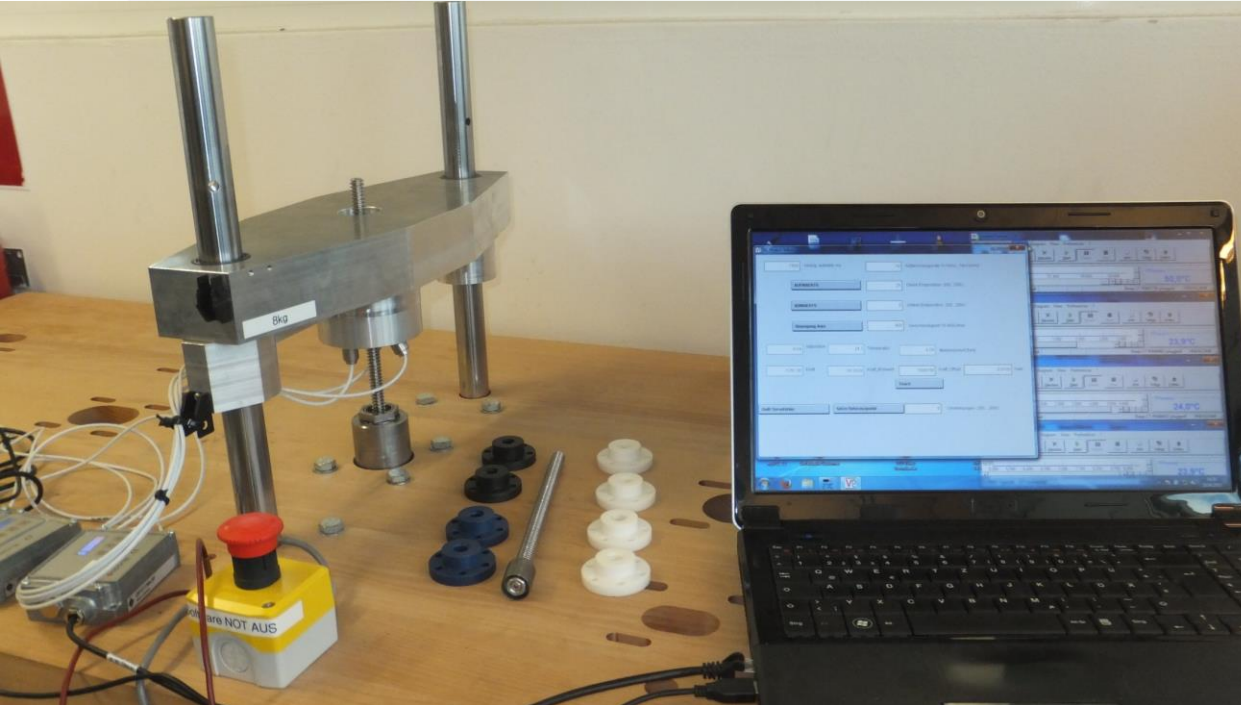
- Insgesamt 4 IR-Sensoren, um den zeitlichen Verlauf der Temperatur von Mutter und Spindel messen zu können.
- 1 IR-Sensor misst die Temperatur der Spindel (allerdings erst ab 50°C möglich)
- 3 IR-Sensoren messen die Temperatur der Mutter in unterschiedlichem Abstand zur Spindel; damit kann die örtliche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



© 4a Engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

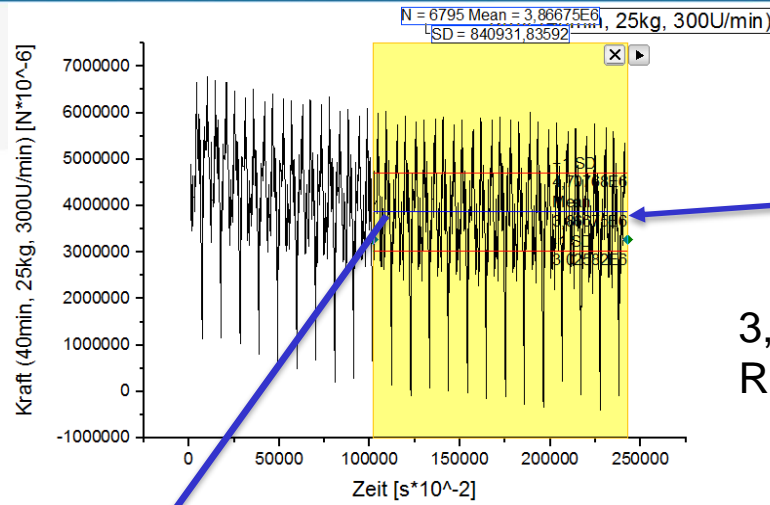
Aktueller Stand



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Tribocompound – Prüfstand

Auswertung



Mittelwert

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

Reibzahl:

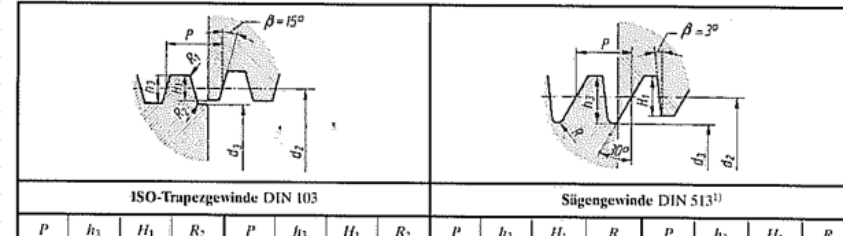
Mittelwert der gemessenen Kraft:	F_mess	3 866 700	10^{-6} N
Standardabweichung:	stabw_F_mess	102 869	10^{-6} N
Axialkraft	F_A	250	N
Länge des Hebelarms:	l_hebel	100	mm
Flankenwinkel im Achsschnitt:	beta	0,26179939 rad	15°
Steigung des Gewindes:	P_h	3	mm
Nenn Durchmesser Spindel:	d_sp	12	mm
Reibwert im 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	14,94111113 °
Reibwinkel des Gewindes:	roh_G	0,046290352	
Reibzahl der Mutter:	μ	0,045	
Pressung der Flanken des Gewindes:	p	1,12	N/mm²

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



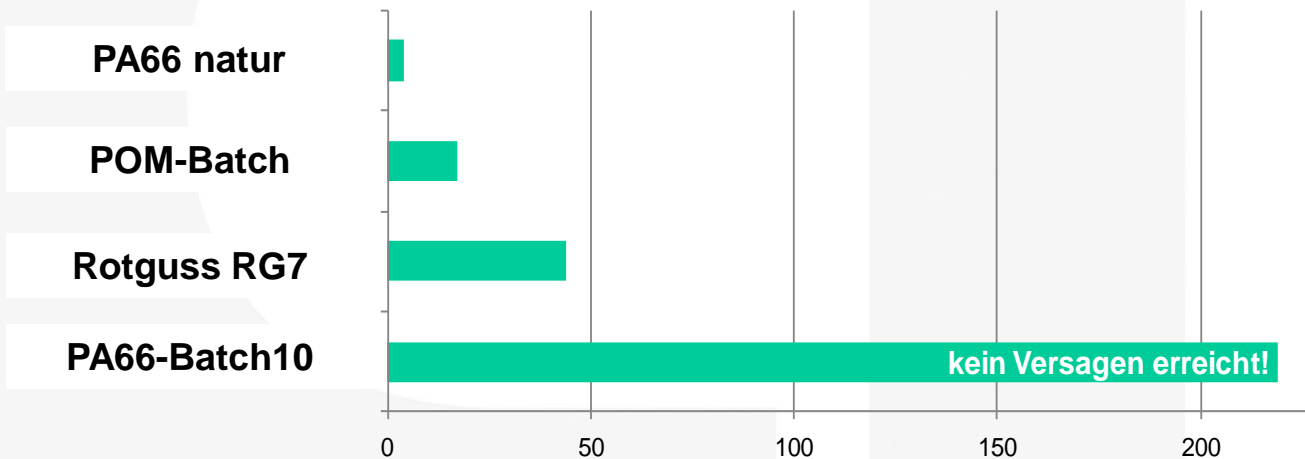
rights reserved

- 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!

