

## Institutsmitteilung 2023

IMW  
TU Clausthal

Institutsmitteilung 2023 (Nr. 48)



ISSN 0947-2274 (Band 48, 2023)



Mitteilungen aus dem  
Institut für Maschinenwesen  
der  
Technischen Universität Clausthal  
Nr. 48  
(Dezember 2023)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel; Prof. Dr.-Ing. David Inkermann

Redaktion und Layout:

Dr.-Ing. Günter Schäfer; Sören Krahl, M. Sc.

Anschrift:

Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel: (0 53 23) 72-22 70

Fax: (0 53 23) 72-35 01

E-Mail: [info@imw.tu-clausthal.de](mailto:info@imw.tu-clausthal.de)

<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Modul zur beschleunigten Schädigung von Seilen während des Prüfbetriebes

Die Artikel stehen als \*.pdf-Dokumente auf der Instituts-Homepage zur Verfügung







# Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... 1

## A: Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

*Duchâteau, F.; Lohrengel, A.*  
Experimentelle Untersuchung der Leerlauffeffizienz an Freiläufen ..... 5  
*Neumann, M.; Lohrengel, A.*  
Elektronenstrahlschweißen von Druckkämmen - Gestaltung der  
Schweißnahtkerbe ..... 11  
*Klügel, N.; Krahl, S.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.*  
Simulation von Zahnwellenverbindungen - Ein Generator auf Basis  
von PyMAPDL ..... 17  
*Heinrich, C.; Lohrengel, A.*  
Simulation von hoch belasteten Druckkämmen ..... 23  
*Schäfer, G.*  
Torsionssteifigkeit Balgkupplung ..... 35

## B: Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

*Ammersdörfer, T.; Kuper, S.; Inkermann, D.*  
Agile Arbeitsweisen in der Institusarbeit ..... 43  
*Schumacher, T.; Inkermann, D.*  
Formulierung und Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based  
Systems Engineering ..... 55

## C: Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Losch, M.; Lohrengel, A.</i> Analyse der Verschiebung der neutralen Faser bei Holzproben durch optische Dehnungsmessung mit DIC.....	67
<i>Bauer, R.; Inkermann, D.</i> Charakterisierung von Metallpulvern .....	73
<i>Küster D.; Stök M.; Lohrengel A.</i> Erfassung der Trommelspannungen einer mit Faserseil bewickelten Seiltrommel in der Mehrlagenwicklung .....	85
<i>Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.</i> Energy Harvesting in rotierenden Maschinenelementen .....	89
<i>Stök, M.; Lohrengel, A.</i> Prüfzeitreduktion bei Wickelversuchen .....	95

## D: Hochschule und Kontakte

<i>Meyer, J.; Inkermann, D.</i> Einsatz Virtueller Realität im interaktiven Lernlabor am IMW .....	101
<i>Wächter, M.</i> Auszeichnungen im Maschinenbau .....	109

## Ausstattung etc.

Das Institut und seine technische Ausrüstung .....	115
Veröffentlichungen des Institutes seit 2014 .....	119
Erschienene Institutsmittelungen seit 2011 .....	131
Autoren .....	133
Anfahrt .....	135



## Vorwort

Liebe Projektpartner und Freunde:innen des Instituts für Maschinenwesen, die Erstellung der Institutsmitteilung ist auch für uns der Zeitpunkt auf das Jahr zurückzublicken und die Entwicklungen und Herausforderungen in Lehre und Forschung aber auch des IMW selbst zu reflektieren. Mit Abklingen der Pandemie hat sich unsere Arbeit am IMW weiter normalisiert, wir freuen uns, wieder Studierende im Haus zu haben und im persönlichen Kontakt zusammenarbeiten zu können, auch der direkte Kontakt zu Projektpartnern und Kolleg:innen ist wieder intensiver. Natürlich führen wir einzelne Dinge auch weiter, Homeoffice und virtuelle Meetings haben wir (bis zu einem Grad) schätzen gelernt.

Eine zentrale Herausforderung sind die geringen Studierendenzahlen. Zwar haben sich für das Wintersemester 2023/2024 insgesamt wieder mehr Studierende eingeschrieben, insbesondere auch im Maschinenbau wünschen wir uns aber deutlich mehr Studierende. Gleichzeitig steigt der Anteil internationaler Studierender, insbesondere in den Masterstudiengängen, und es wird stellenweise ein englisch-sprachiges Lehrangebot auf- und ausgebaut. Hierzu gehört auch der Aufbau eines englisch-sprachigen Masterstudiengangs Intelligent Manufacturing.


Wir freuen uns, dass nach längerer Umbauzeit die renovierten Räume im 1.OG bezogen werden konnten. Hier wird im ehemaligen CAD-Raum ein LifeLab zum Thema Circular Design entstehen. Nähere Einzelheiten finden Sie im Artikel dieser Ausgabe. An verschiedenen Lernstationen sollen Studierende die Möglichkeit haben, Methoden und Werkzeuge der virtuellen und lebenszyklusgerechten Produktentwicklung praktisch anzuwenden. Auch Ergebnisse aus Forschungsprojekten werden hier zukünftig demonstriert.

In der Forschung standen in diesem Jahr die Bearbeitung der Projekte in den Themenfeldern XC, VC und Model-based Systems Engineering, kollaborative und agile Produktentwicklung, sensorintegrierte Maschinenelemente, energieeffiziente Druckkamm Lagerungen, Turbogetriebefeffizienz, parasitäre Zusatzlasten in Kupplungen, Zahnwellenoptimierung, stirnseitige Kupplungsbefestigung, Hybrid Ropes, Strukturmechanik nachwachsender Rohstoffe, Dämmstoff-Herstellanlage, Sinterprofilnaben, PEM-Herstellanlage sowie der Lebenszyklusplanung und -steuerung im Vordergrund. Einzelne Projekte konnten erfolgreich abgeschlossen werden und die Ergebnisse publiziert werden. Auch neue Projektideen und -anträge konnten wir

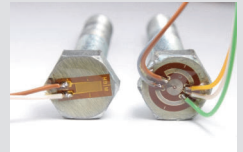
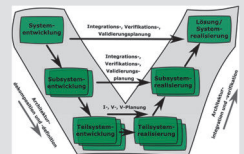
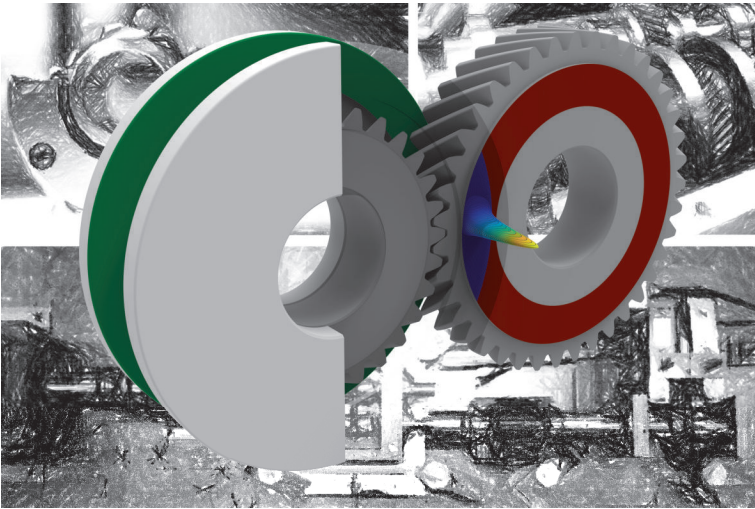
vorantreiben und werden in 2024 mit spannenden Themen unsere Forschungsarbeiten weiterentwickeln.

Ebenfalls sehr erfreulich ist die hohe Anzahl an Preisträgern, die das IMW in diesem Jahr hervorbringen konnte. Nähere Details zu den Würdigungen, die Frau Neumann, Herr Krahl und Herr Hahn erhalten haben, finden Sie in unserem Beitrag.

Wir als IMW-Team wünschen Ihnen ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes Jahr 2024.

Handwritten signature in cursive script, appearing to read "A. Lohmeyer".Handwritten signature in cursive script, appearing to read "D. ...".

A



## Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen





## Experimentelle Untersuchung der Leerlaufeffizienz an Freiläufen

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

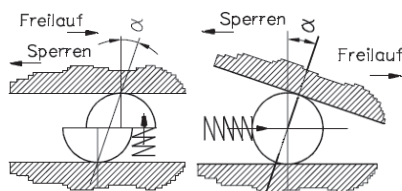
*Im Rahmen eines durchgeführten Industrievorhabens mit einem deutschen OEM wurden Freiläufe am IMW auf Ihre Effizienz im Leerlaufbetrieb hin untersucht. Neben der Variation von Baugröße und Freilauftyp, werden die Schleppmomente bei unterschiedlichen Drehzahlen und unter realen Randbedingungen ausgewertet und verglichen.*



*As part of an industrial project, freewheels were examined for their efficiency in freewheeling operation at IMW. In addition to varying the size and type of freewheel, the torque is evaluated and compared at different speeds and under real boundary conditions.*

### Einleitung

Bei der Auslegung von Antriebssträngen erfolgt zunehmend eine Optimierung hin zu mehr Effizienz, um z. B. bei E-Bikes oder E-KFZ bestmögliche Reichweiten zu erreichen. Mit steigenden Anforderungen nimmt der Aufbau an Komplexität zu. Unter bestimmten Bedingungen kann der Einsatz von drehrichtungsabhängig selbsttätig schaltenden Kupplungen (Freiläufen) eine Option darstellen, wobei Teile des Antriebs bei Nichtnutzung automatisch abgekoppelt werden. Reibschlüssig arbeitende Freiläufe, bestehend aus Innenring, Außenring und Klemmelementen, gliedern sich in Klemmkörper- und Klemmrollenfreiläufe, Abbildung 1. Während die Klemmwirkung beim Klemmrollenfreilauf durch einzeln angefederte Klemmrollen zwischen speziell geformtem Stern und Ring erfolgt, werden beim Klemmkörperfreilauf die speziell gekrümmten Klemmelemente zwischen den zylindrischen, koaxialen Freilauftringen verkeilt, um einen Kraftschluss herzustellen /1/. Im Folgenden werden Freiläufe im Leerlaufbetrieb untersucht und hinsichtlich des Schleppmomentverhaltens ausgewertet. Randbedingungen wie Variation der Drehzahl, Schmierung, Temperatur und Antriebsmodi können realitätsnah angepasst werden. Für die Betrachtungen werden vier Freiläufe herangezogen, wobei es sich sowohl um Standard-Freiläufe als auch um anwendungsspezifische Sonderauslegungen handelt.

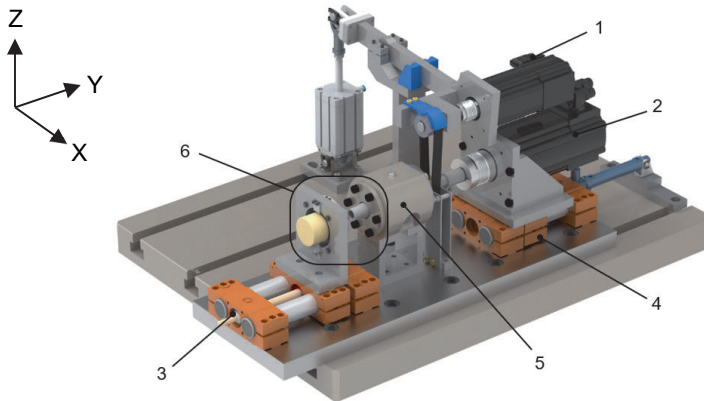


**Abbildung 1:** Darstellung der verwendeten Freilaufarten /2/



## Versuchsaufbau

Für die Untersuchung von sehr kleinen Drehmomenten, wie bei der Betrachtung von Schleppmomenten vorliegend, steht am IMW ein servomotorischer Prüfstand zur Verfügung. Der Prüfstand, in Abbildung 2 dargestellt, besteht aus zwei Elektromotoren [Leerlauf (1) und Dynamik (2)], zwei Lineareinheiten [(3) und (4)], einer Lagereinheit (5) und einem Prüfraum (6) samt zugehöriger Messtechnik in Form von Drehmoment- und Drehzahlsensoren.



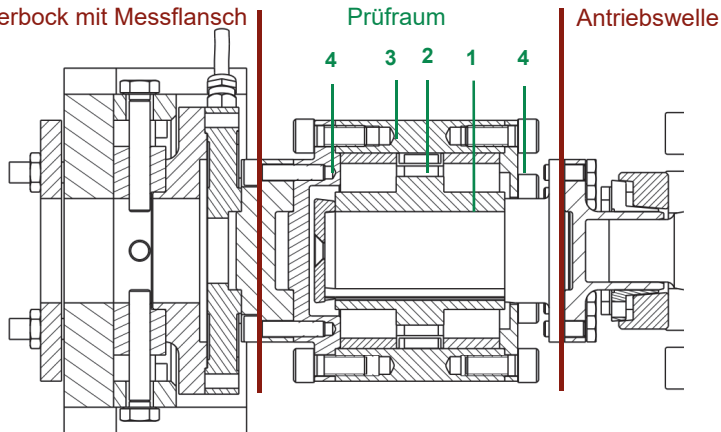
**Abbildung 2:** Freilauf-Leerlaufprüfstand

Der Prüfraum (6) ist über die erste Lineareinheit (3) axial verschiebbar, um Prüflinge verschiedener Abmessungen montieren zu können. Auf dem Schlitten der Lineareinheit ist ein Lagerbock montiert, welcher die Systemdrehmomente aufnimmt und messtechnisch erfasst. Der Prüfling wird über die Antriebswelle angetrieben, welche durch die Lagereinheit (5) geführt wird. Für den Antrieb stehen wahlweise ein Leerlaufmotor (1) und ein Dynamikmotor (2) zur Verfügung. Über die zweite Lineareinheit (4) ist der Dynamikantrieb zu- und abschaltbar. Das Koppeln des Leerlaufantriebs erfolgt durch Spannen des Keilrippenriemens. Je nach Anforderung können die Antriebe einzeln und in Kombination verwendet werden. Für die hier durchzuführenden Untersuchungen wird der Leerlaufantrieb verwendet. Die Steuerung erfolgt über das Programm des Motorherstellers (Lenze Engineer). Die Gewährleistung eines konzentrischen Laufs ist mittels Exzentrizitätsausgleich in X- und Z-Richtung ist im Bereich des Drehmomentsensors möglich. Eine bewusst definierte Exzentrizität ist über die Verspannung des Systems ebenfalls realisierbar.

Leistungsdaten des Dynamik-Leerlaufprüfstands:

- maximale Drehzahl im Überholbetrieb:  $10.000 \text{ min}^{-1}$
- maximale Winkelbeschleunigung des Dynamikmotors:  $28.000 \text{ s}^{-2}$
- maximales Drehmoment:  $55 \text{ Nm}$
- Auflösung des Drehmomentsensors:  $20 \text{ Nmm}$

Neben der Wahl des Antriebsmodi besteht die Möglichkeit die Prüflinge in den Prüfeinheiten im Ölsumpf oder mit einer Ölumlaufschmierung zu betreiben. Ergänzend kann über eine Thermokammer der Einfluss erhöhter Temperatur realisiert und untersucht werden. Abbildung 3 zeigt eine mögliche Adaption der Prüflinge im Prüfraum, hier bestehend aus Innenring (1), Freilaufkäfig (2), Außenring (3) und seitlichen Deckeln (4).



**Abbildung 3:** Adaption der Prüflinge im Prüfraum

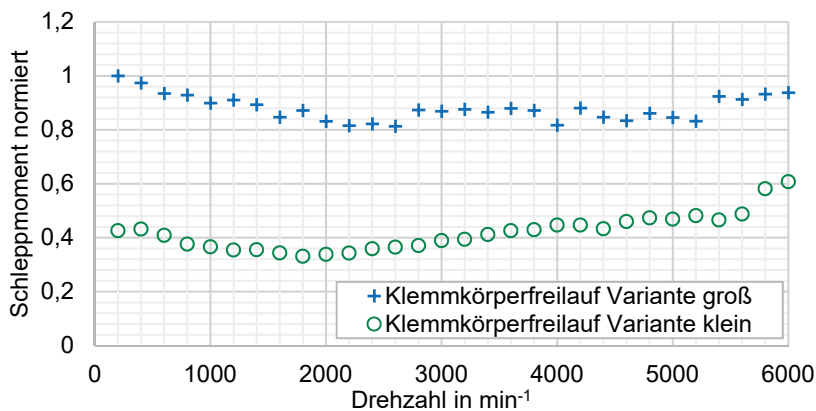
Für jeden untersuchten Freilauf ist die Adaption individuell anzupassen. In den hier vorliegenden Untersuchungen wird auf zusätzliche Dichtungen verzichtet, um das Schleppmoment direkt und unverfälscht erfassen zu können. Einlaufvorgänge von etwa zwei Stunden werden vor jedem Versuch durchgeführt, jedoch nicht in der Untersuchung ausgewertet. Die Adaptionen lassen einen wahlweisen Betrieb über den Innenring oder Außenring zu, der jeweils andere Ring wird am Messflansch starr fixiert.