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

Ausfallszeiten [min]



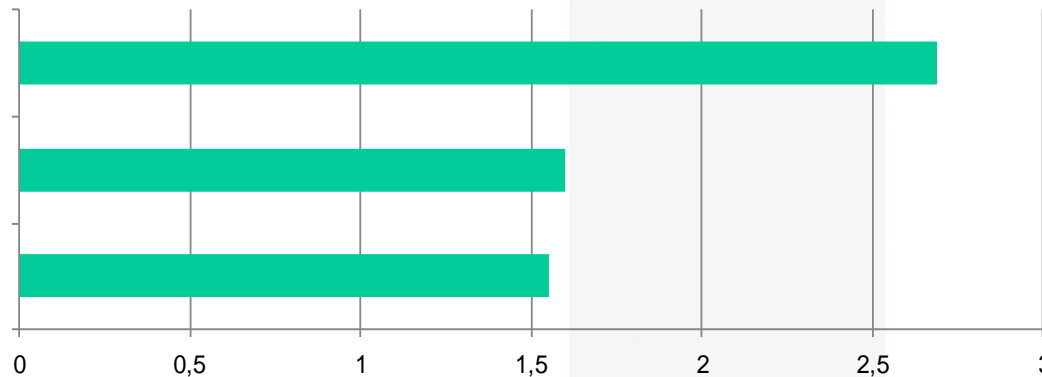
- Beim PA66-Batch10 bildete sich auf der Spindel eine schwarze Schicht.



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

Verschleiß [mg]

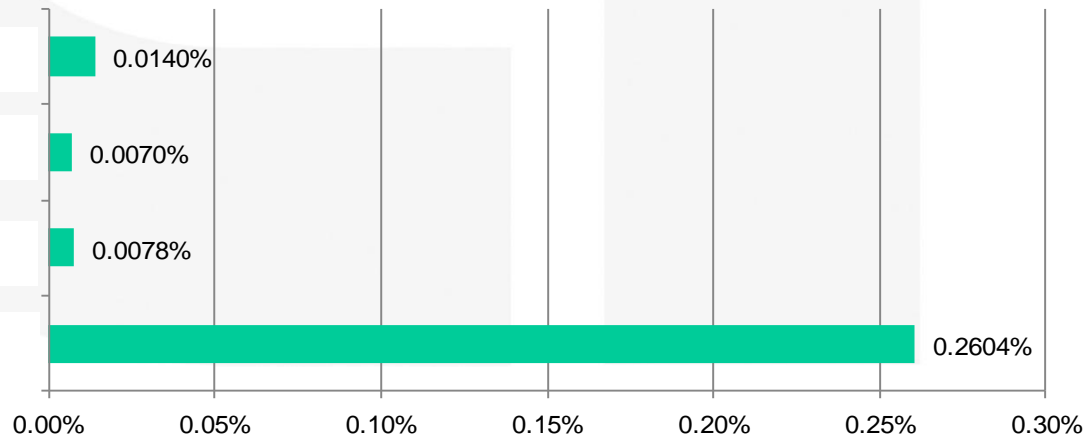
PA66 natur
POM-Batch
PA66-Batch10



vgl: Rotguss: 406 mg

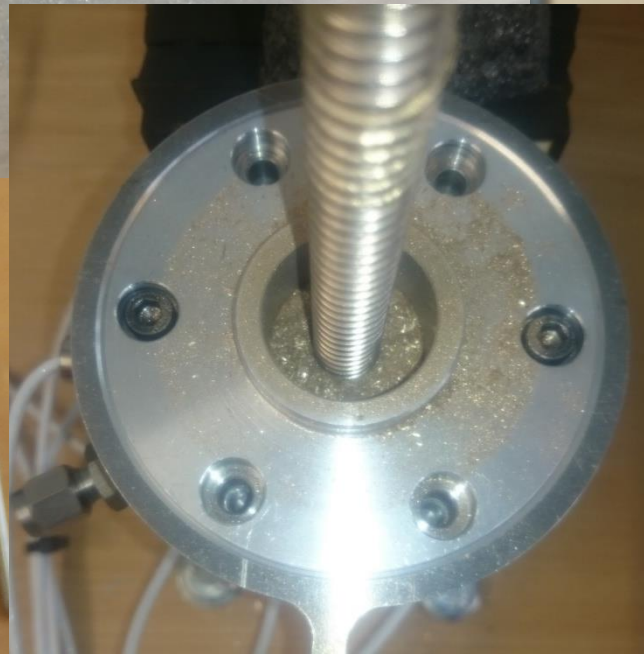
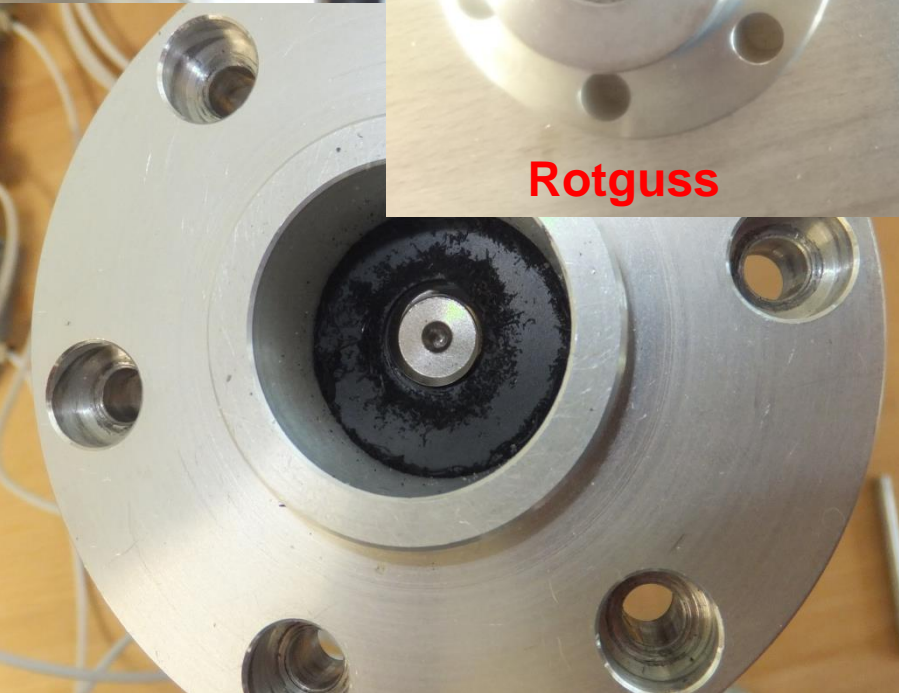
Verschleiß [%]