### Experimentelle Untersuchungen

Es werden vier Freilaufvarianten untersucht. Die beiden Klemmkörperfreiläufe sind baugleich, wobei eine große Variante (A) und eine auf den Innendurchmesser bezogen um ca. 30 % kleiner dimensionierte Variante (B) betrachtet werden. Ein Klemmrollenfreilauf (C) mit Außenstern der Größe des Klemmkörperfreiläufes A entsprechend und eine Sonderauslegung (D) in Form eines Klemmkörperfreiläufes mit zusätzlich integrierter Lagerung gleicher Größe zu A werden ebenso untersucht. Gemessen werden die Schleppmomente bei unterschiedlichen Drehzahlen. Eine Auswahl an Versuchsergebnissen von jedem untersuchten Freilauf typ wird im Folgenden normiert und über der realen Drehzahl abgebildet. Die baugleichen Freiläufe (A & B) werden gemeinsam betrachtet, da diese sinnvoll verglichen werden können. Jeder dargestellte Messpunkt setzt sich aus jeweils drei gemittelten Versuchsergebnissen zusammen.

## Variante A & B

Die in Abbildung 4 gezeigten Verläufe der Standard-Klemmkörperfreiläufe zeigen grundlegend einen ähnlichen Schleppmomentverlauf, welches aufgrund der gleichen Baureihen sinnvoll erscheint. Das Schleppmoment nimmt im ersten Drittel des untersuchten Drehzahlbereiches zunächst leicht ab, zeigt dann bei der großen Variante einen konstanten Verlauf bis es zum Ende. Die kleine Variante zeigt hingegen einen leichten linearen Anstieg des Drehmomentes bis zum Ende.

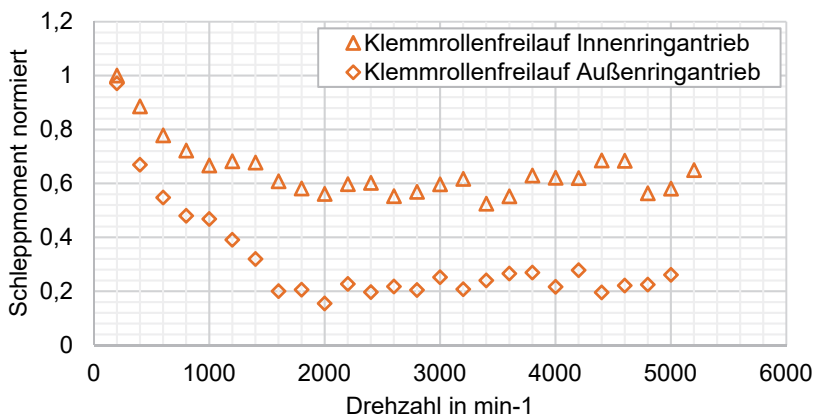


**Abbildung 4:** Ergebnisse zu den Standard-Klemmkörpervarianten A & B

Anhand der abgebildeten Verläufe liegt das Schleppmoment der großen Variante A im Anfangsbereich um ca. 50 % höher im Vergleich zur kleinen Variante, danach nimmt der Unterschied durch Zunahme des Schleppmomentes der kleinen Variante minimal ab. Streuungen werden hierbei nicht näher ausgewertet und betrachtet.

## Variante C

Der Fokus bei der Untersuchung des Klemmrollenfreilaufes, als grundlegend anders aufgebauter Prüfling im Vergleich zu den anderen Varianten, lag primär auf der Identifikation des Einflusses aufgrund der Antriebsart. Unterschieden wird in Innen- und Außenringantrieb, wobei entsprechend entweder der Innenring oder Außenring angetrieben wird, während der jeweils andere Ring am Drehmomentmessflansch starr fixiert ist. Abbildung 5 zeigt, dass die Verläufe beider Betriebsmodi zunächst, ausgehend vom gleichen Schleppmoment, stark abfallen, wobei unter Außenringantrieb der Abfall deutlich ausgeprägter ausfällt. Ab Erreichen von etwa 30 % der Prüfdrehzahl zeigen beide Untersuchungen einen sehr konstanten Schleppmomentverlauf. Auffällig ist der insgesamt nahezu identische Verlauf beider Untersuchungen. Der einzige Unterschied ist in der Höhe des Schleppmomentes begründet, welches mit zunehmender Drehzahl bei Außenringantrieb deutlich weiter absinkt.

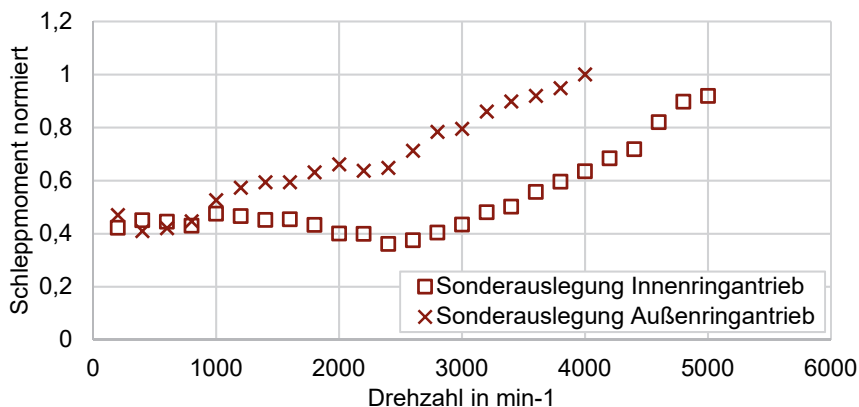


**Abbildung 5:** Ergebnisse zum Klemmrollenfreilauf mit Innen- und Außenringantrieb

Im parallelen Verlauf (zwischen 30 – 100 % der Drehzahl) liegt das Schleppmoment im Außenringbetrieb um den Faktor 3 unterhalb des Innenringantriebes. Ein Grund könnte auf die Bauform (Klemmrollenfreilauf mit Außenstern) zurückzuführen sein, sodass bei zunehmenden Fliehkräften in Wechselwirkung mit der Anpresskraft der Federn der Rolle-Zylinder-Reibkontakt auf ein Minimum reduziert wird.

**Variante D**

Die Sonderauslegung mit integrierter Lagerung wird wie Variante C geprüft. Die Untersuchungen in Abbildung 6 zeigen ein stark abweichendes Verhalten zu Variante C.



**Abbildung 6:** Ergebnisse zum Klemmkörperfreilauf mit integrierter Lagerung

Ausgehend von gleichen Schleppmomenten bei niedrigen Drehzahlen bis ca. 15% divergieren die Messergebnisse auseinander. Unter Außenringantrieb erfolgt sofort ein linearer Anstieg bis zur maximalen Drehzahl. Das Schleppmoment unter Innenringantrieb verläuft bis etwa 40 % nahezu konstant, danach erfolgt ein ebenfalls linearer Anstieg bis zum Messende. Auffällig ist bei dieser Variante der sehr ähnliche Verlauf beider Untersuchungen, mit dem Unterschied, dass das Schleppmoment bei Innenringantrieb deutlich später ansteigt. Im parallel verlaufenden Bereich zeigt sich eine um ca. den Faktor 1,7 bessere Effizienz bei Außenringantrieb, gegenüber Innenringantrieb.

### Zusammenfassung

Die Untersuchungen zu den Schleppmomenten an den unterschiedlichen Freiläufen zeigen grundlegend unterschiedliche Ergebnisse. Ein direkter Vergleich zwischen allen Freiläufen ist aufgrund der unterschiedlichen Bauart, Baugröße und Auslegung schwierig. Tendenziell liegt bei dieser Untersuchung das Schleppmoment der kleinen Baugrößen sehr niedrig. Besonders vorteilhaft erwies sich auch der Klemmrollenfreilauf unter Außenringantrieb ab einer mittleren Drehzahl. Ebenso konnte gezeigt werden, dass Freiläufe auf bestimmte Anforderungen, wie geringes Schleppmoment bei niedrigen Drehzahlen, ausgelegt werden können. Dies zeigt die Untersuchung der Sonderauslegung (Variante D). Die Versuche zeigen insgesamt, dass das Schleppmoment eng mit der Drehzahl verknüpft ist und entsprechend z. T. massiven Änderungen unterliegt.

Insgesamt eignet sich der Leerlauf-Effizienzprüfstand sehr gut, um unter diversen Betriebsmodi sowohl kleine als auch große Freiläufe jeglicher Bauform hinsichtlich ihrer Schleppmomente und auch Einschaltverhalten über große Drehzahlbereiche nachzubilden und zu analysieren.

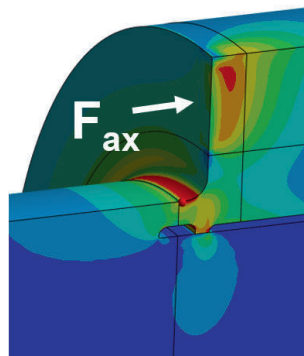
### Literatur

- /1/ Stölzle, K.; Hart, S.: Freilaufkupplungen: Berechnung und Konstruktion; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1961
- /2/ Lohrengel, A.: Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Klemmrollenfreiläufen; Dissertation RWTH Aachen; 2001

## Elektronenstrahlschweißen von Druckkämmen - Gestaltung der Schweißnahtkerbe

Neumann, M.; Lohrengel, A.

Um Steifigkeitsanpassungen durch Einstiche an Druckkämmen vornehmen zu können, ist es notwendig, eine andere Welle Nabe Verbindung vorzusehen, als den meist genutzten Pressverband. Viel Spielraum bietet hierbei eine Schweißnahtverbindung. Durch die umlaufende Axialkraft auf den Druckkamm, liegt eine hohe Spannungsamplitude im Bereich der Schweißnaht vor. Die metallurgische Kerbe der Schweißnaht und die geometrische Kerbe, die sich aus der Geometrie des Druckkamms ergibt, müssen örtlich getrennt werden. Dies wurde im Verbundvorhaben „TurboGetEff“ mit der PILLER Blowers & Compressors GmbH untersucht.

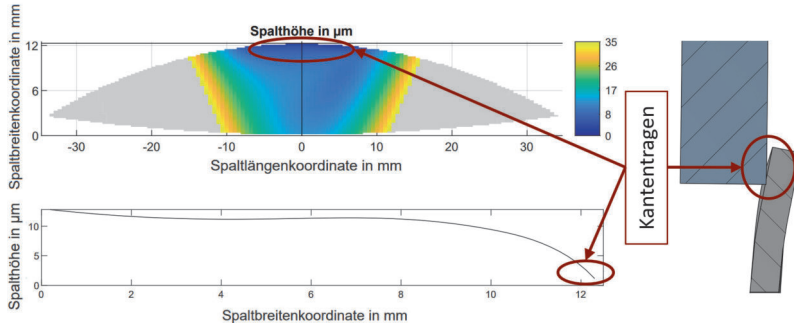


*In order to be able to make stiffness adjustments through recesses to thrust cones, it is necessary to provide a shaft-hub connection other than the most commonly used press fit. A welded joint offers many options. Due to the rotating axial force on the thrust cone, there is a high stress amplitude in the area of the welded joint. The metallurgical notch of the weld seam and the geometric notch resulting from the geometry of the thrust cone must be separated locally. This was investigated in the project "TurboGetEff" with PILLER Blowers & Compressors GmbH.*

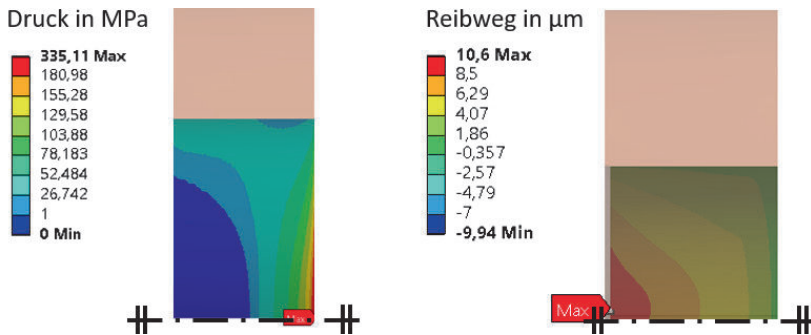
### Problematik

Durch Dickenunterschiede von Druckkamm und Zahnrad kommt es zu unterschiedlichen Steifigkeiten der Kontaktpartner. Der oftmals dünnere Druckkamm wird unter der Axiallast stärker deformiert. Es kommt zum Kantentragen, bei dem die Schmierstalthöhe einseitig stark abnimmt, siehe Abbildung 1. Zur Vermeidung von Kantentragen, sollten die Steifigkeiten im Kontaktgebiet identisch sein. Dies könnte beispielsweise durch Einstiche im Druckkamm oder Zahnrad erreicht werden, /1, 2/. Üblicherweise wird der Druckkamm mithilfe eines Pressverbands gefügt. Da der Druckkammkontakt mit einer umlaufenden Axialkrafteinleitung mit großem Hebelarm belastet wird, neigt die Welle-Nabe-Verbindung (WNV) zum Klaffen, /3/. Der Druckkamm wird daher oft sehr breit ausgeführt und nimmt unnötig viel Platz auf der Ritzelwelle ein. Bei Druckkämmen mit kleinen Durchmessern kann es zudem durch die elastische Deformation des Druckkamms auf der belasteten Stirnseite zu kleinen Schlupfbewegungen im Pressverband kommen, was zu Passungsrost führen kann. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt. Um Steifigkeitsanpassungen an Druckkämmen vornehmen zu können und so Kantentragen entgegen zu wirken, ist es notwendig,

eine andere Art von WNV einzusetzen. Bei Verwendung des Pressverbands würden dünnere Druckkämme oder Druckkämme mit Einstichen zu Pressungsverlusten führen, wodurch die Gefahr des Klaffens und Passungsrostes steigt. Eine alternative Möglichkeit ist eine Verbindung von Druckkamm und Ritzelwelle über Elektronenstrahlschweißen. Dieses Verfahren zeichnet sich durch geringen Verzug aus, was notwendig ist, damit der Druckkamm durch die Montage möglichst geringe Schiefstellung erfährt, denn diese würde wiederum zum Kantentragen beitragen.



**Abbildung 1:** Problematik des Kantentragens, /2/



**Abbildung 2:** Problematik des Klaffens (links,  $b = 30$  mm,  $D_a = 130$  mm) und Passungsrostgefährdung (rechts,  $b = 47$  mm,  $D_a = 170$  mm);  $F_{ax} = 30$  kN, H6s5

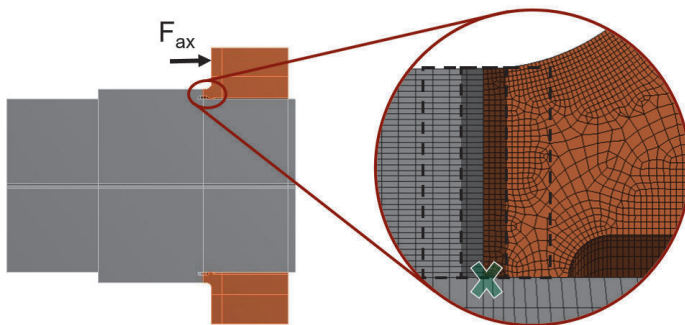
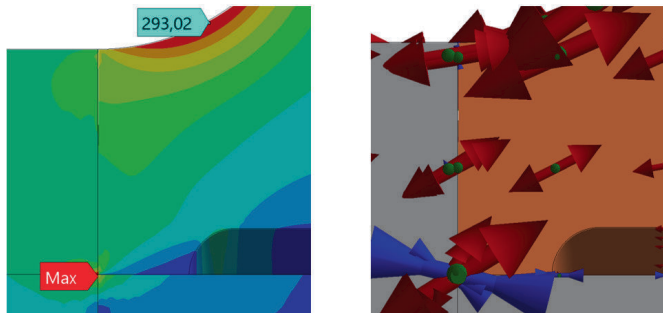
### Variation Schweißnahtgeometrie

Die im Folgenden untersuchte Verbindung ist in Tabelle 1 beschrieben. In Abbildung 3 ist auf der linken Seite ein Halbschnitt der Ritzelwelle mit Druckkamm dargestellt. Im eingekreisten Bereich liegt die Schweißnaht. Zudem ist ein Absatz zur Zentrierung des Druckkamms auf der Ritzelwelle zu sehen.

**Tabelle 1:** Randbedingungen Druckkammsimulation

Überdeckung Druckkamm	12,5 mm
Außendurchmesser Druckkamm	132,7 mm
Breite Druckkamm	37 mm
Breite des hochbelasteten Bereichs der Druckellipse	ca. 6°
Kraft auf Druckkamm (Untersuchung Reibweg)	23,5 kN
Kraft auf Druckkamm (Untersuchung Klaffen)	30 kN

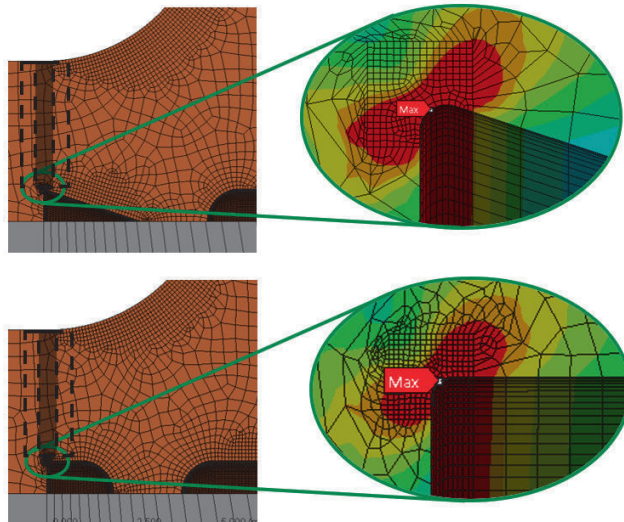
In einem ersten Schritt wird die Geometrie in Abbildung 3 untersucht. Der umrandete und grau eingefärbte Bereich in der rechten Abbildung entspricht der 1 mm breiten Schweißnaht und der nicht eingefärbte Bereich entspricht der 3 mm breiten Wärmeeinflusszone (WEZ), die durch das Elektronenstrahlschweißen zustande kommt. In diesem Bereich liegt eine metallurgische Kerbe vor. Die maximale Spannung liegt an der Wurzel der Schweißnaht, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Der Spannungsfluss ist durch die sehr scharfe Kerbe am Zentrierabsatz stark behindert.