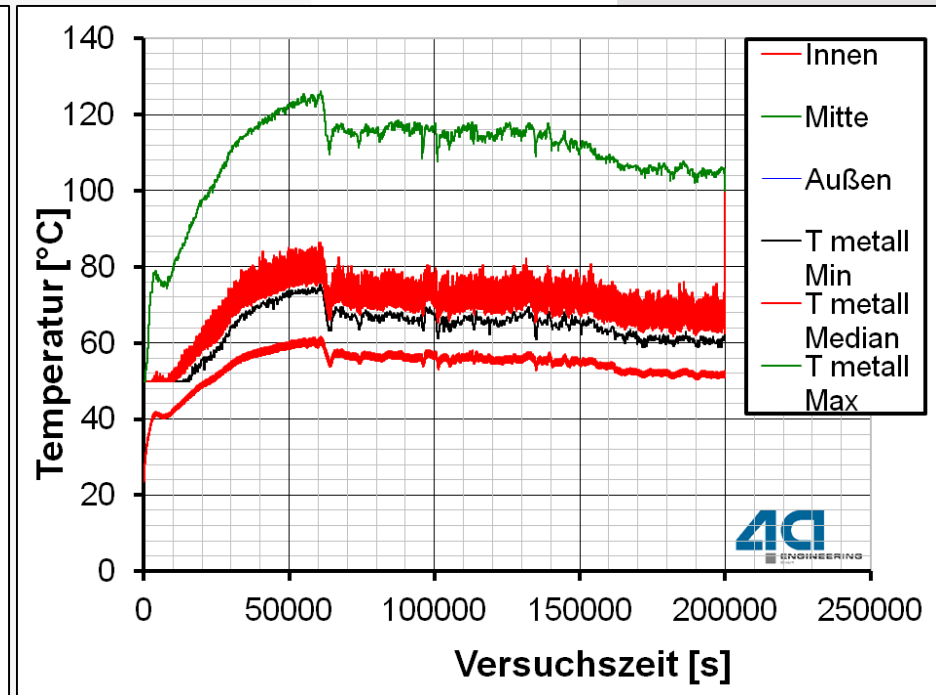
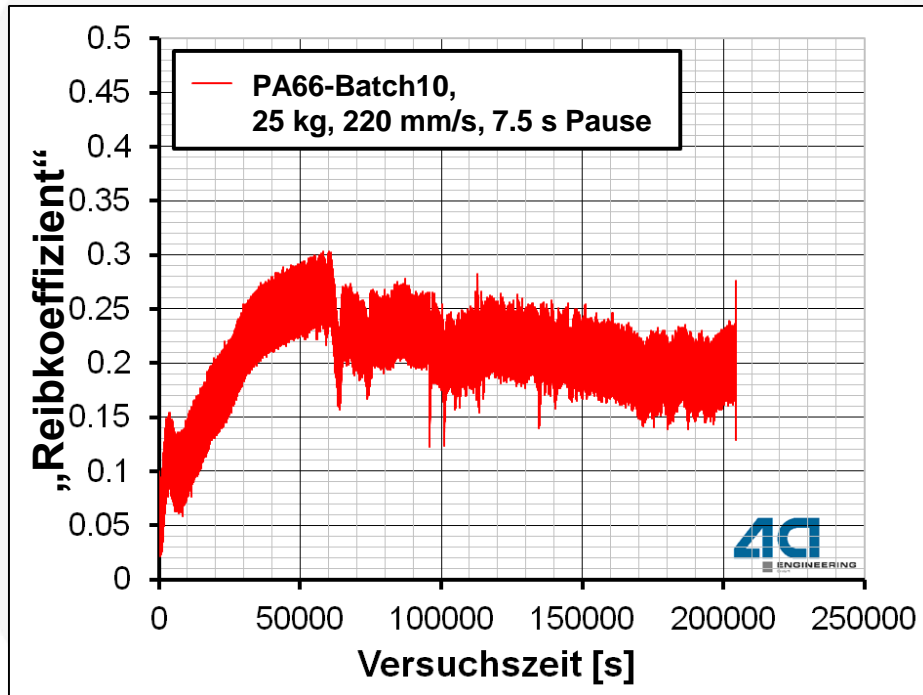
PA66 natur
POM-Batch
PA66-Batch10
Rotguss RG7



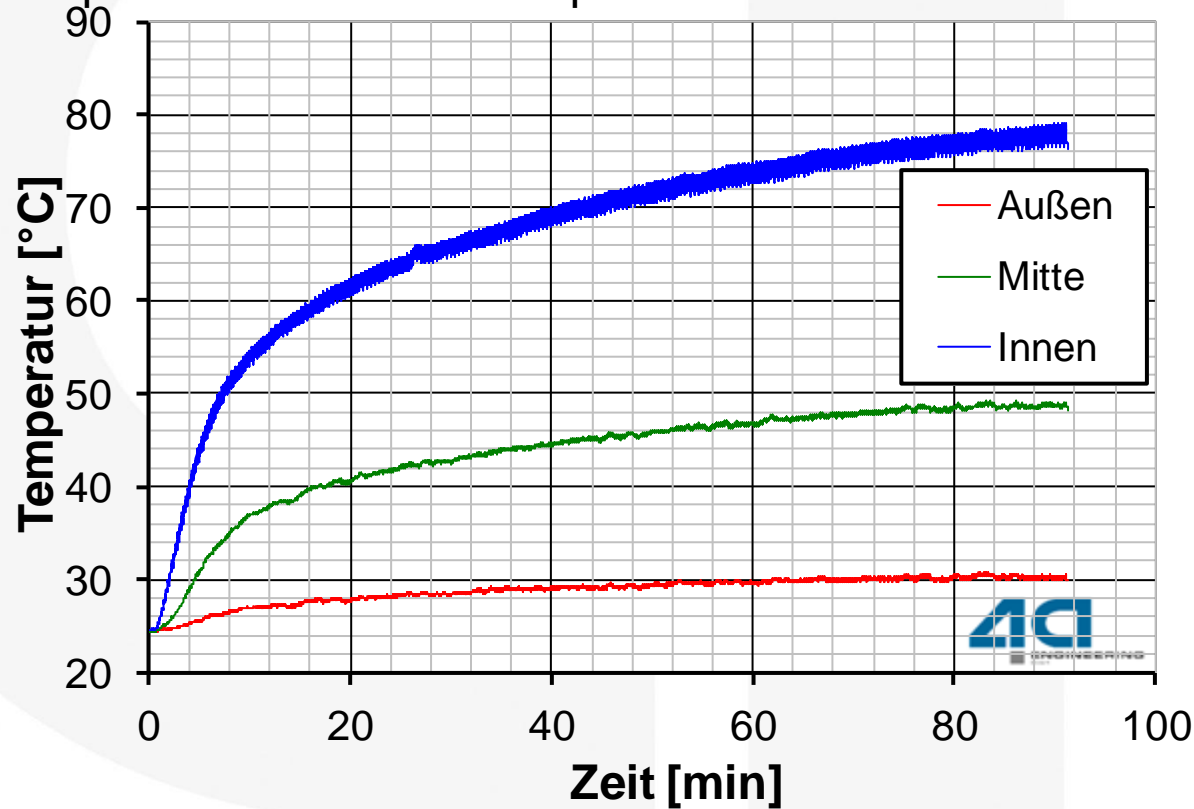
Ergebnisse

Verschleiß der geprüften Muttern





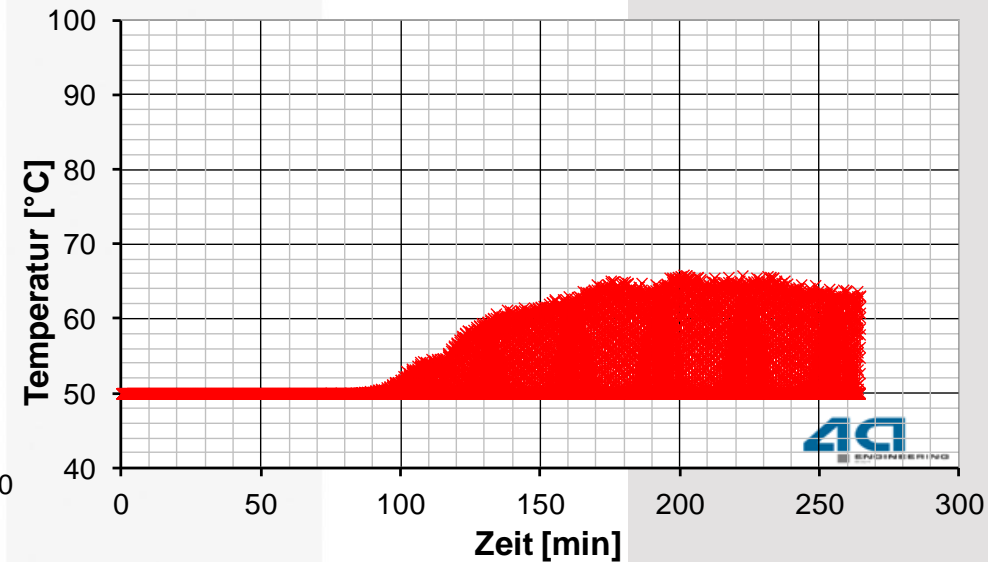
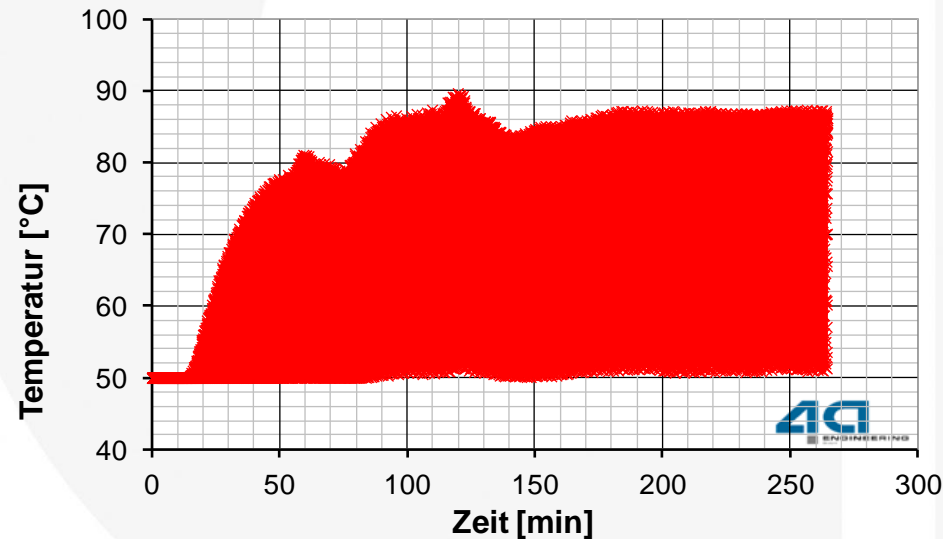
- Beispiel: POM-Batch mit 25 kg Belastung, 450 U/min, keine Pause
- vgl: Temperaturmaximum der Spindel: 123.6 °C



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

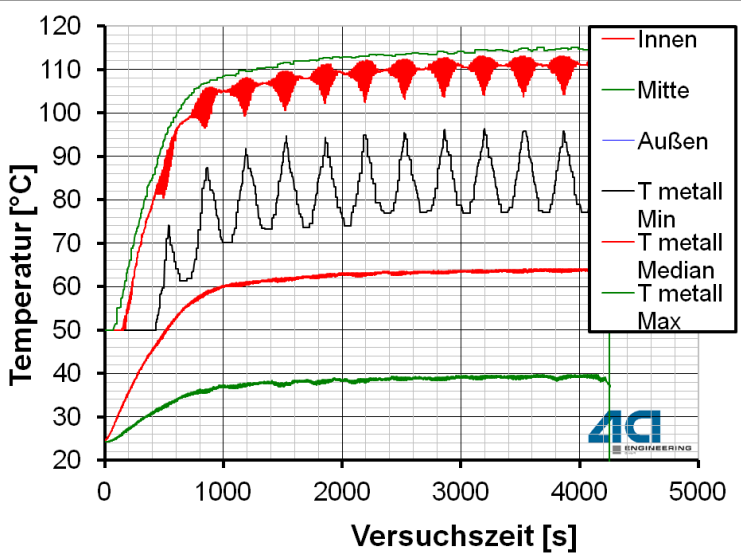
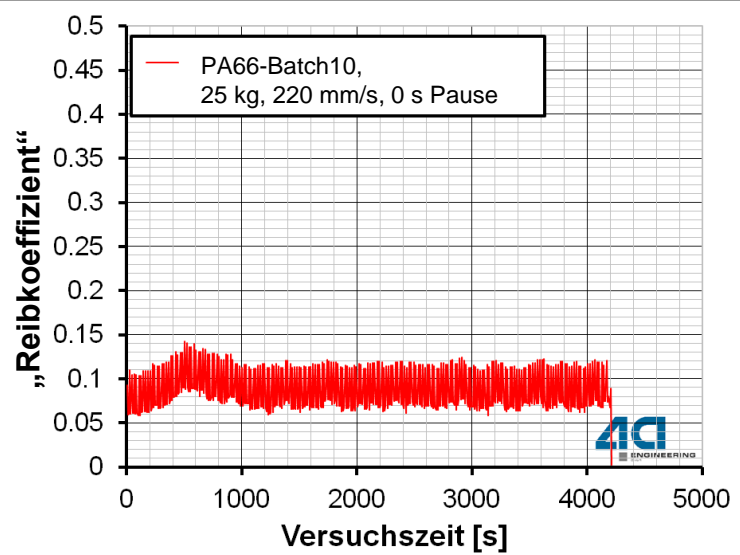
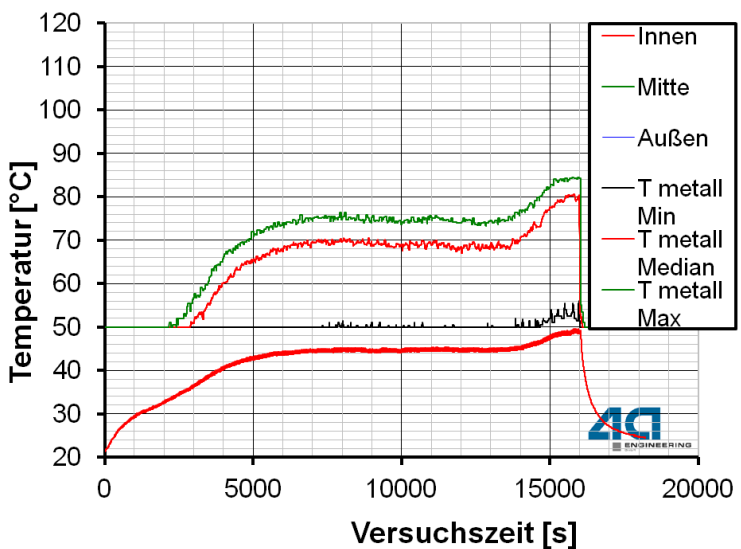
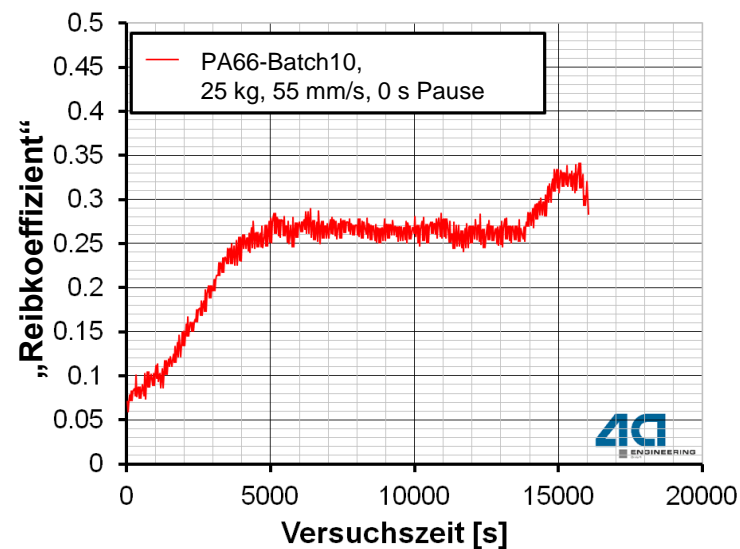
links: ohne Pause; rechts: mit 30 Sekunden Pause

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^[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]:

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

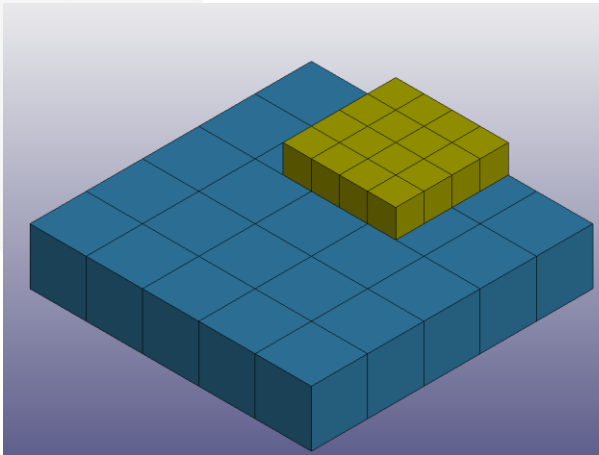
α, β Modellparameter [-], A Kontaktfläche [mm^2], E Elastizitätsmodul [MPa]

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

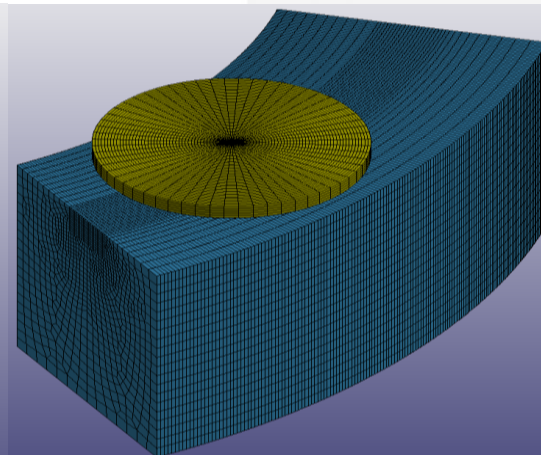
[2] Martinez F.J. et al., Finite element implementation and validation of wear modelling in sliding polymer-metal contacts, Wear 284-285 (2012) 52-64

- 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.