**Abbildung 3:** Druckkamm und Ritzelwelle im Schnitt (links) und Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht (rechts), Kerbe gekennzeichnet**Abbildung 4:** Maximale Spannung in der Schweißnahtwurzel



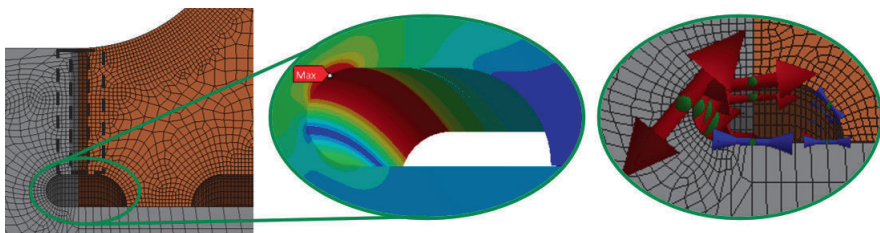
Um die Kerbe zu entschärfen, wird der Zentrierabsatz von der Schweißnaht entfernt, siehe Abbildung 5. Die Kerbe in der Wurzel ist mit dem zur Schweißnahtsimulation herangezogenen kritischen Radius  $r_{FEM}$  nach Gleichung 1 ausgeformt und nach Empfehlung von /4/ vernetzt. Dabei ist  $r_{Geo}$  der geometrische Kerbradius (Worst Case:  $r_{Geo} = 0$ ),  $r^*$  die materialabhängige Ersatzstrukturlänge und  $s$  der Mikrostützwirkungsfaktor (für ebenen Spannungszustand und GEH 2,5), /5/.

$$r_{FEM} = r_{Geo} + s \cdot r^* \quad (1)$$



**Abbildung 5:** Kerboptimierung der Schweißnahtwurzel, max. Spannung 1162 MPa (oben) und 1068 MPa (unten)

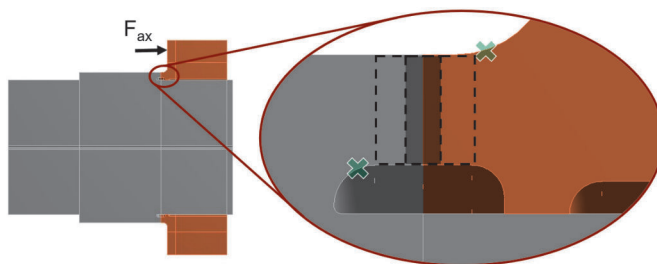
Bisher liegt die geometrische Kerbe im Bereich der WEZ und durch den kleinen kritischen Radius ist die Spannung hoch. Deshalb wird durch einen Einstich in die Ritzelwelle die geometrische Kerbe von der metallurgischen getrennt.



**Abbildung 6:** Kerboptimierung, Einstich in Ritzelwelle, max. Spannung 540 MPa

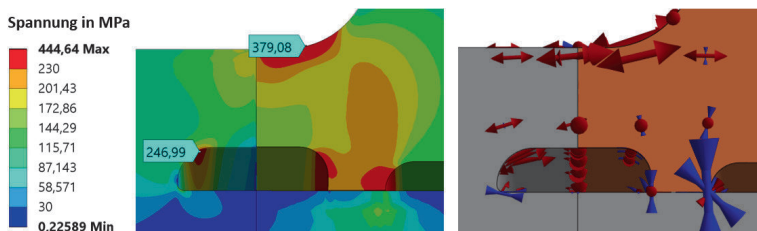
## Finale Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht

Die finale Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Schweißnahtgeometrie ist an einen Stumpfstoß angelehnt, so liegt in der Schweißnahtwurzel keine geometrische Kerbe vor. Die maximalen Ausschlagspannungen treten an den grün gekennzeichneten Stellen (geometrische Kerben) auf. Der Zentrierabsatz ist mit einer Presspassung von H5s5 versehen. Diese stellt sicher, dass der Reibweg ausreichend gering ist und der Zentrierabsatz nicht klappt. Zudem führt sie zu einer Versteifung der Druckkammgeometrie, wodurch die gekennzeichneten Kerben weniger stark durch die umlaufende Axialkraft belastet werden. Zudem führt sie zu einer Versteifung der Druckkammgeometrie, wodurch die gekennzeichneten Kerben weniger stark durch die umlaufende Axialkraft belastet werden. Nachteilig wirkt sich die hohe Zugmittelspannung durch die Presspassung des Zentrierabsatzes auf die Kerbe an der Außenseite des Druckkamms aus. In einer Parametervariation hat sich die gewählte Geometrie als beste Kombination aus den verschiedenen Radien, Passungen, Einstichbreite und -Tiefe (bzw. Schweißnahtdicke) und Druckkammbreiten herausgestellt. Die finale Druckkammgeometrie ist im Vergleich zum Pressverband kompakter.



**Abbildung 7:** Druckkamm und Ritzelwelle im Schnitt (links) und Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht (rechts), geometrische Kerben gekennzeichnet

Auffällig ist die stark unsymmetrische Geometrie des Einstichs in die Ritzelwelle (graues Bauteil). Diese ergibt sich aus einer Parametervariation der Verrundungen in diesem Bereich. Betrachtet man Abbildung 8, so wird deutlich, dass die höchstbelasteten Stellen zugbelastet sind und in der Einstichgeometrie oben Zug und unten Druckspannungen vorliegen.



**Abbildung 8:** Spannungsverteilung (links) und Hauptspannungsrichtungen (rechts)

Die eingeleitete Kraft wird somit um die Einstichgeometrie herumgeleitet. Um die Umlenkung dieser Spannung so kontinuierlich wie möglich zu gestalten, ist die Tiefe des Einstichs so gering wie möglich und mit einem großen Radius ausgeführt (Verhältnis des größeren zum kleineren Radius von 5:1). Durch die unsymmetrische Einstichgeometrie kann die maximale Spannung in diesem Bereich um 40 % gegenüber einer symmetrischen Einstichgeometrie gesenkt werden.

## Zusammenfassung

Durch geschickte Ausformung der Kerbgeometrie im Schweißnahtbereich und eine ausreichend hohe Presspassung kann die geometrische Kerbe von der metallurgischen Kerbe getrennt werden. Zudem kann die Gefahr von Klaffen und Passungsrost im Zentrierabsatz reduziert werden. Mit der vorgestellten Verbindungsmethode sind Steifigkeitsanpassungen von Druckkamm und Zahnrad ohne Einflussnahme auf die Festigkeit der WNV möglich. Dies ist die Grundvoraussetzung um Kantentragen durch Deformation unter Last entgegenzuwirken.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens TurboGetEff (FKZ:03EN4037A-B) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Die Autoren danken dem BMWK für die finanzielle Unterstützung.

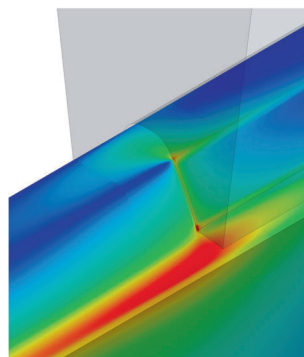
## Literatur

- /1/ Heinrich, C.: Druckkammsimulation unter Berücksichtigung der Platten- und Wellensteifigkeit. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 1. und 2. Oktober 2019 in Aachen, Seite 126 – 137. <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2019-08782>
- /2/ Neumann, M.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.: TurboGetEff: Effizienzsteigerung eines Turboantriebsstrangs unter Einsatz von Druckkammern. In: Reibung, Schmierung und Verschleiß, 64. Tribologie-Fachtagung 2023 (Tagungsband), Gesellschaft für Tribologie, 25.-27.09.2023. Seite 436-446
- /3/ Thoden, D.: Über die Verformung von dicken Kreisringplatten unter exzentrischer Axiallast. In: Institutsmitteilung Nr. 34, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2009
- /4/ A. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, New York: Welding Research Council, 2009.
- /5/ M. Wozasek, Kerbfallkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW, Graz: Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, Institut für Leichtbau, 2012.

## Simulation von Zahnwellenverbindungen – Ein Generator auf Basis von PyMAPDL

Klügel, N.; Krahl, S.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.

*Die Untersuchung von Zahnwellenverbindungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode spielt in verschiedensten Forschungsfragen am Institut immer wieder eine zentrale Rolle. Die Modellerstellung evolvierender Zahnwellen ist dabei, wegen ihrer komplexen Geometrie, sehr zeitaufwändig. Deshalb erscheint eine automatisierte Erstellung und Auswertung des Finite-Element-Modells, gerade für die Berechnung unterschiedlicher Geometrievarianten, sinnvoll. Dieser Artikel zeigt den aktuellen Stand der Entwicklung eines Generators für Zahnwellenverbindungen auf Basis von PyMAPDL auf und gibt einen Ausblick auf zukünftige Möglichkeiten des Tools.*



*The investigation of splined shaft connections using the finite element method repeatedly plays a central role in various research questions at the institute. The modeling of involute splines is very time-consuming due to their complex geometry. Therefore, an automated creation and evaluation of the finite element model, especially for the calculation of different geometry variants, seems to be reasonable. This article shows the current status of the development of a generator for involute spline-shaft-connections based on PyMAPDL and gives an outlook on future possibilities of the tool.*

### Einleitung

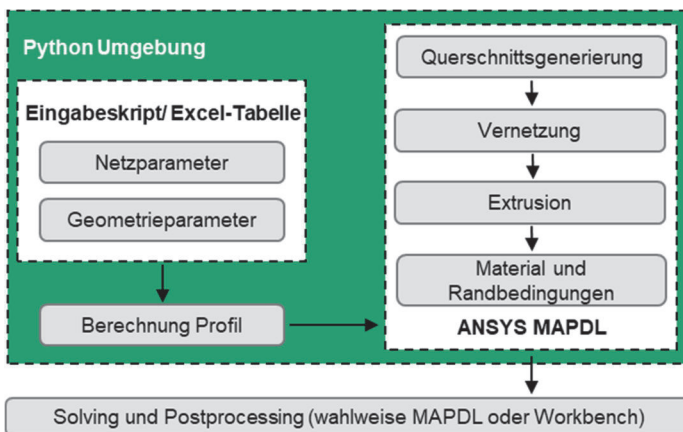
Zahnwellenverbindungen (ZWW) zählen im allgemeinen Maschinenbau aufgrund ihrer hohen Übertragungsfähigkeit von Drehmomenten zu den am häufigsten genutzten formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen. Vorteile liegen dabei in den gegenüber zu Keilwellen kleineren Durchmessern, der Nutzbarkeit dünnwandiger Naben und der Möglichkeit durch eine axial verschiebbare ZWW einen Längenausgleich zu realisieren. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Montage und Demontage der Verbindung. Neben experimentellen Untersuchungen zur Auslegung von ZWW werden auch numerische Verfahren genutzt, insbesondere die Methode der Finiten-Elemente. Üblicherweise ist die Erstellung eines FE-Modells mit einem großen Zeitaufwand verbunden. Dies ist darin begründet, dass die Vernetzung mit einem hochwertigen strukturierten Netz meist nicht automatisch möglich ist. Während einzelne Modelle noch mit vertretbarem Aufwand händisch erstellt werden könnten, ist insbesondere für vergleichende Variationsrechnungen der Zeitaufwand so hoch, dass eine Automatisierung mit einem parametrischen Modell anzustreben ist.

## Status Quo, Ziele und Vorgehensweise

Die angesprochene Automatisierung war schon immer eine Bestrebung am Institut und wurde in verschiedenstem Umfang bereits mehrfach betrachtet. Neben APDL-Procedures /1,2/, mit welchen die Geometrieerstellung und Vernetzung von 2D und 3D Voll – und Sektormodellen unter verschiedenen Randbedingungen möglich ist, sind vorrangig Werkzeuge vorliegend, welche Punktwolken oder CAD-Modelle für die Zähne ausgegeben /3/. Diese können in Ansys zum Aufbau des Modells weiter verarbeitet werden. Insbesondere die Zerlegung der Volumina für die notwendige Diskretisierung in feiner zu vernetzenden Bereichen und letztlich die Vernetzung sind dabei jedoch händisch vorzunehmen. Ziel für das erarbeitete Tool war eine umfassende Automatisierung welche alle folgenden Unterfunktionen in einem Programm abdeckt:

- Geometrieerstellung
- Vernetzung
- Festlegung von Materialverhalten/-kennwerten
- Kontakterstellung
- Festlegung der physikalischen Randbedingungen
- Lösung und Auswertung

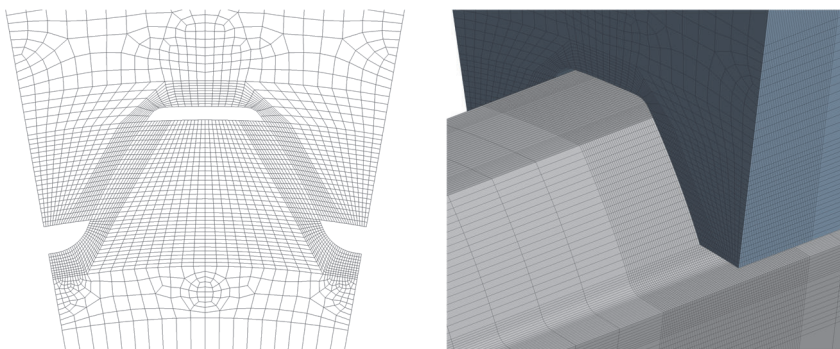
Basis der Umsetzung ist das Paket PyMAPDL mit welchem die Nutzung von Ansys Mechanical APDL (MAPDL) direkt aus Python ermöglicht wird /4/. Vorteilhaft ist dabei, dass dem Nutzer sowohl die Python-, als auch die APDL-Syntax für die Skripterstellung zur Verfügung steht und durch eine objektorientierte Programmierung das vorliegende Tool einfach um weitere Features ergänzt werden kann. Zudem ist keine Schnittstelle zu einem anderen Programm (z.B. Zahnrechnungs- oder CAD-Programm) nötig. Der prinzipielle Programmablauf ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Programmablauf für die Simulation von ZWV

## Möglichkeiten zur Nutzung des Zahnwellengenerators

Zurzeit können sowohl einzelne Berechnungen, als auch Variantenberechnungen an evolventischen Zahnwellen nach den gängigen Normen (z.B. /5,6/) durchgeführt werden. Für einzelne Modelle können die Geometriedaten händisch über ein Eingabeskript eingegeben werden. Bei der Variantenberechnung werden die Kennwerte der Varianten aus einem Excel-Arbeitsblatt eingelesen. Auf Basis der Parameter wird dann die Geometrie als 3D-Sektormodell erstellt und für die Vernetzung vorbereitet. Die so erstellten Bereiche werden mit Hexaedern vernetzt, wobei die Vernetzungsdichte in den einzelnen Bereichen (z.B. Zahnfuß) und auch in axialer Richtung frei gewählt werden kann, siehe Abbildung 2. Darauf aufbauend wird zwischen Welle und Nabe auf der Flanke ein Kontakt erstellt, dessen Eigenschaften frei vom Nutzer wählbar sind (Reibung, Algorithmus zur Kontaktfindung, Kontaktsteifigkeit). Eine ZWV mit Übermaß auf den Zahnflanken kann durch Aufbringen eines Kontaktoffsets berücksichtigt werden. Als Symmetriebedingung ist die Koppelung der beiden Schnittflächen des Sektormodell aufgebracht, als Randbedingungen ist die Stirnseite der Welle gefesselt, auf der Zylinderfläche der Nabe wird ein Torsionsmoment eingebracht. Anschließend wird die Lösung des Modells automatisch gestartet. Für die Auswertung können einzelne Komponenten erstellt werden, welche von Interesse sein können (z.B. lastseitiger Zahnfuß).