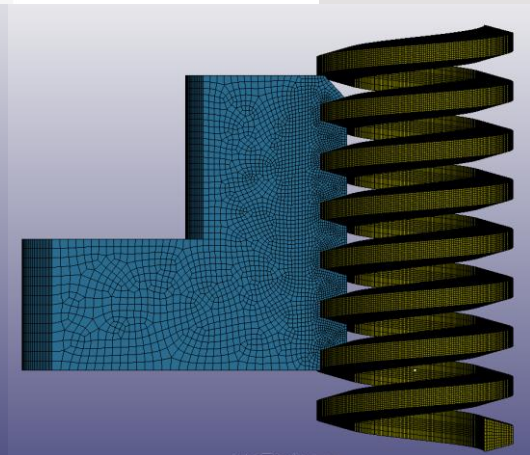
- Die Methodenentwicklung erfolgt über 3 verschiedene Simulationsmodelle:
 - 1. Simple Mind Modell → entwickelte Methoden testen
 - 2. Simulation eines standardmäßig eingesetzten Tribometerprüfstandes (Kugel-Scheibe/Stift-Scheibe Aufbau) → einfacher Aufbau
 - 3. Simulation des 4a Tribocompound Versuchsstandes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



1. Simple Mind Modell



2. Kugel/Scheibe Tribometer Modell



3. 4a Tribocompound Prüfstand Modell

1. Simple Mind Modell

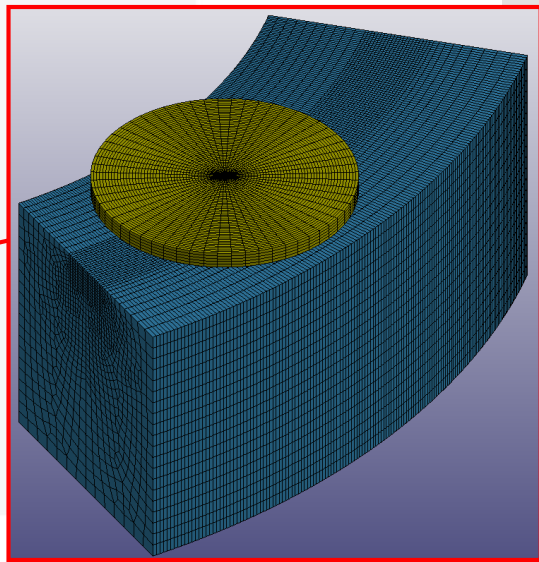
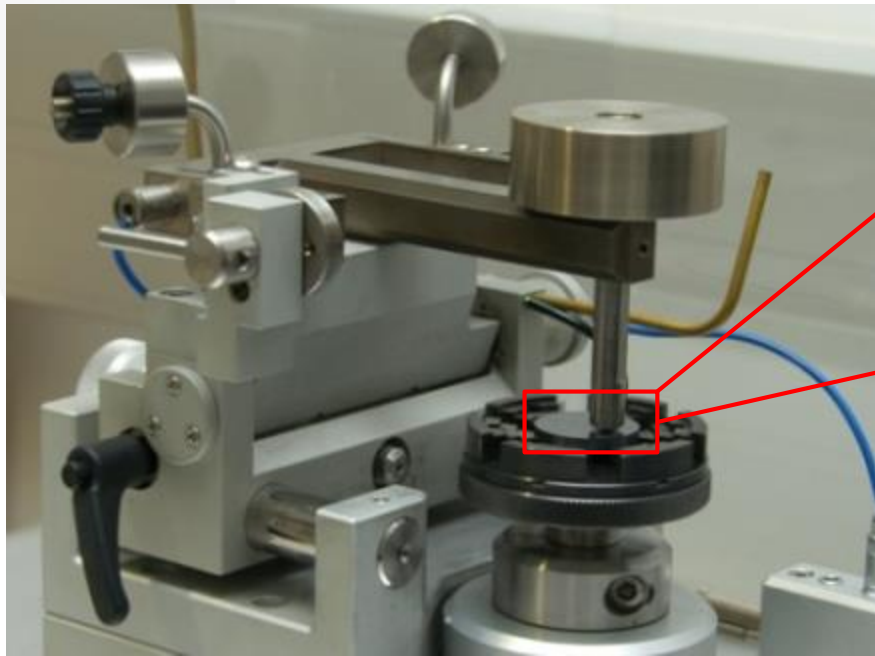
Wahl für Modelle und Implementierung in LS-DYNA

- 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 → Geometrieadaption, Archard's Verschleißgesetz

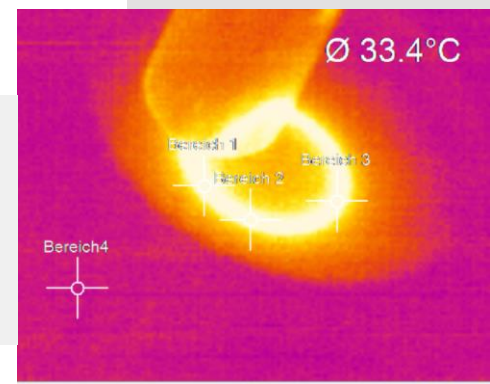
2. Kugel-Scheibe Tribometer

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.

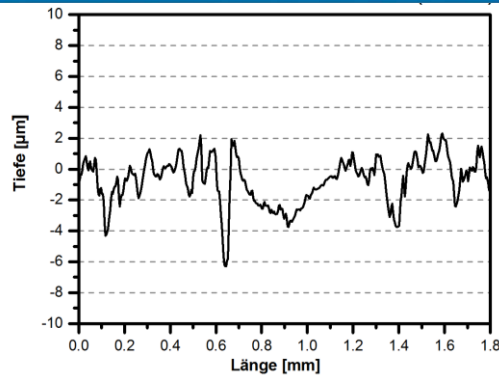
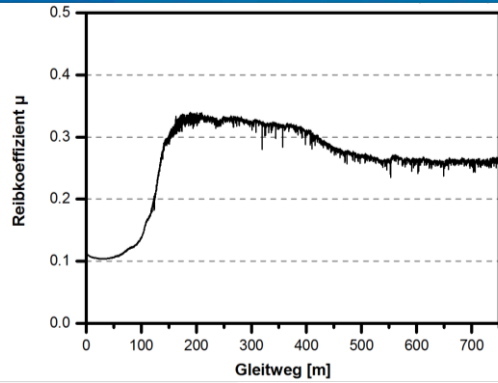


Bereich 1	35.6°C
Bereich 2	33.9°C
Bereich 3	33.4°C
Bereich 4	23.0°C



2. Kugel-Scheibe Tribometer

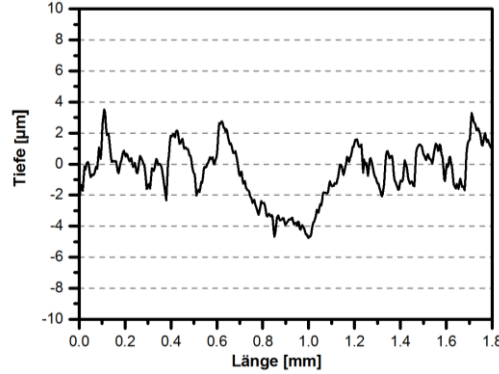
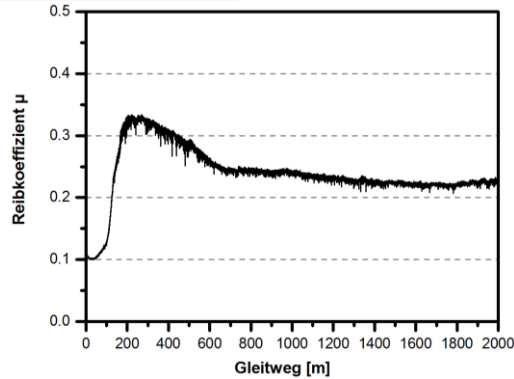
Ergebnisse PA66–Batch10



750 m

Reibkoeffizient μ

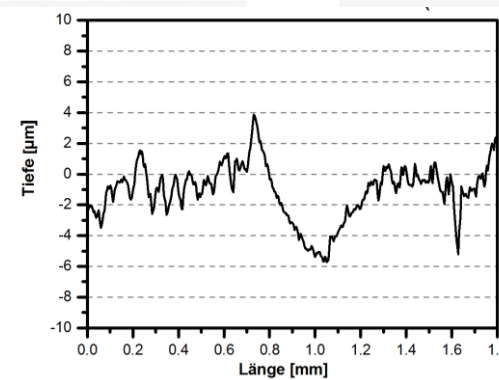
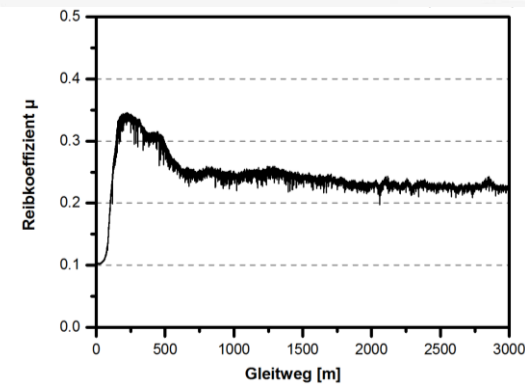
~ 0.26



2000 m

Reibkoeffizient μ

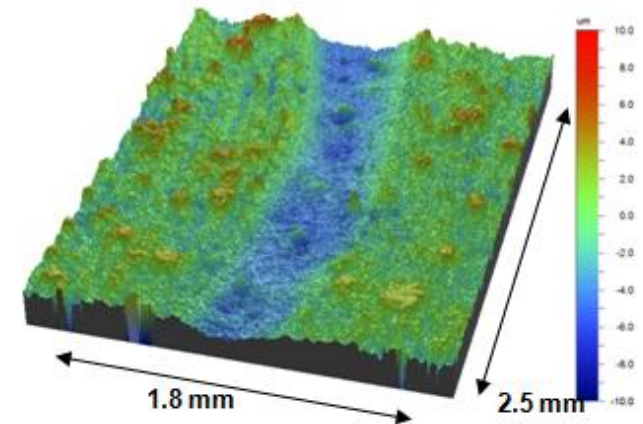
$\sim 0,24$



3000 m

Reibkoeffizient μ

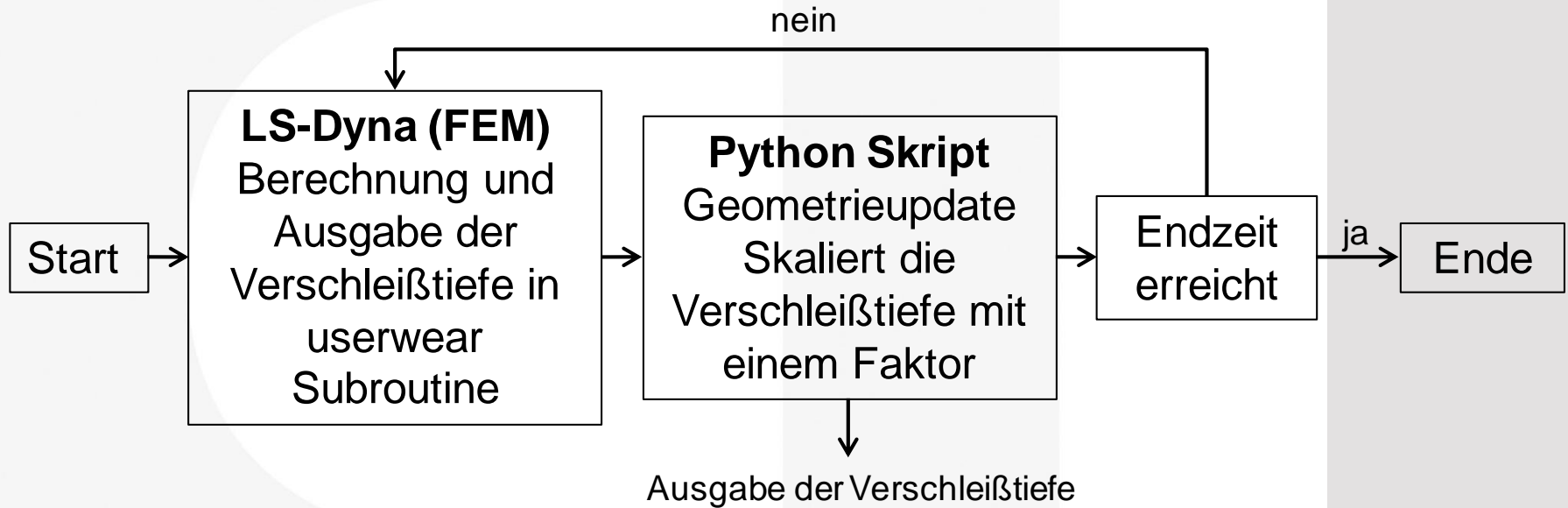
$\sim 0,24$



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

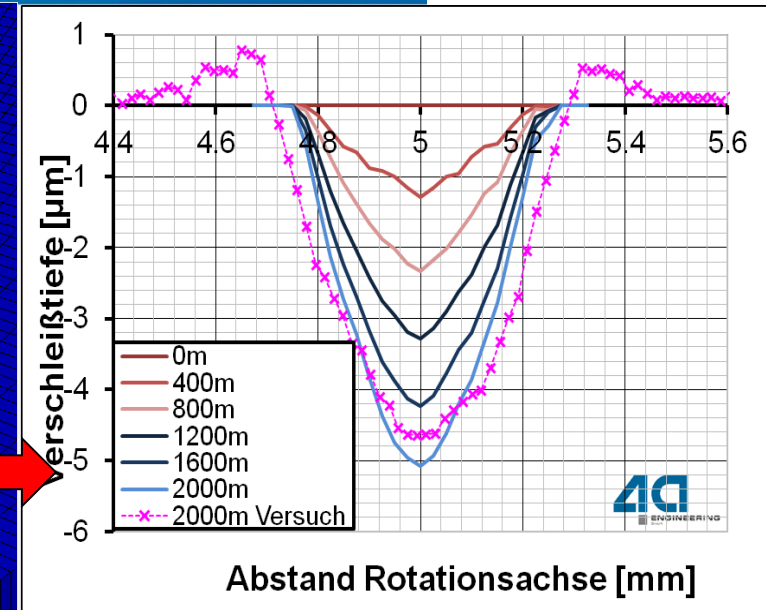
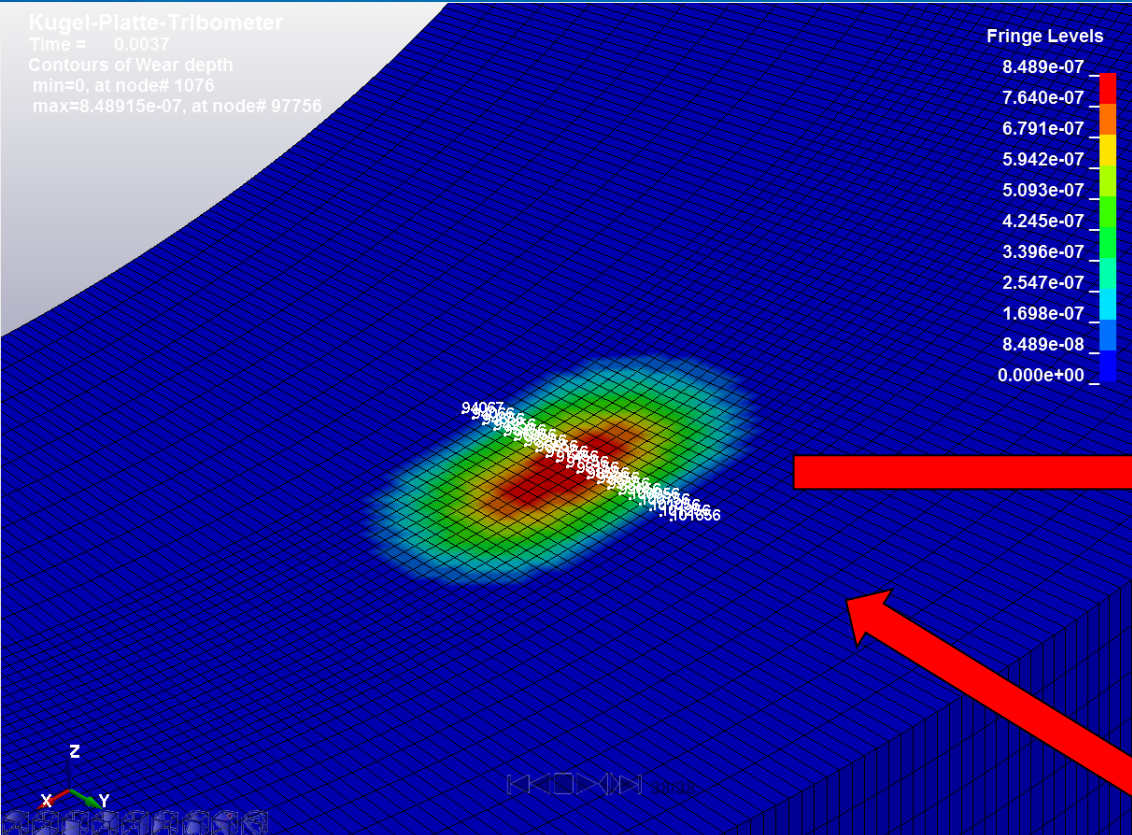
2. Kugel-Scheibe Tribometer