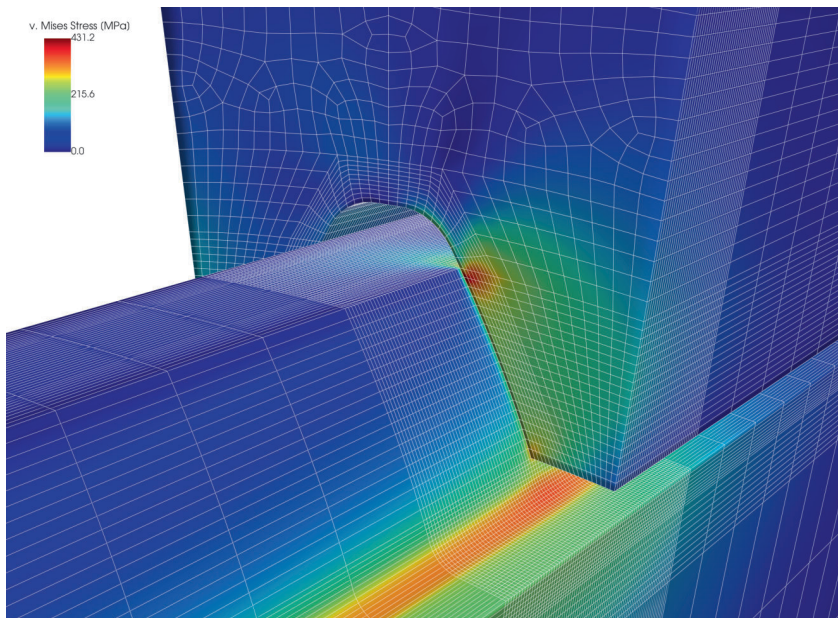


**Abbildung 2:** Vernetzungsstrategie des ZWV-Generators

Aus dem gelösten Modell werden abschließend die Spannungstensoren für alle Knoten in einer separaten Datei gespeichert. Durch Extraktion der Spannungsergebnisse für die zuvor erstellten Komponenten kann eine gefilterte Auswertung vollzogen werden. Hierbei kann neben den Spannungen am höchstbelasteten Knoten zusätzlich der bez. Spannungsgradient  $G'$  senkrecht zur Oberfläche in das Bauteil hinein ausgewertet werden. Mithilfe von weiteren Unterprogrammen kann daraus sowohl die Torsionsformzahl  $\alpha_\tau$ , als auch abgeleitet nach dem Verfahren von SIEBEL und STIELER entsprechend /7/ die Kerbwirkungszahl

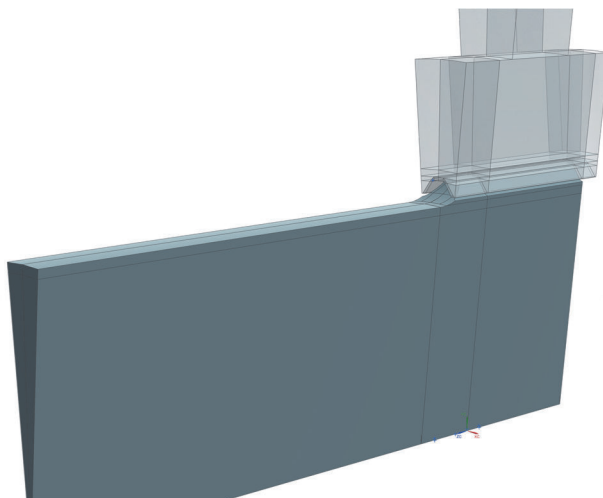


$\beta_\tau$  extrahiert werden. Alle Ergebnisse werden für jedes Modell in einem separaten Ordner abgelegt und zusammenfassend in einer Excel-Datei gespeichert. Zudem besteht die Möglichkeit automatisiert Plots der einzelnen Ergebnisse zu extrahieren. Abbildung 3 zeigt dies am Beispiel eines Spannungsplots im Bereich der Nabenkante. Eine optische Prüfung auf sinnvolle Ergebnisse an der Nabenkante wird somit möglich. Für jedes erstellte Modell wird jeweils eine Datei erstellt, welche das komplette FE-Modell ohne Lösung enthält. Weiterhin wird eine Lösungsdatei gesichert. Beide Dateien können in die Ansys Workbench importiert werden, sodass sowohl die Lösung selbst, als auch die Auswertung im Nachgang auch im bekannten GUI möglich ist.



**Abbildung 3:** Beispiel eines extrahierten Spannungsplots

Abweichend von der vollständigen Lösung in der Python-Umgebung besteht die Möglichkeit das erstellte Modell zu exportieren und mithilfe der Ansys-Workbench zu lösen. Darüber hinaus lässt sich die Geometrie im IGES-Format exportieren. Abbildung 4 zeigt ein exportiertes CAD-Modell, welches für die Untersuchung des Fügeverhaltens von Zahnwellenverbindungen mit Presssitz im Forschungsvorhaben FVA 874 /8/ verwendet wurde. Aufgrund der abweichenden Verzahnungsgeometrie bestehend aus einer evolventischen Welle mit freiem Auslauf und einer geradflankigen Nabe wurde der Zahnwellengenerator hierfür um diese Features erweitert.



**Abbildung 4:** Generiertes CAD-Modell bestehend aus einzelnen Teil-Geometrien

### Weiteres Potential

Als zukünftige Erweiterung des Programms ist die vollständige Integration von geradflankigen Verbindungen, wie z.B. nach DIN 5481 /9/ oder Keilwellen nach ISO 14 /10/ bzw. DIN 5464 /11/ denkbar. Darüber hinaus sollen neben dem freien Auslauf auch gebundene Ausläufe aufgenommen und um die Vernetzung erweitert werden. Vorgesehen ist zudem eine Erweiterung des Programms für die Lastfälle Biegung und kombinierte Torsions-Biegebelastung. Ebenso ist die Untersuchung alternativer Zahnfußformen durch die objektorientierte Programmierung einfach umsetzbar. Erste Vergleichsrechnungen mit elliptischen Fußformen zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse. Auch der Einfluss von Profilmodifikationen kann analog zu den Zahnfußformen betrachtet werden.

Neben der Erweiterung der Möglichkeiten der Geometrieerzeugung ist die Integration des Festigkeitsnachweises nach der FKM-Richtlinie /12/ mit örtlich ermittelten Spannungen geplant. Aktuell ist die Ermittlung des bezogenen Spannungsgradienten integriert. Durch eine weitere Integration wird eine einfache Berechnung der Dauerfestigkeit, bzw. der Lebensdauer der ZWV erreicht.



## Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt ein Programm zur Simulation von Zahnwellenverbindungen vor. Durch die Möglichkeit mit einer Schnittstelle über Python auf Ansys Mechanical APDL zuzugreifen, ist eine einfache Modularisierung des Programms möglich. Zudem entfällt die Notwendigkeit von externen Programmen, wie CAD-Programmen. Momentan ist die Geometrieerstellung, Vernetzung, Festlegung der Randbedingungen und die automatisierte Auswertung für torsionsbelastete Zahnwellenverbindungen möglich. Eine Erweiterung des Programms ist aufgrund seiner modularen Struktur einfach umsetzbar und für die Zukunft angestrebt.

## Literatur

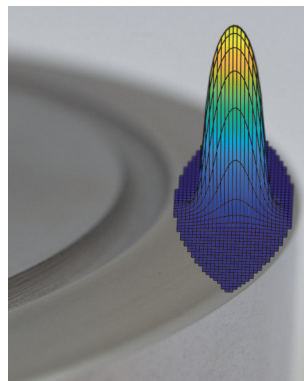
- /1/ Mänz, T.; Nsenga, E.: Entwicklung eines Werkzeugs zur automatischen Erzeugung von Zahnwellen in ANSYS; Institutsmitteilung Nr. 34, IMW Clausthal, S.101-104, 2009
- /2/ Mänz, T. Entwicklung eines Werkzeugs zur automatischen Erstellung und Berechnung von Zahnwellenverbindungen in ANSYS; Institutsmitteilungen Nr. 37, IMW Clausthal, S.23-28, 2012
- /3/ Arslan, G.: IMW-Flankengenerator, Institutsmitteilungen Nr. 38, IMW Clausthal, S.91-100
- /4/ ANSYS, Inc: PyMAPDL documentation 0.67.0, <https://mapdl.docs.pyansys.com/version/stable/>, abgerufen 13.12.2023
- /5/ DIN 5480-1:2015-03, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 1: Grundlagen
- /6/ Norm ISO 4156-1:2009-04: Passverzahnungen mit Evolventenflanken - Metrischer Modul, flankenzentriert — Teil 1: Grundlagen
- /7/ DIN 743-2:2012-12, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen
- /8/ Masendorf, L.; Klügel, N.: Betriebsfestigkeit von Zahnwellenverbindungen mit gesinterten Naben. Forschungsvorhaben Nr. 874 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (IGF Nr. 20321), Frankfurt am Main, erscheint demnächst
- /9/ DIN 5481:2019-04, Passverzahnungen mit Kerbflanken
- /10/ DIN ISO 14:1986-12, Keilwellen-Verbindungen mit geraden Flanken und Innenzentrierung; Maße, Toleranzen, Prüfung
- /11/ DIN 5464:2010-03, Passverzahnungen mit Keilflanken - Schwere Reihe
- /12/ Rennert, R.; Kullig, E.; Vormwald, M.; Esderts, A.; Luke, M.: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main, 7. überarbeitete Auflage, 2020

## Simulation von hoch belasteten Druckkamlagerungen

Heinrich, C.; Lohrengel, A.

*Das thermo-elastohydrodynamische Druckkamm-simulationsprogramm des IMW berechnet Druckkamm-lagerungen unter hoher Last bei Berücksichtigung der Thermik und der Plattensteifigkeit.*

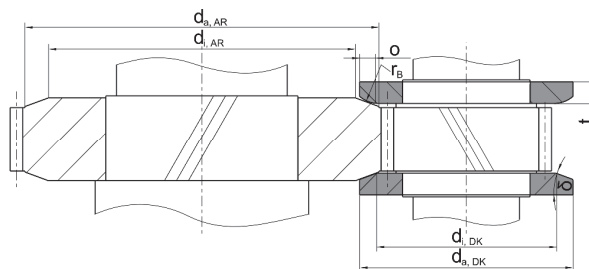
*The IMW's thermo-elastohydrodynamic thrust collar simulation program can be used to dimension thrust collars at high load and with regard to thermals and plate stiffness.*



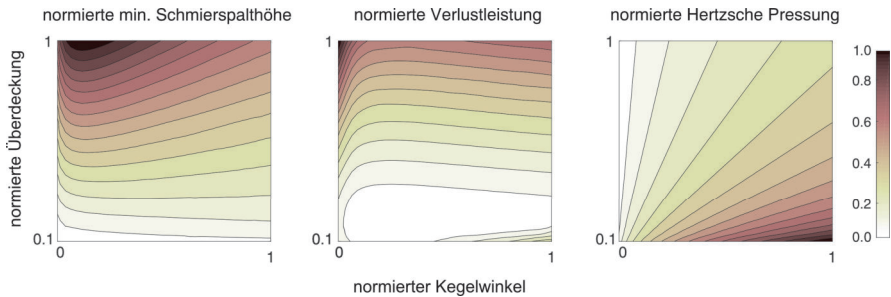
### Einleitung

Das am IMW zur Druckkamberechnung entwickelte Simulationsprogramm wurde zuletzt in /1/ ausführlich beschrieben. Zur Untersuchung von bisher unberücksichtigten Einflüssen sowie deutlich höheren Leistungsdichten wurden umfangreiche Änderungen bzw. Erweiterungen durchgeführt, welche im Folgenden gemeinsam mit dem restlichen Ablauf umrissen werden sollen. Ziel der Simulation ist, Schmier-spalthöhen, Druck- und Temperaturverteilungen sowie die Verlustleistung für beliebige Geometrien und Lastsituationen zu ermitteln.

Die primären geometrischen Druckkamm-Auslegungsparameter sind die Überdeckung  $\sigma$ , der Kegelwinkel  $\delta$  und die Profilform, z. B. bei einer Kreisbogenprofilierung der Bombieradius  $r_B$ , sowie die Plattendicke  $t$  (Abbildung 1). Herausforderung ist, die Überdeckung  $\sigma$  so klein wie möglich zu wählen, um noch schadensfrei ertragbare Schmier-spalthöhen zu erreichen, während gleichzeitig die Verlustleistung minimiert wird, welche bei höherem Schlupf mit wachsender mittlerer Entfernung des Kontaktgebiets vom Verzahnungswälzkreis steigt.



**Abbildung 1:** Geometrische Größen am Druckkamm. Überzeichnete Darstellung.



**Abbildung 2:** normierte Parameterstudie

Es existiert bzgl. der Verlustleistung ein ausgeprägtes Überdeckungsoptimum; darüber ist der Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Überdeckung näherungsweise linear. Die Schmier-spalthöhe sinkt; der Druck steigt mit kleinerer Überdeckung. Ebenfalls existieren ausgeprägte Kegelwinkeloptima, deren Einfluss weniger stark als derjenige der Überdeckung ist (Abbildung 2).

Durch kleinere Überdeckungen bewirkte höhere Leistungsdichten, welche zu einem voll ausgebildetem elastohydrodynamischen (EHD) Parallelspalt führen, sind numerisch komplexer zu berechnen, weshalb verglichen mit /1/ eine andere Druckberechnungsfunktion eingesetzt werden muss.

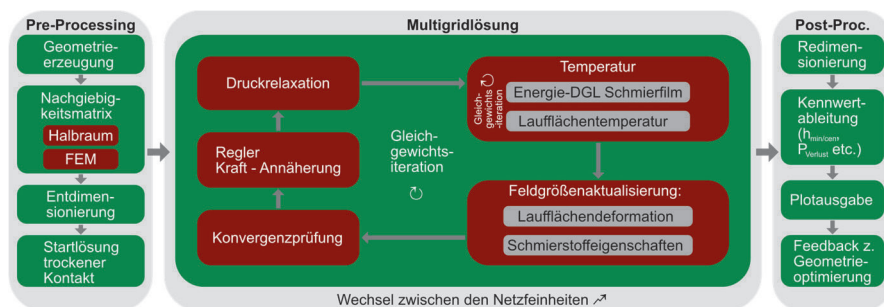
In mobilen Anwendungen sollten die Druckkämme zum Zwecke des Leichtbaus möglichst wenig axialen Bauraum benötigen, d. h. geringe Plattendicken  $t$  besitzen. Die dann stärker ausgeprägte Plattenbiegung bedeutet eine mögliche Schiefstellung der Laufflächen zueinander, welche rechnerisch berücksichtigt werden muss. Bei dünnen Platten stellt sich überdies eine andere Abplattung als bei dicken ein. Weiterhin steigt bei sinkender Laufflächenbreite der Steifigkeitseinfluss des Plattenrandes auf das Berechnungsergebnis.

Insbesondere im Mischreibungsbetrieb in vergleichsweise langsam laufenden Getrieben (bspw. für Fahrzeuge) und in sehr schnellen, voll hydrodynamisch geschmierten Turbogetrieben sollte für eine präzise Auslegung die Schmierstoffwärmung berücksichtigt werden.

Der Programmablauf ist in Abbildung 3 grob skizziert. Das Pre-Processing beginnt mit der Geometrieerzeugung.

### Geometrieerzeugung

Die Berechnung der Feldgrößen erfolgt auf einem rechtwinkligen Gitter, auf welchem zuerst die Spalthöhenverteilung bestimmt wird, welche sich bei unverformten



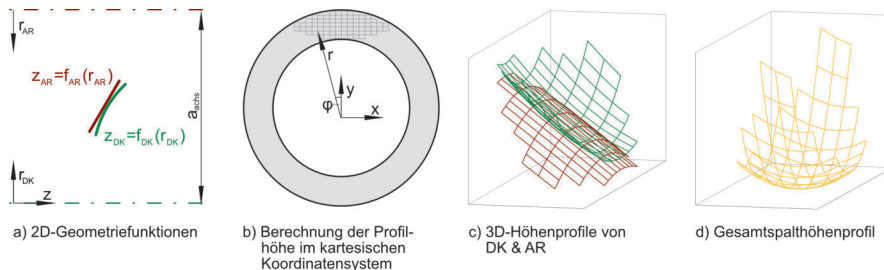
**Abbildung 3: Ablaufdiagramm**

Laufflächen einstellt. Dazu werden die Profilhöhen von Druckkamm (DK) und Anlaufing (AR) im zweidimensionalen Schnitt als Funktion  $z$  des Radius  $r$  definiert (Abbildung 4a). Für eine „gerade“ Lauffläche, d. h. ein Kegelprofil, ist dies eine einfache Dreiecksberechnung:

$$z_{\text{gerader DK}}(r) = \left( r - \frac{d_i}{2} \right) \cdot \tan \delta \tag{1}$$

Weitere Profile lassen sich hier einfach als 2D-Geometriefunktionen hinterlegen. So wurde z. B. in /2/ die Übertragung von Wälzlagerprofilierungen auf Druckkämme untersucht. Schiefstellungen der Laufflächen zueinander z. B. durch Fertigungsfehler lassen sich durch Erzeugung eines Profils mit modifiziertem Kegelwinkel  $\delta$  erzeugen.

Die Profelfunktionen werden im diskretisierten Kontaktgebiet an den in Polarkoordinaten  $r, \varphi$  umgerechneten, in kartesischen Koordinaten  $x, y$  gegebenen Knoten ausgewertet (Abbildung 4b), um die dreidimensionalen Höhenprofile von Druckkamm und Anlaufing zu erhalten (Abbildung 4c). Das Gesamthöhenprofil wird durch Abziehen der Höhenprofile der beiden Kontaktpartner voneinander bestimmt (Abbildung 4d).



**Abbildung 4: Geometrieerzeugungsschritte**

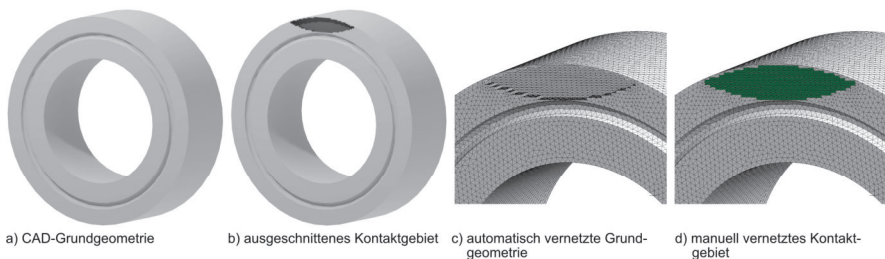
## Laufflächennachgiebigkeit

Zur Berücksichtigung der Laufflächendeformation werden Nachgiebigkeitsmatrizen vorberechnet. In der für EHD klassischen Variante wird die Halbraumtheorie nach BOUSSINESQ /3/ in der numerischen Lösungsweise nach /4/ eingesetzt. Während sich die Nachgiebigkeiten so ohne nennenswerten Zeitaufwand aufstellen lassen, lässt sich mit dieser Technik nicht die Biegung der Platten sowie der Randeinfluss abbilden.

Dies wird daher in einem alternativen Berechnungszweig durch Festkörper-FEM gelöst. In einer ersten, in /5/ vorgestellten Implementation, wurde dies durch Interpolation von Tragdrücken und Verformung zwischen dem beschriebenen rechtwinkligen Tribologienetz und einem komplett automatisch erstellten, und daher nicht übereinstimmendem Festkörpernetz mittels radialer Basisfunktionen umgesetzt. Für die im Folgenden eingesetzte Tragdruckberechnungsfunktion werden Nachgiebigkeiten an Nachbarknoten im Tribonetz benötigt. Diese Reaktion auf eine punktförmige Lasteinleitung lässt sich durch Interpolation nicht sinnvoll bestimmen.

Aus diesem Grund wird ein Hybridverfahren aus automatischer und manueller Vernetzung verwendet, mit welchem im Kontaktgebiet die gleiche Vernetzung auf Tribonetz und Festkörpernetz erzielt wird. Dazu wird aus der CAD-Grundgeometrie (Abbildung 5a) das Kontaktgebiet bis in eine gewisse Tiefe ausgeschnitten (Abbildung 5b). Die so entstandene Geometrie wird automatisch vernetzt mit Vorgaben der Einteilung der Schnittflächen zur Erzeugung eines kompatiblen Übergangs ohne hängenden Knoten (Abbildung 5c, GMSH-Vernetzer /6/). Anschließend werden im ausgeschnittenen Gebiet mit einer manuell programmierten Logik Elemente hinzugefügt, die alle Knoten des Tribosimulationsnetzes beinhalten (Abbildung 5d).

Die zu diesem Netz aufgestellte FEM-Steifigkeitsmatrix wird CHOLESKY-zerlegt, und nach Aufbringen von Lagerungsbedingungen jeweils für eine Punktlast an jedem einzelnen Triboknoten gelöst. Die Laufflächenabsenkungen unter den Einheitsbelastungen werden gespeichert, so dass während der Drucklösung einfach durch Superposition der Einzelabsenkungen die Gesamtpaltverformung berechnet werden kann.



**Abbildung 5:** Schritte zur Erzeugung einer Plattenvernetzung mit vorgegebener Kontaktvernetzung

### Berechnung der Druckverteilung

Der hydrodynamische Tragdruck wird durch Lösung der REYNOLDS-Differentialgleichung /7/ bestimmt:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right)}_{\text{Druckterm}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (\rho h u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho h v)}_{\text{Geschwindigkeitsterm}} \quad (2)$$

$\partial$	partielle Ableitung	$p$	Druck
$x$	Koordinatenrichtung	$y$	Koordinatenrichtung
$\rho$	Dichte	$\eta$	dynamische Viskosität
$h$	Spalthöhe		

Die Schmierstoffeigenschaften Dichte und Viskosität hängen von Druck und Temperatur ab. Zum Nachrechnen von Prüfstandversuchen mit FVA-Referenzölen /8/ wird das Modell von BODE /9/ verwendet, da die Referenzöleigenschaften in dieser Form dokumentiert sind. Alternativ wird das mit weniger Koeffizienten auskommende Dichtemodell von DOWSON/HIGGINSON /10/ in Kombination mit dem Viskositätsmodell von ROELANDS /11/ verwendet.

Während die Viskosität an einem Knoten nur von dem lokalen Druck an diesem Knoten abhängt, ist die Spalthöhe eines Knotens aufgrund der Laufflächen-deformation von den Drücken an allen Knoten des Kontaktgebiets abhängig. Bei (für Druckkämme hohen) Belastungen, die zu der Ausbildung eines Parallelspalts führen, in welchem die Spalthöhenableitung verschwindet, führen kleinste Änderungen der Spalthöhe zu deutlichen Druckschwankungen. Eine gedämpfte Fixpunktiteration zum Abgleich von Druck und Laufflächenverformung, wie sie in /1/ für Druckkämme, bzw. gemeinhin für Gleitlager eingesetzt wird (z. B. /12/) ist dann instabil. Zur Lösung dieses Problems wird daher eine auch bei hoher Last stabile Druckverteilungsberechnung nach VENNER /13/ eingesetzt. Das für allgemeine EHD-Punktkontakte entwickelte Verfahren muss druckkammspezifisch modifiziert werden.

Beim Druckkamm sind Geschwindigkeitskomponenten  $u, v$  in beide Raumrichtungen  $x, y$  relevant, während VENNER nur Geschwindigkeitskomponenten in eine Hauptbewegungsrichtung behandelt. Beim Druckkamm wechselt die Geschwindigkeitskomponente in  $y$ -Richtung zwischen der linken und rechten Hälfte des Kontaktgebiets (Abbildung 6) das Vorzeichen. Aus numerischen Stabilitätsgründen /14/ wird der Geschwindigkeitsterm der REYNOLDS-Gleichung aufwindifferenziert, d. h. mit Differenzenquotienten, welche nicht z. B. zentral um einen Gitterpunkt herum gebildet werden, sondern lediglich mit Punkten auf der Seite, aus welcher das Fluid heranströmt. Somit ist beim Druckkamm eine Fallunterscheidung für die Differenzierungsrichtung über das Vorzeichen der  $v$ -Geschwindigkeitskomponente notwendig.

Druckverteilungen können bei Druckkämmen aufgrund der verglichen mit der Kontaktausdehnung sehr großen Ersatzradien bis zum Rand des Kontaktgebiets gehen, während bspw. bei Kugellagern die Druckentwicklung auf einer relativ zur

Kugelgröße sehr kleinen Fläche stattfindet. Um die „geometrisch bedingte Mangelschmierung“ beim Druckkamm abzubilden, müssen die korrekten Randbedingungen gesetzt werden, welche nicht nur Umgebungsdruck am Kontaktgebietrand bewirken (DIRICHLET-Randbedingung), sondern auch eine 0 betragende Druckableitung (NEUMANN-Randbedingung), während bei Kugellagern nur die DIRICHLET-Randbedingung explizit benötigt wird, da sich die verschwindende Druckableitung automatisch einstellt, wenn das Berechnungsgebiet etwas über die nicht geometrisch eingeschränkte Druckausbildung hinausgehend gelegt wird.

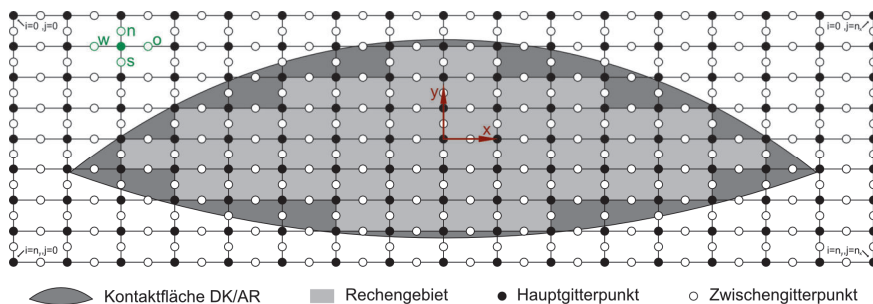
Die ausgehend von VENNER /13/ für den Druckkamm modifizierte diskretisierte REYNOLDS-Gleichung lautet dann an einem Punkt  $i, j$  des Kontaktgebiets:

$$\begin{aligned}
 L_{i,j} = & \\
 & \frac{b_{w_{i,j}} \xi_{w_{i,j}} \bar{p}_{i,j-1} - b_{i,j} (\xi_{w_{i,j}} + b_{o_{i,j}} \xi_{o_{i,j}}) \bar{p}_{i,j} + \xi_{o_{i,j}} \bar{p}_{i,j+1}}{\Delta x^2} \\
 & \text{Druckterm x-Richtung} \\
 + & \frac{b_{n_{i,j}} \xi_{n_{i,j}} \bar{p}_{i-1,j} - b_{i,j} (\xi_{n_{i,j}} + \xi_{s_{i,j}}) \bar{p}_{i,j} + b_{s_{i,j}} \xi_{s_{i,j}} \bar{p}_{i+1,j}}{\Delta y^2} \\
 & \text{Druckterm y-Richtung} \\
 - & \frac{1,5 \bar{q}_{i,j} \bar{h}_{i,j} u_{i,j} - 2 \bar{q}_{i,j-1} \bar{h}_{i,j-1} u_{i,j-1} + 0,5 \bar{q}_{i,j-2} \bar{h}_{i,j-2} u_{i,j-2}}{\Delta x} \\
 & \text{Geschwindigkeitsterm x-Richtung} \\
 - & \langle \text{sgn}(-v_{i,j}) \rangle \frac{1,5 \bar{q}_{i,j} \bar{h}_{i,j} v_{i,j} - 2 \bar{q}_{i-1,j} \bar{h}_{i-1,j} v_{i-1,j} + 0,5 \bar{q}_{i-2,j} \bar{h}_{i-2,j} v_{i-2,j}}{\Delta y} \\
 & \text{Geschwindigkeitsterm negative y-Richtung} \\
 - & \langle \text{sgn}(v_{i,j}) \rangle \frac{1,5 \bar{q}_{i,j} \bar{h}_{i,j} v_{i,j} - 2 \bar{q}_{i+2,j} \bar{h}_{i+2,j} v_{i+1,j} + 0,5 \bar{q}_{i+2,j} \bar{h}_{i+2,j} v_{i+2,j}}{\Delta y} \\
 & \text{Geschwindigkeitsterm positive y-Richtung}
 \end{aligned} \tag{3}$$

mit den Koeffizienten

$$\xi = \frac{\bar{q}^3}{\bar{\eta} \lambda} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{12 \eta_0 a_{\text{Hertz}}}{\delta_{\text{Hertz}}^2 p_{\text{Hertz}}} \tag{4}$$

$i, j$	Knotenindex	$n, o, s, w$	Indizierung des Nebengitters
$L$	Systemmatrix	$b$	Koeffizient für Randbedingung
$\xi$	Koeffizient	$\bar{p}$	dimensionsloser Druck
$\Delta x$	dimensionslose Gitterweite in x-Richtung	$\Delta y$	dimensionslose Gitterweite in y-Richtung
$\bar{q}$	dimensionslose Dichte	$\bar{h}$	dimensionslose Spalthöhe
$u$	hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit in x-Richtung	$v$	hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit in y-Richtung
$\bar{\eta}$	dimensionslose dynamische Viskosität	$\lambda$	Koeffizient
$\eta_0$	dynamische Viskosität bei Umgebungsdruck- & temperatur	$a_{\text{Hertz}}$	HERTZsche Abplattungsbreite in Umfangsrichtung
$\delta_{\text{Hertz}}$	HERTZsche Annäherung	$p_{\text{Hertz}}$	HERTZsche Pressung



**Abbildung 6: Berechnungsgitter mit staggered grid**

Der Druckterm wird mit zentralen Differenzen diskretisiert. Zur Vermeidung von Oszillationen („checkerboarding“, „odd-even decoupling“) erfolgt die numerische Lösung auf zwei versetzten Gittern (sog. „staggered grid“) /14, 15/, auf welchen die Drücke auf einem Hauptgitter und die restlichen Feldgrößen (Geschwindigkeit etc.) auf einem um eine halbe Gitterbreite versetzten Nebengitter definiert sind (Abbildung 6). Die Nebengitter-Nachbarknoten eines Hauptgitterknotens werden über die Analogie zu einer Landkarte in Draufsicht mit den Himmelsrichtungen als Nord, Ost, Süd, West bezeichnet (in Abbildung 6 grün eingezeichnet).

Die Randbedingungen werden in Gleichung 3 mit den Koeffizienten  $b$  sowie  $b_{n,o,s,w}$  umgesetzt:

$$b_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{wenn Randelement} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \tag{5}$$

$$b_{n_i,j} = \begin{cases} 2 & \text{wenn Rand südlich} \\ 0 & \text{wenn Rand nördlich} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \tag{6}$$

(analog für restliche Richtungen).

Für die DIRICHLET-Randbedingung wird weiterhin für alle Verweise auf Knoten außerhalb des Kontaktgebiets  $\xi, u, v = 0$  eingesetzt.

Die Fallunterscheidung zur Ableitung in Stromaufwärtsrichtung abhängig vom Vorzeichen von  $v$  wird in der obigen Gleichung mit FÖPPL-Klammern  $\langle \cdot \rangle$  umgesetzt:

$$\langle x \rangle = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq 0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \tag{7}$$

Aus Stabilitätsgründen wird Gleichung 3 nicht für das gesamte Kontaktgebiet auf einmal gelöst, sondern nacheinander auf einzelnen  $y$ -Koordinaten des Rechengitters, d. h. linienweise in Hauptbewegungsrichtung  $x$  (Linienrelaxation). Das Relaxations-verfahren wird weiterhin im konvergenten Spalt und im Parallelschlitz von GAUß-SEIDEL- zu distributiver JACOBI-Relaxation gewechselt /13/.



Da der Inhalt der zur Diskretisierung der Reynolds-Gleichung aufgestellten Systemmatrix nichtlinear ist (in  $\xi$  und  $\bar{h}$ ), wird das Iterationsverfahren durch eine nach dem ersten Glied abgebrochene TAYLOR-Entwicklung verbessert, wozu die JACOBI-Matrix der Systemmatrix benötigt wird /13/.

Die JACOBI-Matrix wird hier nicht zur Berücksichtigung aller Einflüsse aufgestellt, sondern lediglich, um die nicht-lokalen Einflüsse in Form der Spalthöhenänderung abzubilden. Die Viskositäts- und Dichteänderung aufgrund der Druckänderung an einem bestimmten Netzknoten sind rein lokal, da sie nur an diesem Knoten Auswirkungen haben. Die Spalthöhenänderung aufgrund der Druckänderung an einem bestimmten Netzknoten hat theoretisch Auswirkungen im kompletten Kontaktgebiet, praktisch sind jedoch nur die Auswirkungen in der Nähe für die Lösungsstabilität relevant, weshalb die JACOBI-Matrix für sie begrenzt als Bandmatrix erstellt wird.

Die JACOBI-Matrix von VENNER /13/ muss druckkammspezifisch neu abgeleitet werden für die Geschwindigkeitskomponenten und Randbedingungen, und zusätzlich druckkammunspezifisch zur Berücksichtigung von unsymmetrischen Nachgiebigkeiten, was für biegsame Platten aus FEM-Modellen anstelle von Halbraumlösungen benötigt wird.

Als Startlösung für die Spalthöhenverteilung wird die Deformation im trockenen Kontakt ohne Fluiddruck zuzüglich einer kleinen minimalen Spalthöhe angenommen. Der trockene Kontakt stellt ein lineares Komplementaritätsproblem dar, welches mit dem LEMKE-Algorithmus /16, 17/ gelöst werden kann.

Nach einem Druckrelaxationssweep werden die Temperaturverteilung (folgender Abschnitt), die Viskosität und Dichte, und die Spalthöhenverteilung sowie die Starrkörperannäherung zum Erreichen einer geforderten Tragkraft aktualisiert (Abbildung 3). Diese Iterationsschleife wird durchgeführt, bis die Änderungen in einem Durchlauf unter eine bestimmte Grenze fallen.

Die Lösung der Feldgrößen erfolgt in einem Mehrgitterverfahren (Multigrid), d. h. beginnend auf einem schnell lösbaaren, sehr groben und endend auf einem feinen Netz mit verwertbarem Diskretisierungsfehler. Zwischen den Netzen werden die Feldgrößen interpoliert.

### Berechnung der Temperaturverteilung

Im Schmierstoff wird aufgrund von Scherung und Kompression Wärme generiert und über Stofftransport und Leitung in die Laufflächen abgeführt. Neben den fluidmechanischen Beiträgen können über ein Kugel-Kappen-Modell nach GREENWOOD-WILLIAMSON /18/ Reibleistungsanteile aufgrund von Festkörperkontakt im Mischreibungsbereich berücksichtigt werden (Implementation angelehnt an /19/, detaillierte Beschreibung in /1/).