Verschleißsimulationsablauf

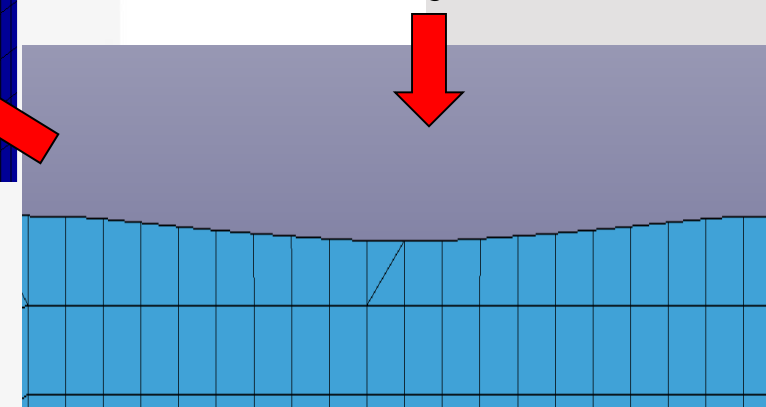


2. Kugel-Scheibe Tribometer

Geometrieupdate



Verschleißtiefenentwicklung für eine Knotenreihe



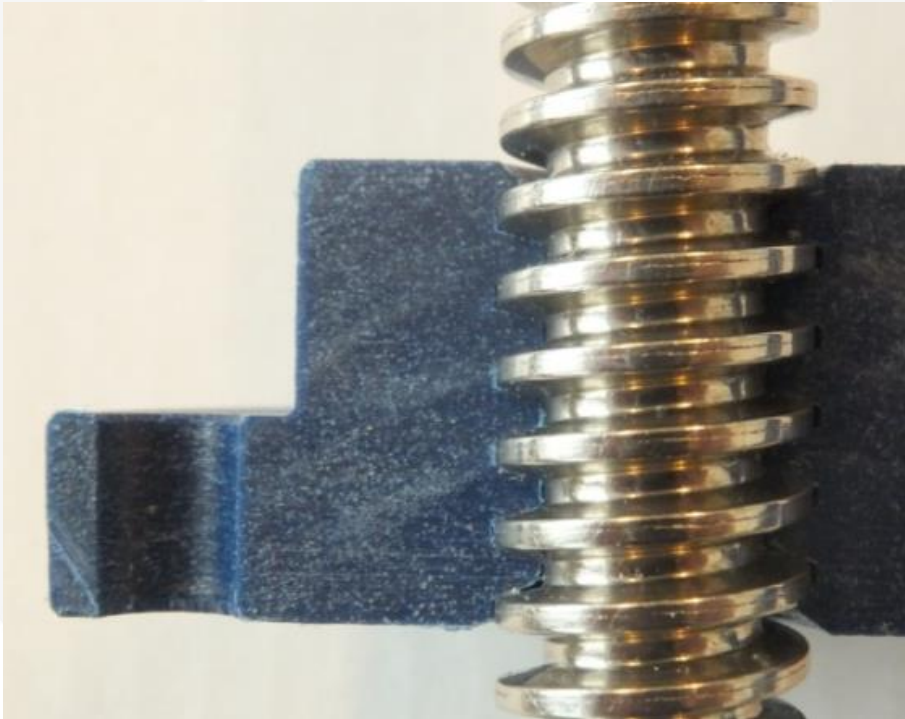
Radialer Schnitt durch Plattenmodell nach Geometrieupdate