Dies Temperaturverteilung kann durch Lösung der Energiedifferentialgleichung berechnet werden (z. B. /20/):

$$\underbrace{c_F \rho_F \left( u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right)}_{\text{Konvektionsterm}} - \underbrace{\lambda_F \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right)}_{\text{Konduktionsterm}} = \underbrace{\psi}_{\text{zugeführte Reibleistung}} - \underbrace{(q_{DK} + q_{AR})}_{\text{Wärmestrom in Laufflächen}} \quad (8)$$

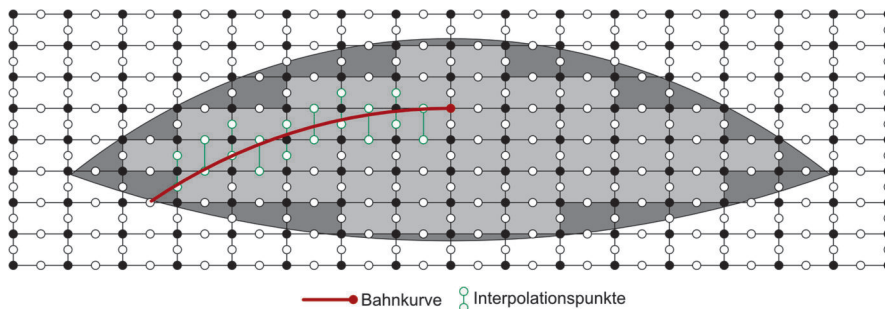
$c_F$	spezifische Wärmekapazität, Fluids	$\vartheta$	Temperatur
$\lambda_F$	Wärmeleitfähigkeit des Fluids	$\psi$	lokal zugeführte Reibleistung
$q_{DK/AR}$	Wärmestrom in Laufflächen		

Die Energiedifferentialgleichung wird auf einem zweidimensionalen Rechengebiet gelöst, da die Wärmekonvektion im Fluid in Spalthöhenrichtung vernachlässigbar klein ist. Es wird nach SALEHIZADEH und SAKA /21/ von einer parabolischen Temperaturverteilung über der Spalthöhe ausgegangen. Die Treffsicherheit dieser verbreiteten Vereinfachung kann durch den Vergleich mit kompletten dreidimensionalen Berechnungen, z. B. in /22/, bestätigt werden. Der Wärmestrom in die Laufflächen kann dann durch Differenzieren des Temperaturverlaufs bestimmt werden /19/.

Die Laufflächenblitztemperaturen werden mit der Lösung für eine über eine unendliche Wärmesenke bewegten punktförmigen Wärmequelle nach JAEGER /23/ bestimmt, wobei analog zur Halbraum-Laufflächendeformation ein Fehler durch den nah liegenden Rand des Körpers entsteht.

Ein Punkt auf der Druckkammlauffläche bewegt sich auf einer Kreisbahn durch das kartesisch vernetzte Rechengebiet. Die Bahnkurve eines Gitterpunkts trifft somit nur in Sonderfällen exakt andere Knoten. Im Regelfall verläuft die Bahnkurve zwischen den anderen Knoten. Daher wird zur Bestimmung der zurückliegenden Wärmeeinträge eines Punktes linear zwischen jeweils zwei Nebengitterknoten interpoliert, zwischen denen die Trajektorie hindurch verläuft (Abbildung 7).

Das Gleichgewicht zwischen Fluid- und Laufflächentemperatur wird in einer gedämpften Fixpunktiteration gefunden.

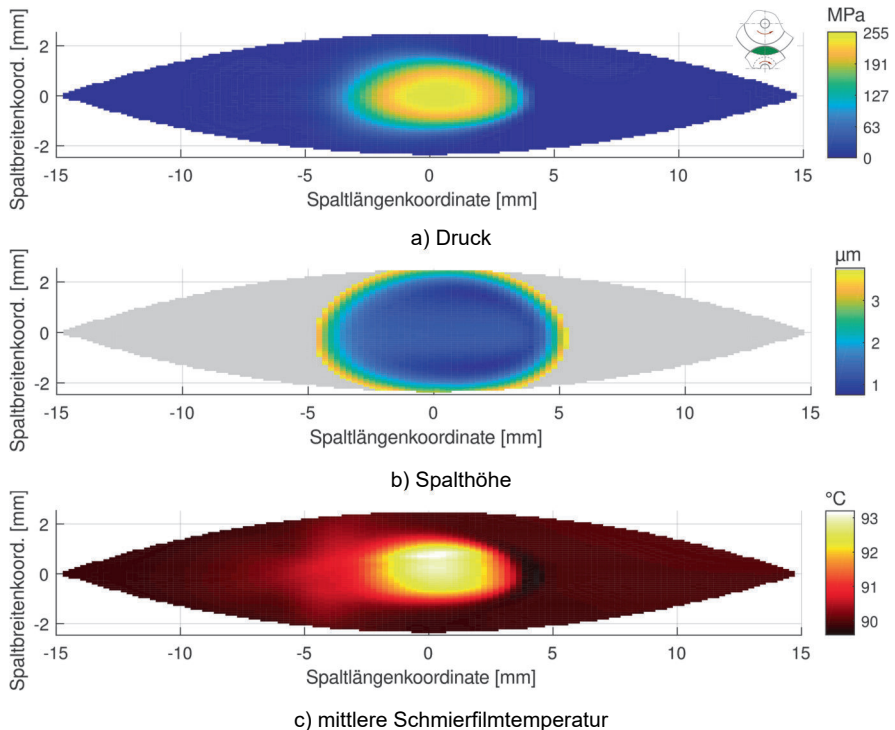


**Abbildung 7:** Laufflächentemperaturberechnung über Interpolation von Trajektorien

## Berechnungsbeispiel

Beispielhaft wird ein Druckkamm mit den in Tabelle 1 angegebenen Daten simuliert. Die Feldgrößenverteilungen sind in Abbildung 8 dargestellt.

Es stellt sich ein von anderen EHD-Kontakten bekannter Parallelspalt mit huftisenförmiger Umrandung ein (Abbildung 8b). Zur besseren Darstellung ist die Spalthöhenverteilung ab einer gewissen Höhe abgeschnitten (grau gefärbt). Der Temperaturanstieg ist bei moderaten Drehzahlen sehr gering, da der Druckkamm in seiner Lage nah am Verzahnungswälzkreis einen geringen Schlupf aufweist und somit wenig temperaturerhöhende Reibleistung bewirkt.



**Abbildung 8:** Feldgrößen Darstellungen Berechnungsbeispiel

**Tabelle 1:** Daten Berechnungsbeispiel

Druckkammdrehzahl	2250 min <sup>-1</sup>	Übersetzungsverhältnis	1,5	Axialkraft	3,6 kN
Druckkammaußen- $\varnothing$	100 mm	Druckkamminnen- $\varnothing$	30 mm	Plattendicke DK	14 mm
Anlaufingaußen- $\varnothing$	99 mm	Anlaufinginnen- $\varnothing$	40 mm	Plattendicke AR	14 mm
Überdeckung	5 mm	Kegelwinkel	1°	Bombierradius	500 mm
Achsabstand	91,5 mm	Schmierstoff	FVA 3A /8/ ( $\nu_{40^\circ\text{C}}=100 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-2}$ ) @ 90 °C		

## Fazit

Die Weiterentwicklung des Tribosolvers aus /1/ erlaubt es, Betriebssituationen mit deutlich höheren spezifischen Belastungen als bis her zu untersuchen, was zu effizienteren Auslegungen führen kann, und Druckkämme in sehr schnell laufenden Turbogetrieben mit entsprechender Temperaturentwicklung zu berechnen. Gegenüber dem von anderen Maschinenelementen bzw. Standardkontakten (Kugel, Zylinder) bekannten Solvern sind einige druckkammspezifische Anpassungen notwendig.

## Literatur

- /1/ Heß, M.: Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnten Getrieben, Dissertation TU Clausthal, 2018
- /2/ Neumann, M.; Heinrich, C. & Lohrengel, A.: TurboGetEff: Effizienzsteigerung eines Turboantriebsstrangs unter Einsatz von Druckkämmen. In: Tagungsband zur 64. Tribologie-Fachtagung, Gesellschaft für Tribologie e.V. (2023), S. 72/1-72/11
- /3/ Boussinesq, J.: Applications des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris: Gauthier-Villars, 1885
- /4/ Johnson, K. L.: Contact Mechanics: Cambridge University Press, 1987
- /5/ Heinrich, C.: Druckkammsimulation unter Berücksichtigung der Platten- und Wellensteifigkeit. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. KT2019 (2019), S. 126–137
- /6/ Geuzaine, C. & Remacle, J.-F.: Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. In: International journal for numerical methods in engineering Bd. 79, Wiley Online Library (2009), Nr. 11, S. 1309–1331
- /7/ Reynolds, O.: On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Royal Society Bd. 177 (1886), S. 157–234
- /8/ Laukotka, E.: Referenzöle (FVA-Heft Nr. 660) : Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2003
- /9/ Bode, B.: Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens von Flüssigkeiten unter hohem Druck. In: Tribologie und Schmierungstechnik Bd. 36 (1989), Nr. 4, S. 182–189
- /10/ Dowson, D. & Higginson, G. R.: Elasto-hydrodynamic lubrication. Oxford; New York: Pergamon Press, 1977
- /11/ Roelands, C. J. A.: Correlational aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils, Dissertation TH Delft, 1966

- /12/ Vetter, D.; Hagemann, T. & Schwarze, H.: The Impact of Thermal Load and Turbulent Flow on Minimum Film Thickness of a Large Tilting-Pad Journal Bearing. In: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* Bd. 146 (2023), S. 011007/1-011007/10
- /13/ Venner, C. H. & Lubrecht, A. A.: *Multilevel methods in lubrication*, Tribology series. Amsterdam; New York: Elsevier, 2000
- /14/ Ferziger, J. H. & Peric, M.: *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- /15/ Harlow, F. H. & Welch, J. E.: Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface. In: *The Physics of Fluids* Bd. 8 (1965), Nr. 12, S. 2182–2189
- /16/ Lemke, C. E. & Howson, Jr., J. T.: Equilibrium Points of Bimatrix Games. In: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* Bd. 12, Society for Industrial and Applied Mathematics (1964), Nr. 2, S. 413–423
- /17/ Lemke, C. E.: Bimatrix Equilibrium Points and Mathematical Programming. In: *Management Science* Bd. 11 (1965), Nr. 7, S. 681–689
- /18/ Greenwood, J. A. & Williamson, J. B. P.: Contact of Nominally Flat Surfaces. In: *Proceedings of the Royal Society of London (A)* Bd. 295 (1966), S. 300–319
- /19/ Wiersch, P.: *Berechnung thermo-elastohydrodynamischer Kontakte bei Mischreibung*, Dissertation TU Clausthal, 2005
- /20/ Bartel, D.: *Simulation von Tribosystemen: Grundlagen und Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010
- /21/ Salehizadeh, H. & Saka, N.: Thermal Non-Newtonian Elastohydrodynamic Lubrication of Rolling Line Contacts. In: *Journal of Tribology* Bd. 113 (1991), Nr. 3, S. 481–491
- /22/ Kim, K.-H. & Sadeghi, F.: Three-Dimensional Temperature Distribution in EHD Lubrication: Part II—Point Contact and Numerical Formulation. In: *Journal of Tribology* Bd. 115 (1993), Nr. 1, S. 36–45
- /23/ Jaeger, J. C.: Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts. In: *Journal and proceedings of the Royal Society of New South Wales* Bd. 76 (1943), Nr. 3, S. 203–224

## Torsionssteifigkeit Balgkupplung

Schäfer, G.

*Für eine genaue Mehrkörpersimulation von Antriebssträngen in denen Kupplungen verbaut sind, ist u. a. die Kenntnis der Kupplungstorsionssteifigkeiten unerlässlich. Speziell im Bereich kleiner Metallbalgkupplungen, wie sie für die Sensorankopplung genutzt werden, sind bei vergleichbaren Baugrößen zwischen den verschiedenen Anbietern deutliche Unterschiede in den Kennwerten zu finden. Dies ist der Ausgangspunkt für experimentelle und numerische Untersuchungen.*



*Torsional stiffness is a key-parameter for multi body simulation of drive trains. The given values, especially for small couplings, in the catalogs of different suppliers are very unequal for the same design size. That's the starting point for experimental and numerical investigations.*

### Einleitung

Metallbalgkupplungen, als Elemente der Antriebstechnik, dienen der Übertragung von Drehmomenten und Drehbewegungen zwischen zwei Wellen. Gemäß der Klassifizierung nach VDI 2240 [1] gehören sie zu den nichtschaltbaren, ausgleichenden, drehsteifen Kupplungen. An dieser Stelle könnte der Beitrag auch schon kurz zum Ende kommen, aber natürlich haben auch drehsteife Kupplungen eine endliche Torsionssteifigkeit. Speziell bei der Auslegung hochdynamischer Antriebe gehört die Mehrkörpersimulation (MKS) oder auch eine klassische Feder-Masse-Kopplung zu den üblichen Werkzeugen. Dabei ist die Torsionssteifigkeit einer solchen Balgkupplung ein ganz wesentlicher Parameter, egal ob die Kupplung zur Drehmomentübertragung im Leistungsstrang oder „einfach nur“ zur Drehbewegungsübertragung an Sensoren dient. Fehlerhafte Steifigkeitswerte würden auch im zweiten Fall zur falschen Reglerauslegung, mit der Folge einer Instabilität, führen. Die vorgenannten Gründe machen deutlich, wie wichtig verlässliche Angaben zur Torsionssteifigkeit von Kupplungen sind. In DIN 740-2 [2] findet sich dazu aber lediglich der klassische mechanische Ansatz

$$C_T = \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad (1)$$

sowie der Hinweis, dass zwischen statischer und dynamischer Torsionssteifigkeit zu unterscheiden ist. Dies ist besonders wichtig bei gummielastischen Kupplungen. Bei Kupplungen mit metallischem elastischem Bereich, wie es hier der Fall ist, wirken

sich lediglich die vorhandenen Massenträgheiten signifikant darauf aus. Üblicherweise wird daher bei den Metallbalgkupplungen, deren Metallbalg häufig aus Edelstahl (1.4571) ausgeführt wird, für die Flanschenden Aluminium verwendet.

Trotz der hohen Bedeutung der Kupplungssteifigkeit fanden sich bei einer Literaturrecherche keine schlüssigen Ansätze für die Berechnung der Torsionssteifigkeit des charakteristischen Wellenbalges. Neben der Anwendung in der Antriebstechnik, sind diese Wellenbälge sehr verbreitet in der Verfahrenstechnik und allgemein im Rohrleitungsbau. Dort ist aber lediglich das Ausgleichsverhalten in axialer, lateraler und (biege-)winkeltiger Richtung entscheidend, was auch in den antriebstechnischen Anwendungen zählt. Die Informationsdichte zu den betreffenden Kennwerten und Berechnungsansätzen inklusive Festigkeitsbetrachtungen ist in der Literatur, z.B. /3/, dazu auch entsprechend hoch.

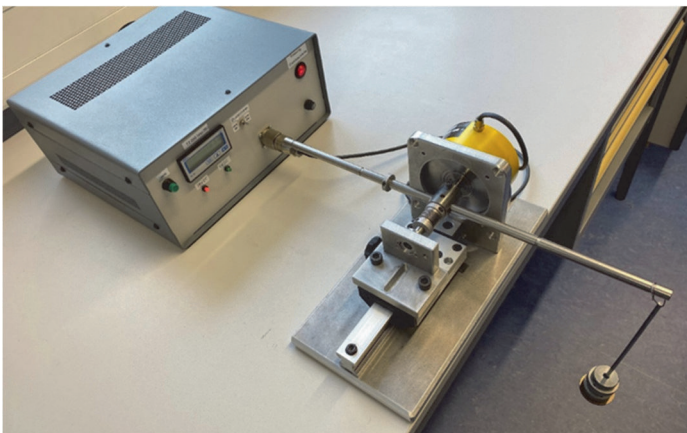
### Fragestellung

Aufgrund der teilweise mangelnden Informationslage zu Berechnungsansätzen für die Torsionssteifigkeit von Wellbälgen und den andererseits stark streuenden Herstellerangaben, wurden am IMW im Rahmen einer Forschungsarbeit /4/ u.a. numerische Untersuchungen zu dieser Fragestellung unternommen. Als Beispiel soll hier eine Metallbalgkupplung mit folgenden Kenndaten betrachtet werden:

Balgaußendurchmesser 19 mm, Balginnendurchmesser 12 mm,

Kupplungslänge 29 mm, Balgwerkstoff Edelstahl (1.4571)

Betrachtet man die verfügbaren Herstellerangaben, so schwanken die Torsionssteifigkeiten zwischen 140 und 750 Nm/rad. Die um mehr als den Faktor 5 variierenden Kennwerte für die vergleichbare Baugröße, lassen eine sinnvolle dynamische Auslegung eines Antriebsstrangs nicht zu.



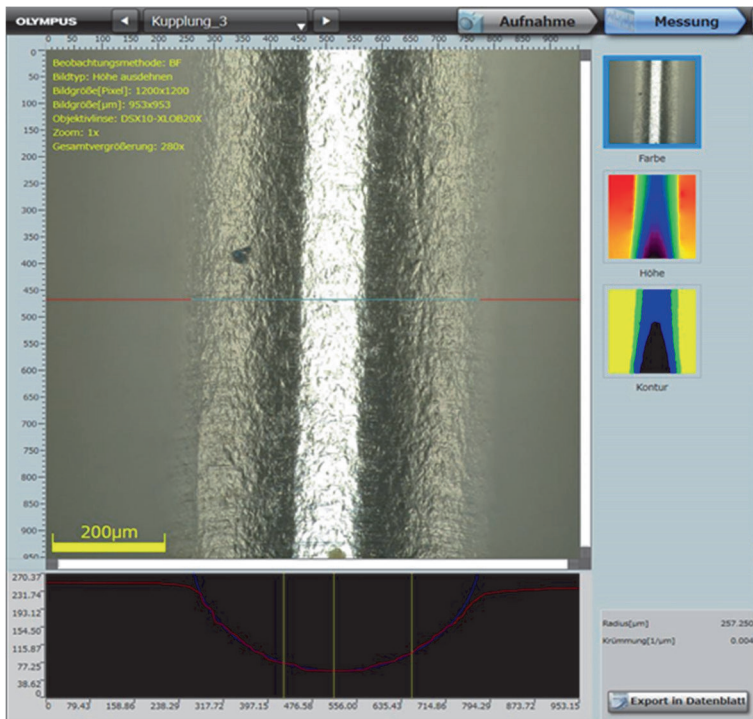
**Abbildung 1:** Messaufbau zur experimentellen Bestimmung der Torsionssteifigkeit einer Kupplung



Der Kleinstwert von 140 Nm/rad konnte mit dem in Abbildung 1 zu sehenden Prüfaufbau nachvollzogen werden. Des Weiteren konnten damit vergleichbare Steifigkeiten auch für die anderen Herstellermuster ermittelt werden. Damit bleibt die Frage nach den ca. 5-fachen Angaben offen. Für die Klärung wurde ein numerischer Ansatz gewählt.

## Numerische Untersuchungen

Für die numerischen Untersuchungen musste zunächst ein passendes Modell erstellt werden. Dazu waren, neben den zuvor genannten Hauptabmessungen und der auszählbaren Wellenzahl, weitere Geometriedetails wie Rundungsradien in der Wellenstruktur an der Kupplung zu messen. Für die Messung der Radien wurde das am Institut vorhandene Olympus Messmikroskop genutzt, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 2:** Unterer äußerer Balgkrümmungsradius

Die Balgwanddicke konnte auf Nachfrage vom Hersteller mit 0,1 mm geklärt werden. Der Balg wurde daher als Schalenmodell aufgebaut, was den numerischen Aufwand gegenüber einem Volumenmodell bereits reduziert. Eine Vergleichsrechnung mit einem Volumenmodell konnte übereinstimmend durchgeführt werden. Für die





Auf Basis von Gleichung 1 kann damit eine Torsionssteifigkeit von 296 Nm/rad berechnet werden. Vergleicht man diese mit der gemessenen Herstellerangabe von 140 Nm/rad, so bleiben Fragen offen, ebenso beim Vergleich mit den weiteren Katalogangaben von 700 und 750 Nm/rad. Eine nahe bei 300 Nm/rad liegende Kennwertangabe für diese Baugröße konnte in Herstellerangaben nicht gefunden werden. Da eine am realen Objekt durchgeführte Messung prinzipiell hohes Vertrauen genießt, wurde der Messaufbau nochmals unter die Lupe genommen. Dies macht vor dem Hintergrund der umformtechnischen Herstellung der Balgstruktur soweit Sinn, dass etwaige Wanddickenveränderungen durch den Umformprozess in der numerischen Simulation wegen mangelnder lokaler Dickeninformationen nicht berücksichtigt sind. Zu diesem Zeitpunkt der Untersuchung gibt es also auf beiden Wegen noch Unschärfen. Für den Einfluss des Prüfaufbaus wurde daher die Idee einer Referenzmessung eines analytisch einfach zu bestimmenden Kupplungsdummys geboren.

### Einfluss des Prüfaufbaus

Die bisherige Annahme bei der experimentellen Bestimmung der Torsionssteifigkeit geht von einer unendlichen Steifigkeit des Prüfaufbaus aus. Stellt man dies in Frage, so ergibt sich aus der zu messenden Kupplung und dem Prüfaufbau eine Reihenschaltung von Torsionsfedern, siehe Gleichung 2. Für die Referenzmessung wurde nun ein Kupplungsdummy als Vollwelle mit der Kupplungshüllgeometrie erzeugt. Die Torsionssteifigkeit dieses Vollwellenabschnitts kann analytisch zu 46.500 Nm/rad berechnet werden. Die mit diesem Dummy in dem Messaufbau aus Abbildung 1 durchgeführte Messung ergab eine gemessene Torsionssteifigkeit von 1145,92 Nm/rad.

$$\frac{1}{C_{Mess}} = \frac{1}{C_{Aufbau}} + \frac{1}{C_{Kupplung}} \quad (2)$$

Aus der Messung mit Einbau eines bekannten Dummys, anstelle der zu messenden Kupplung ( $C_{Kupplung} = C_{Dummy}$ ), kann die Torsionssteifigkeit des Messaufbaus aus Abbildung 1 nach Gleichung 3 berechnet werden.

$$C_{Aufbau} = \frac{1}{\frac{1}{C_{Mess}} - \frac{1}{C_{Dummy}}} \quad (3)$$

Setzt man die beiden Daten (Referenzmessung (1.145,92 Nm/rad), Vollwellendummy (46.500,61 Nm/rad)) in Gleichung 3 ein, so erhält man für den Messaufbau eine Torsionssteifigkeit von  $C_{Aufbau} = 1174,87$  Nm/rad. Mit dieser Kenntnis kann Gleichung 2 nach  $C_{Kupplung}$  wie folgt aufgelöst werden:

$$C_{Kupplung} = \frac{1}{\frac{1}{C_{Mess}} - \frac{1}{C_{Aufbau}}} \quad (4)$$

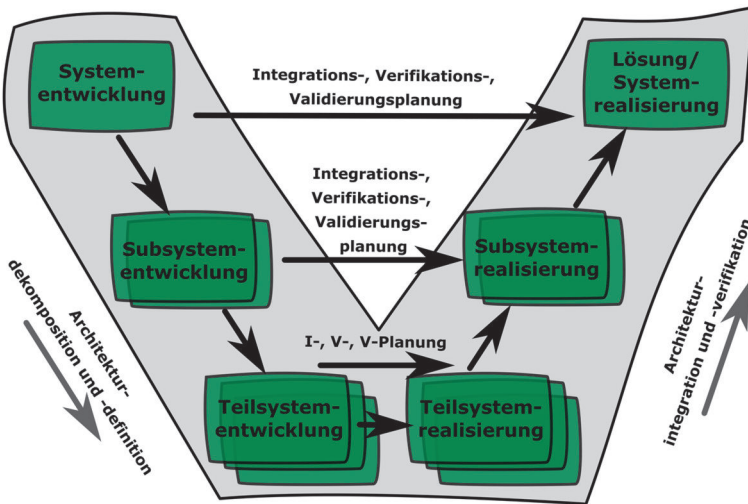
Für die bislang an der Kupplung gemessene Torsionssteifigkeit von  $C_{Mess} = 140 \text{ Nm/rad}$  kann damit die tatsächliche Torsionssteifigkeit der Kupplung zu  $C_{Kupplung} = 158,94 \text{ Nm/rad}$  berechnet werden. Für die weiterhin noch offene Diskrepanz von ca. 160 Nm/rad zu den numerischen 300 Nm/rad müssten weitere Untersuchungen der Wellbalggestalt durchgeführt werden, es könnten auch noch ein paar weitere Referenzmessungen mit ebenfalls einfachen, analytisch sauber berechenbaren und der Kupplungssteifigkeit näher liegenden Dummy-Geometrien durchgeführt werden, um die Steifigkeit des Messaufbaus zu verifizieren. Ebenso könnten weitere Untersuchungen zur Differenzierung von statischen und dynamischen Torsionssteifigkeiten speziell bei den Metallkupplungen durchgeführt werden um das Wesen der „drehsteifen“ Kupplung besser zu verstehen. Deutlich geworden ist aber, dass Katalogangaben im Bereich von 700 Nm/rad bei der untersuchten Kupplungsgröße für eine genaue Antriebsstrangsimulation skeptisch betrachtet werden können.

## Zusammenfassung

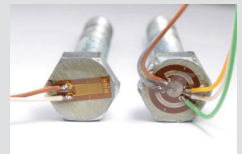
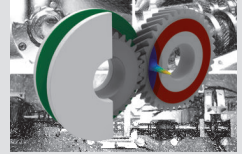
Mit den messtechnischen und numerischen Untersuchungen zur Torsionssteifigkeit von kleinen Metallbalgkupplungen konnte eine erste Klärung zu den verwirrend weit streuenden Katalogangaben erreicht werden. Zugleich wurden Optimierungspotentiale in der messtechnischen Erfassung der Torsionssteifigkeit aufgezeigt.

## Literatur

- /1/ VDI-Richtlinie 2240: Wellenkupplungen – Systematische Einteilung nach ihren Eigenschaften (06/1971)
- /2/ DIN 740 Teil 2: Nachgiebige Wellenkupplungen: Begriffe und Berechnungsgrundlagen (08/1986)
- /3/ Witzenmann GmbH: Das Handbuch der Metallbälge. Stand: Februar 2019. [Online] Verfügbar unter: <https://www.witzenmann.de/mediapool/documents/brochures/das-handbuch-der-metallb%C3%A4lge.pdf>
- /4/ Vo Dan, K. T.: Numerische Simulation der Drehfedersteifigkeit von Metallbalgkupplungen. Forschungsarbeit (unveröffentlicht), TU Clausthal, 2023



## Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung





## Agile Arbeitsweisen in der Institutsarbeit

Ammersdörfer, T.; Kuper, S.; Inkermann, D.

*Agile Arbeitsweisen und strukturierte Reflexion sollen dazu beitragen die Teamkultur weiterzuentwickeln, die Zusammenarbeit effizienter zu gestalten und die anstehenden Arbeiten effektiver zu planen. In diesem Beitrag wird ein Workshop-vorgehen zur Vermittlung agiler Arbeitspraktiken und Teamkultur sowie die tragende Rolle der Retrospektive in der agilen Arbeitswelt vorgestellt. Ausgehend hiervon werden Ansätze und Herausforderungen zur Förderung agiler Arbeitsweisen in der Institutsarbeit diskutiert.*



*Agile working methods and structured reflection should help to further develop the team culture, make collaboration more efficient and plan upcoming work more effectively. This article presents a workshop approach for teaching agile working practices and team culture as well as the key role of the retrospective in the agile working environment. Based on this, approaches, and challenges for promoting agile working methods in the institute's work are discussed.*

### Einleitung und Problemstellung

In der Institutsarbeit fallen häufig in unterschiedlichen Bereichen (z. B. Lehre, Forschung, Organisation, Selbstverwaltung, Buchhaltung, Marketing) Arbeiten an, die nicht nur von Fachkräften, sondern auch von Wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen fachübergreifend übernommen werden. Besonders im Aufbau eines Lehrstuhls sind Aufgaben durch Volatilität und Mitarbeitermangel geprägt, sodass Führungskräfte und Mitarbeiter:innen angehalten sind flexibel zu agieren, komplexe Aufgabenstellungen zu lösen und effizient im Team zusammenzuarbeiten, um gemeinsam den Lehrstuhl und den Forschungsschwerpunkt zu etablieren. Auch der von David Inkermann geführte Lehrstuhl Integrierte Produktentwicklung (IPE) am Institut für Maschinenwesen (IMW) befindet sich derzeit im Aufbau und in der Gestaltungsphase der Schwerpunkte in Lehre und Forschung. Um auf die Aufgabenvielfalt zu reagieren und eine Teamkultur zu entwickeln, werden agile Arbeitspraktiken (z. B. Sprintplanung, tägliche kurze Meetings, regelmäßige Teammeetings, agile Retrospektiven), die ursprünglich aus der Softwareentwicklung stammen /1/, schrittweise eingeführt. Dazu werden agile Praktiken und Teamkultur mit der Unterstützung eines Agilen Coaches eingeführt. Erste Erkenntnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt.

## Hintergrund und Zielsetzung

Agile Methoden und Arbeitsweisen wirken sich positiv auf die Produktivität der Teams aus, berücksichtigen Veränderungen und fördern das schnelle, iterative Zusammenarbeiten in Entwicklungszyklen. Jedoch haben die meisten Organisationen in der Produktentwicklung Schwierigkeiten agile Arbeitsweisen vollständig umzusetzen, da Entwicklungsprojekte oft zu komplex sind, um sie in einem umfassenden Plan zu erfassen /2/. Daher werden häufig nur Teile agiler Rahmenwerke und Arbeitsweisen eingeführt und mit alten Strukturen und Vorgehensweisen verknüpft. Damit möchte auch das IPE-Team starten und bestehende Strukturen und Kulturen durch agile Organisationsstrukturen (nicht-hierarchisches System von Betriebsabläufen, schnelle Aktivitätszyklen beim Lernen und bei der Entscheidungsfindung /3/) ergänzen. In der Institutsarbeit stehen Mitarbeiter:innen oft vor den Herausforderungen, dass die Aufgabenvielfalt und die Anzahl an Aufgaben eine Unübersichtlichkeit hervorruft, die Aufgaben-Priorisierung dadurch schwer fällt und oft Anforderungen an die Arbeitspakete unvollständige oder unklare sind. Daher liegen die Anforderungen bei der Einführung agiler Arbeitspraktiken am Lehrstuhl IPE darin, Arbeitspakete klar zu strukturieren und vollständig zu definieren, offen und zu kommunizieren und Transparenz in der Aufgabenvielfalt zu generieren. Daher ist das Ziel des Beitrags für die Institutsarbeit, das Wissen zu agilen Arbeitsweisen und zur Teamkultur zu vermitteln und mit Hilfe agiler Ansätze Aufgaben effektiver und transparenter zu planen und die Zusammenarbeit effizienter zu gestalten. Des Weiteren zielt der Beitrag darauf ab, die Rolle der Retrospektive zu analysieren und Ansätze zur Einbindung von Retrospektiven in der Institutsarbeit vorzustellen. In diesem Beitrag werden ersten Schritt die Grundlagen der agilen Entwicklung und deren Prinzipien erläutert und Methoden und Hilfsmittel für agile Arbeitsweisen in der Institutsarbeit aufgezeigt. Des Weiteren wird ein Workshopformat mit Lego® Serious Play® zur Einführung von Agilität und Teamkultur vorgestellt, das am Lehrstuhl IPE bereits durchgeführt wurde. Des Weiteren wird analysiert, welche Rolle die Retrospektive in der agilen Arbeitswelt hat und wie Retrospektiven und Feedback in die tägliche Institutsarbeit integriert werden kann.

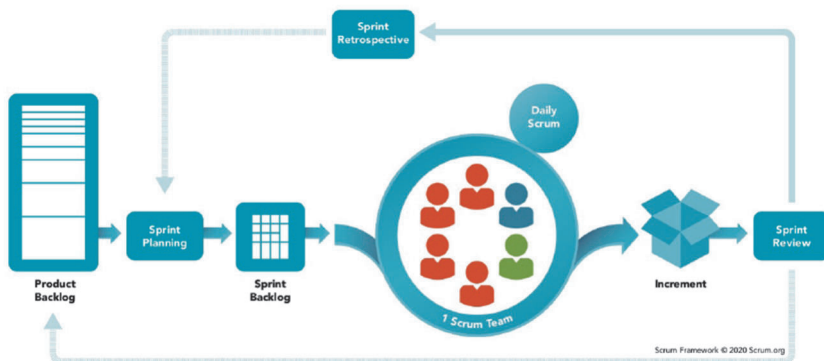
## Rahmenwerk und Prinzipien der agilen Entwicklung

Um den Herausforderungen, wie beispielsweise unklar formulierten Anforderungen oder chaotischen Arbeitsweisen, in der Produktentwicklung entgegenzuwirken, haben einige Entwickler im Jahr 2001 ein Agiles Manifest mit vier Leitsätzen und zwölf zugehörigen Prinzipien veröffentlicht, um den Sinn und Zweck von Agilität zu verdeutlichen /4,5/.

Die vier Leitsätze in Anlehnung an /4,5/ lauten sinngemäß:

- Individuen und Interaktion werten wir höher als Prozesse und Werkzeuge
- Funktionierende Software werten wir höher als umfassende Dokumentationen
- Zusammenarbeit mit dem Kunden werten wir höher als Vertragsverhandlungen
- Reagieren auf Veränderung werten wir höher als das Befolgen eines Plans

Agile Rahmenwerke und Vorgehensweisen bauen auf diesen Leitsätzen auf, als konkrete Umsetzungshilfe in einem Arbeitsprozess sind diese jedoch eher weniger geeignet /5/. Vielmehr orientieren sich die Rahmenwerke in der Umsetzung an den zwölf agilen Prinzipien /4/. So lassen sich gemeinsame Grundgedanken agiler Rahmenwerke durch die einzelnen Prinzipien ableiten. Eine frühe und kontinuierliche Auslieferung von Arbeitsergebnissen in Zyklen von wenigen Wochen bis wenigen Monaten (bevorzugt kürzere Zyklen) von funktionierender Software lässt sich aus den Prinzipien Nr. 1 und Nr. 3 herleiten. Ebenfalls wird dem Reflektieren der Zusammenarbeit des Teams mit dem Prinzip Nr. 12 ein hoher Stellenwert beigemessen /6/. Die agile Methode Scrum ist eines der Rahmenwerke, welches aus den Leitsätzen, Werten und Prinzipien abgeleitet wurde und ist mittlerweile sehr verbreitet (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Übersicht zum Scrum Rahmenwerk in Anlehnung an /7/

Es folgt der Logik, sich der Komplexität eines Vorhabens, bspw. bei der Neuentwicklung einer Software, schrittweise zu nähern, in dem in sogenannten Sprints, also kurzen Entwicklungszyklen, die Software, Schritt für Schritt zu

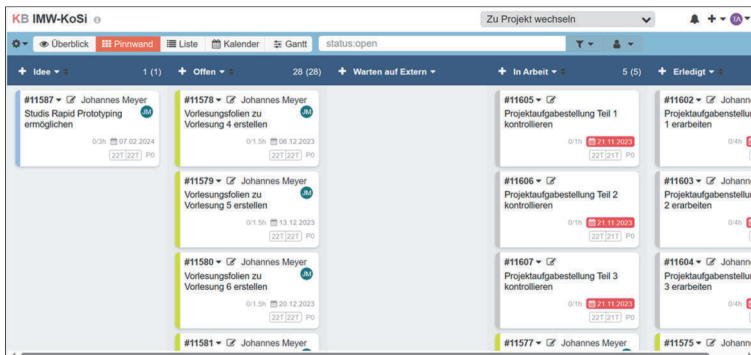


entwickeln. Wesentliche Erfolgsfaktoren für das Vorgehen nach Scrum sind die intensive Kommunikation zwischen den klar verteilten Rollen des Scrum Teams und das respektvolle Mindset. Das Scrum Team besteht dabei aus unterschiedlichen Rollen, die jeweils einen anderen Bereich der Entwicklung verantworten. So ist der Product Owner für die Planung und Priorisierung der Produktausrichtung und Produktentwicklung sowie für finanzielle Aspekte verantwortlich. Das Entwicklungsteam ist selbstorganisiert dafür verantwortlich die Arbeitsmenge je Sprint zu wählen und das Produkt zu liefern. Der Scrum Master hilft dem Team und der Organisation dabei, den Scrum Prozess zu verstehen und stößt Veränderungen an. Außerdem löst er Probleme, die das Team daran hindern, ihre Arbeit zu erledigen. Die Agilität und Scrum als Rahmenwerk haben ihren Ursprung zwar in der Softwareentwicklung, die Prinzipien und Werte sind jedoch universell anwendbar und können einen Mehrwert in sehr unterschiedliche Branchen liefern /8/. Dies wird durch die Studie „Status Quo Agile“ untermauert, in der deutlich wird, dass die Anwendung agiler Ansätze keinen besonderen IT-Bezug mehr benötigen. Agile Rahmenwerke oder hybride Formen werden demnach beispielsweise auch in den Bereichen Produktentwicklung mechatronischer Systeme, Maschinenbau, Marketing, Strategie- oder Organisationsentwicklung genutzt /9/.

### Methoden und Hilfsmittel für agile Arbeitsweisen in der Institutsarbeit

Um die Vielfalt an Arbeitspaketen in der Institutsarbeit zu strukturieren und effizient zu planen, kann Scrum als Rahmenwerk verwendet werden. In der Institutsarbeit hat der Lehrstuhl IPE sich vorerst dazu entschieden, sich mit einigen Hilfsmitteln den agilen Arbeitsweisen anzunähern. Dazu soll für zwei Beispielprojekte „Agile Systems Engineering Simulator“ und der Lehrveranstaltung „Konstruktion und Simulation mit 3D-CAD“ im ersten Schritt jeweils ein Product Owner definiert und anschließend ein Product Backlog (priorisierte Liste an Aufgaben und Funktionen des Produkts oder Projekts) erstellt werden. Parallel dazu werden mit allen Mitarbeiter:innen und der Führungskraft Einzelgespräche mit einem Agilen Coach geführt, die dazu dienen sollen den Ist-Stand, die Bedürfnisse und die Ideen der einzelnen Teammitglieder zu sammeln. Die Mitarbeiter:innen erhalten durch den Coach ein Product Owner Coaching und werden für die Erstellung eines Product Backlogs zu den beiden genannten Projektbeispielen vorbereitet. Als Hilfsmittel zur Dokumentation des Product Backlogs wird die Kanban-Software der TU Clausthal bereitgestellt und zur Erfassung der Daten ein Kanban-Board (siehe Abbildung 2) genutzt.

Demnach befindet sich das IPE-Team derzeit in der Startphase der Einführung agiler Arbeitsweisen und testet, die für die Institutsarbeit effizientesten Tools. Um Verbesserungen zu identifizieren und die bestmögliche Unterstützung agiler Arbeitspraktiken zu erhalten, werden regelmäßige Retrospektiven durchgeführt, deren Rolle im Kontext der Agilität im nächsten Abschnitt näher erläutert werden.



**Abbildung 2:** Exemplarische Darstellung des Kanban-Boards für die Lehrveranstaltung Konstruktion und Simulation mit 3D-CAD

## LEGO®-Workshop zum agilen Arbeiten und Teamkultur am IMW

Um als Team gemeinsam darüber nachzudenken, wie eine agile Zusammenarbeit und Teamkultur in der Institutsarbeit aussehen, bzw. welche Elemente aus der Welt der agilen Tools und Rahmenwerke einen Mehrwert für das Institut bringen könnten, wurde ein Tagesworkshop am Lehrstuhl IPE durchgeführt. An dem Workshop nahmen 7 Personen aus unterschiedlichen Bereichen teil. Vorbereitet und geleitet wurde der Workshop durch einen externen Agile Coach. Als Methode wurde ein Lego® Serious Play® (LSP) Ansatz gewählt. Lego® Serious Play® ist eine Methode zur kooperativen Entwicklung neuer Strategien bzw. Ideen zu einem bestimmten Themenfeld unter Verwendung von Klemmbausteinen, um die Gedanken zu visualisieren /10/. Der Ablauf des Workshops wurde in den folgenden 6 Schritten vorbereitet und durchgeführt:

### 1. Impulsvortrag zum Thema Agilität und agile Teamkultur

Zu Beginn des Workshops wurden die Grundlagen zum Thema Agilität und agile Teamkultur durch einen Impulsvortrag des Agilen Coaches vermittelt (siehe Abbildung 3). In dessen Rahmen wurden die unterschiedlichen Bestandteile und Dimensionen einer Teamkultur dargelegt und agile Werte und Wertverständnisse aufgezeigt.



**Abbildung 3:** Einführung in den Workshop und Impulsvortrag zum Thema Agiles Arbeiten und Teamkultur

## 2. Einführung in die Lego® Serious Play® Methode

Zu Beginn der interaktiven Phase des Workshops wurden mit unterschiedlichen Übungen grundlegende Fähigkeiten für den Bau von Lego®-Modellen gelegt (siehe Abbildung 4). Diese Übungen sollten den Teilnehmenden helfen die Bedeutung von Metaphorik und Storytelling für den weiteren Verlauf des Workshops zu verstehen. Außerdem wurden Grund- bzw. Kommunikationsregeln (z. B. stellt das Modell stets die Antwort auf die jeweilige Fragestellung dar und alle Teilnehmenden bauen und teilen ihre Ergebnisse in gleichen Maßen) für den Workshop festgehalten.



**Abbildung 4:** Einführung in den Bau von Lego®-Modellen



Ziel war es, eine gemeinsame Antwort auf die Fragestellung zu erarbeiten und in einem gemeinsamen Modell zu visualisieren (siehe Abbildung 6).

## 5. Entwicklung des Systemmodells

Als dritte und letzte Bauphase der Modellentwicklung wurden Einflussfaktoren, mit einem positiven oder negativen Einfluss auf das Gruppenmodell, in kleinen Modellen visualisiert (siehe Abbildung 7). Ziel dieser Phase war es zu überlegen, welche externen Faktoren auf die Zusammenarbeit am Institut einwirken und welchen Effekt diese haben. Diese Einflussfaktoren wurden mit Verbindungselementen (z. B. Seile, Stäbe) an das Gruppenmodell angefügt, um die Einflüsse und Zusammenhänge zu verdeutlichen.



**Abbildung 7:** Ergebnis Systemmodell mit unterschiedlichen Einflussfaktoren

## 6. Reflexion

Zum Abschluss des Workshops wurde reflektiert und offen kommuniziert, was im Workshop gut oder weniger gut lief (siehe Abbildung 8). In diesem ersten Workshop wurde der Fokus auf Teamkultur, Kommunikation und Zusammenarbeit gelegt, für die Folgeworkshops wünschen sich die Mitarbeiter:innen mehr Input und Wissensvermittlung zu agilen Arbeitsweisen und Methoden zur Unterstützung des agilen Arbeitsprozesses. Des Weiteren wurde Feedback zur Lego® Serious Play® Methode gesammelt. Wobei sich dafür ausgesprochen wurde, dass die gemeinsame kreative Arbeit mit Lego dafür eignet ein transparentes und übersichtliches Systemmodell für die Institutsarbeit zu entwickeln. Anschließend



wurden die Ergebnisse auf dem Whiteboard schriftlich festgehalten und konkrete nächste Schritte abgeleitet.



**Abbildung 8:** Dokumentieren von Ideen, Entscheidungen und nächsten Schritten

In den Folgewochen möchte sich das Team mit einer vorausschauenden und transparenten Planung der anfallenden Aufgaben, einer offenen Kommunikation, regelmäßigen Teammeetings und der internen Dokumentation der Projekt- und Institutsarbeiten beschäftigen. Dazu wird das Team von einem Agilen Coach weiter begleitet und durch „learning by doing“ an weitere agile Arbeitsweisen und Methoden herangeführt.

### Die Rolle der Retrospektive in der agilen Arbeitswelt

Reflexion ist integraler Bestandteil von Entwicklungsprozessen und mit Hilfe von *Retrospektiven* (Teammeetings zur Reflexion des Arbeitsprozesses) zentraler Bestandteil agiler Arbeitsweisen. Trotz der hohen Relevanz und der laufenden Diskussion über agiles Arbeiten ist Reflexion und der regelmäßige Einsatz von Retrospektiven sowohl in der industriellen Praxis als auch in der Institutsarbeit nur selten etabliert /11/. Beispielsweise in der agilen Softwareentwicklung können *agile Retrospektiven* (Ein Team reflektiert in regelmäßigen Abständen darüber, wie es effektiver werden kann und passt sein Verhalten an) unter anderem zur Prozessverbesserung eingesetzt werden, die sich auf das Arbeitsumfeld auswirken können /12/. Regelmäßige Retrospektiven fördern die offene Kommunikation und den ständigen Antrieb zum Lernen und unterstützen Teams dabei Veränderungen bewusst zu definieren. Im Kontext agiler Arbeitsweisen sind Retrospektiven Methodenbausteine, die die Reflexion und bewusste Auseinandersetzung mit dem Ist-Stand in einem Projekt fordern und fördern. Das Ziel von Retrospektiven ist es im Team Prozesse und Arbeitsabläufe anzupassen und effizienter zu verändern. Des Weiteren bringen Retrospektiven Klarheit, bieten die Chance Ungesagtes zu artikuliert und es werden Verhaltensweisen durch explizites Aussprechen offen gelegt, die die Teilnehmer:innen vor der Retrospektive nicht exakt benennen hätten können. Oftmals scheuen Teams diese Klarheit und Transparenz, sodass Retrospektiven unterlaufen und abgetan werden. Demnach sind gut moderierte

Retrospektiven ein effektives Mittel, Denkblockaden aufzulösen, nicht Erkanntes zu kennzeichnen, bisher Ungesagtes auszusprechen, mögliche Veränderungen zu vereinbaren, dem Team die Möglichkeit zu geben, sich auf Veränderungen einzustellen und so schrittweise die eigenen Aktivitäten im Arbeitsumfeld zu optimieren. /13/ Um eine Prozessoptimierung zu erzielen und eine effektive Retrospektive vorzubereiten sind in Anlehnung an /12/ folgende Faktoren vor Beginn des Meetings zu berücksichtigen, die sich auch auf die Institutsarbeit übertragen lassen /12/:

- **Umfeld:** Klärung der Ausgangssituation und des aktuellen Zustands und der Moral des Teams.
- **Zielsetzung:** Klare Festlegung von Ziel und Zweck der Retrospektive. Das Team muss vorab über die erwarteten Ergebnisse und die Ziele einer Iteration aufgeklärt werden.
- **Dauer:** Die Dauer der Retrospektive muss definiert werden (z. B. Sprintlänge, Komplexität hinsichtlich Technologie und Organisation, Teamgröße, Grad der Konflikte und Kontroversen).
- **Aktivitäten:** Definition der Aktivitäten (auch Teilnehmer:innen berücksichtigen), für die die Retrospektive durchgeführt werden soll.
- **Daten:** Die Daten sollen objektiv und rechtzeitig erhoben werden.
- **Struktur:** Eine Retrospektive muss strukturiert und vorbereitet sein, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Es sollten vorab Agenda, Uhrzeit, Ort und Tag des Meetings festgelegt und kommuniziert werden.

Daraus kann der Lehrstuhl IPE für die weiteren Arbeiten ableiten, dass regelmäßige, gut vorbereitete reflexive Meetings die Arbeiten am Institut unterstützen können und Transparenz schaffen. Dazu wurde z. B. bereits ein strukturiertes Stimmungsbarometer (Dimensionen: Sozial, Prozess, Ziel) im Teammeeting eingeführt, in dem jede Woche einmal von jedem Teammitglied reflektiert wird, wie die aktuelle Situation z. B. im sozialen Umfeld, im Arbeitsprozess oder innerhalb der Zielerreichung zu beurteilen ist.

## Reflexion und geplante Umsetzung von agilen Arbeitsweisen am Lehrstuhl IPE

Die ersten Annäherungen des Lehrstuhls IPE mit agilen Arbeitspraktiken, haben die hohe Relevanz der Strukturierung und Transparenz von Arbeitspaketen in der Institutsarbeit aufgezeigt. Besonders durch den Workshop zur Wissensvermittlung von Teamkultur und agilen Arbeitspraktiken, konnte identifiziert werden, dass eine offene und vorausschauende Kommunikation notwendig ist, um effizient alle Aufgaben zu bewältigen. Es ist aktuell für das junge IPE-Team herausfordernd, die Anforderungen an Arbeitspakete rechtzeitig und vollumfänglich zu dokumentieren und zu kommunizieren, da derzeit noch grundlegende Aufbauarbeiten des Lehrstuhls (z. B. Neugestaltung von Lehrveranstaltungen, Aufbau eines LifeLabs, Aufbau des Teams) anfallen und Standards geschaffen werden müssen. Dafür eignet sich die Dokumentation der Aufgaben mit Hilfe des Kanban-Boards, welches das Team nach und nach befüllen und in die tägliche Institutsarbeit integrieren

möchte. Auch die regelmäßigen Gespräche und die Ansätze für strukturierte Reflexion (z. B. Retrospektiven, Stimmungsbarometer) sollen die Arbeit und die Meetings am Lehrstuhl IPE unterstützen, den Teamzusammenhalt stärken und das Team gemeinsam weiter voranbringen.

### Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag fasst das Rahmenwerk und die Prinzipien agiler Arbeitsweisen zusammen und stellt am Beispiel eines Praxisworkshops im IMW ein mögliches Workshopformat und dessen Vorgehen zur Wissensvermittlung agiler Arbeitspraktiken und Teamkultur vor. Des Weiteren werden bereits getestete Methoden und Hilfsmittel zur Förderung agilen Arbeitens innerhalb der Institutsarbeit dargestellt. Fokussiert wird dabei die Retrospektive im agilen Prozess, deren Rolle klar beschrieben und vorgestellt wird. Die Relevanz der Vorbereitung und Struktur einer Retrospektive wird ebenfalls dargelegt und die Verbindung zur Reflexion erläutert. Auch im Praxisworkshop spielte die Reflexion eine große Rolle, da innerhalb der Modellentwicklung des Öfteren in kurzen Schleifen reflektiert wurde und ebenso die positiven und negativen Einflussfaktoren auf das Modell erarbeitet, erläutert und verschriftlicht wurden. In der weiteren Forschung soll der Sinn agiler Arbeitsweisen weiter untersucht werden, um zu bewerten, ob sich die agile Arbeitsweise sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Institutsarbeit effektiv auswirkt. Dabei wird insbesondere die Retrospektive und die Möglichkeiten mit Reflexion Verbesserungspotenziale auszuschöpfen analysiert. Die Institutsarbeit am Lehrstuhl IPE wird dabei weiterhin von einem Agilen Coach begleitet und erarbeitet Stück für Stück Teamkultur und eigene agile Arbeitsmuster. Dazu werden weiterhin Hilfsmittel und Methoden zur Unterstützung agiler Arbeitspraktiken getestet und bewertet.

### Danksagung

Wir möchten uns recht herzlich bei Stefan Kuper für die Unterstützung und Begleitung während unseres Lernprozesses hinsichtlich agiler Arbeitspraktiken bedanken. Wir bedanken uns für die hilfreichen Anregungen, Gespräche und Arbeitstreffen im Rahmen des Agilen Coachings.



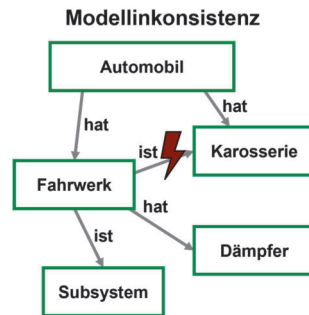
## Literatur

- /1/ Matthies, C.; Dobrigkeit, F.; Ernst, A.: Counteracting Agile Retrospective Problems with Retrospective Activities. In: 19th European Systems Software and Service Process Improvement and Innovation (EuroSPI), Edinburgh, UK, 2019, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28005-5\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28005-5_41)
- /2/ Przybyłek, A.; Albecka, M.; Springer, O.; Kowalski, W.: Game-based Sprint retrospectives: multiple action research. *Empirical Software Engineering* 27, 1, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10664-021-10043-z>
- /3/ Arokodare, M. A.; Falana, B. R.: Strategic Agility and the Global Pandemic: The Agile