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

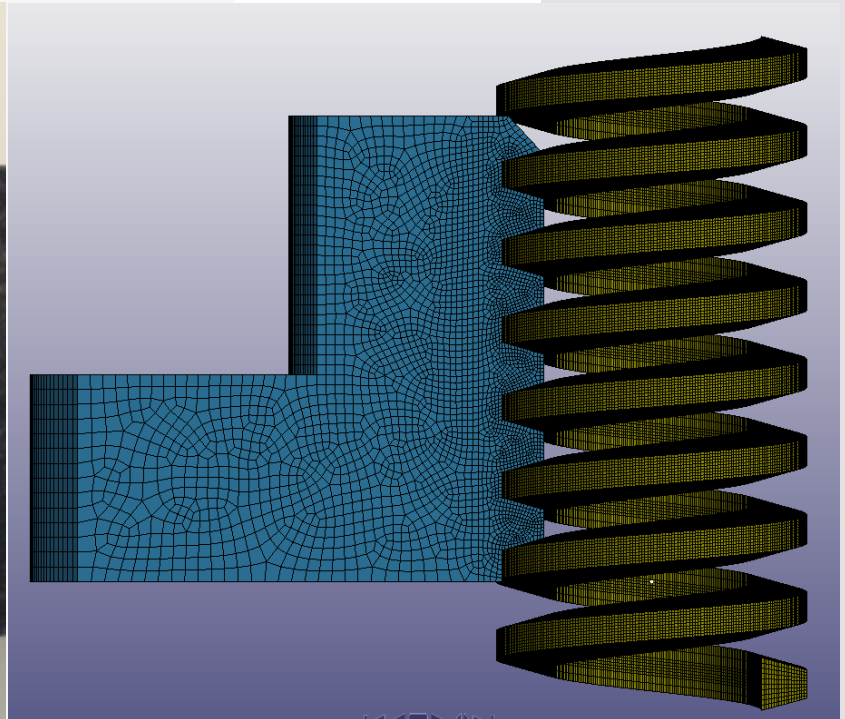
3. 4a Tribocompound – Prüfstand

Modellgeometrie

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



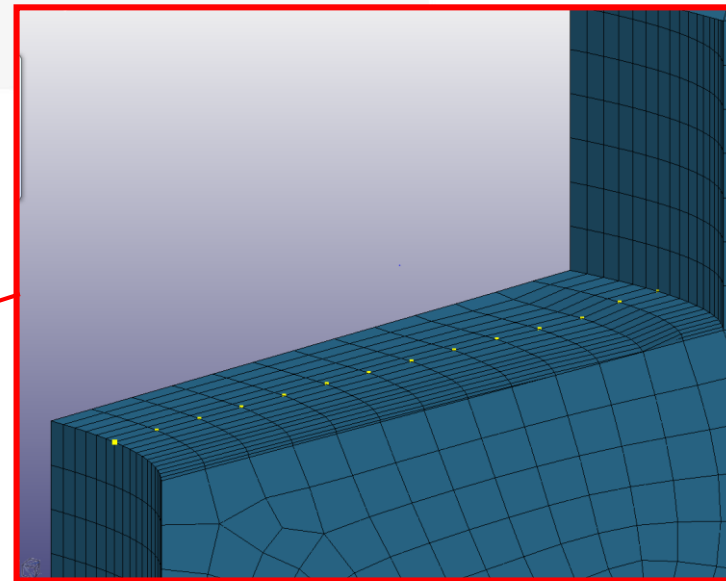
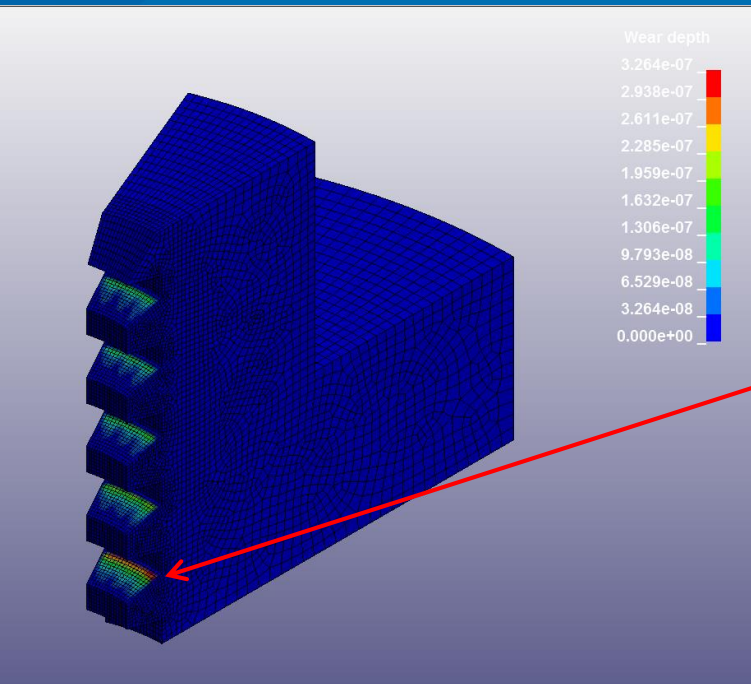
Mutter-Spindel Geometrie



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

3. 4a Tribocompound – Prüfstand

Modell



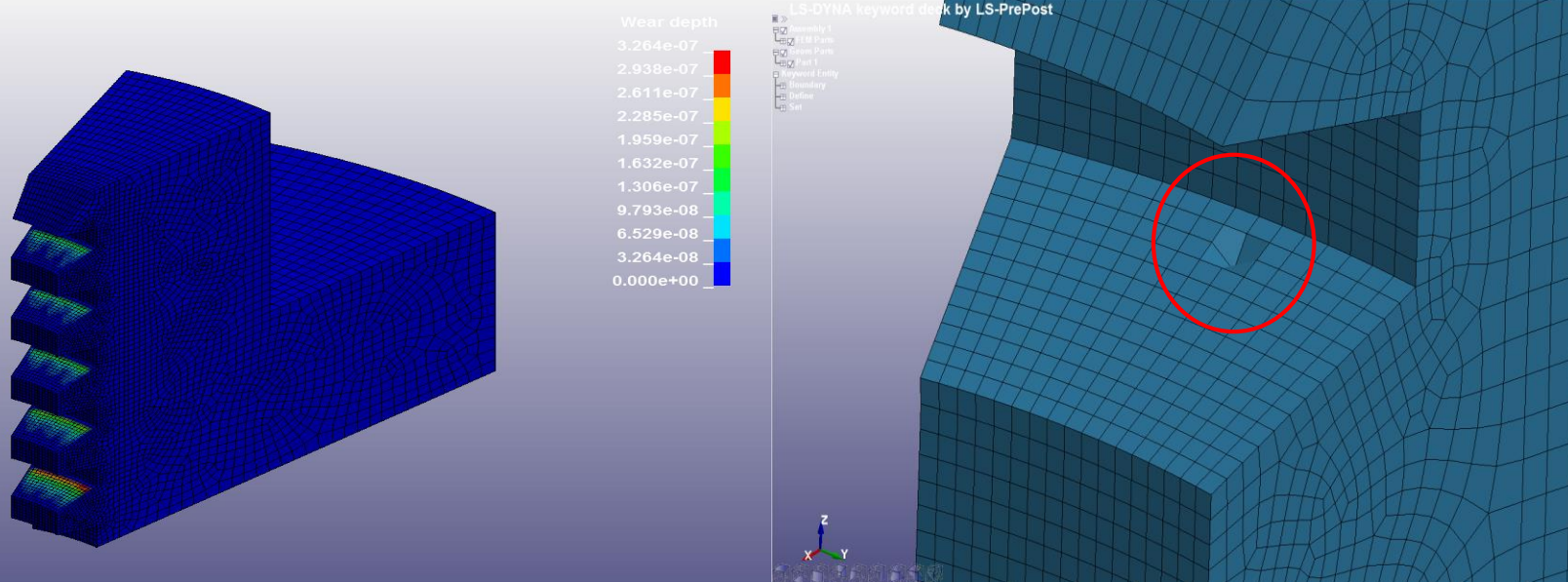
Angepasste Geometrie

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



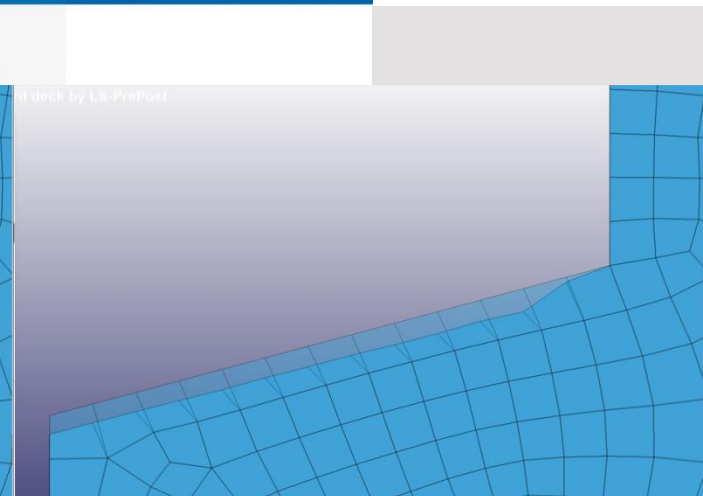
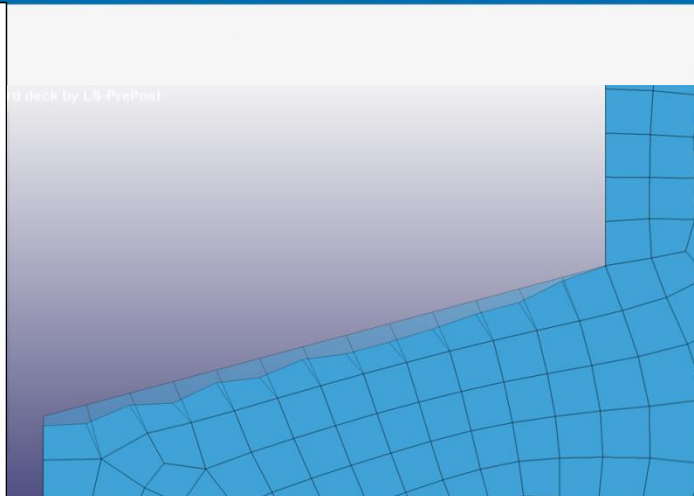
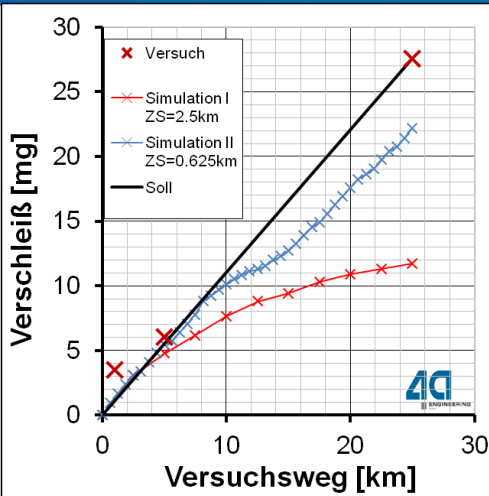
Verschleißtiefe bei Mutter-Spindel-Modell nach einer Iteration

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 Schrittzahl 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!

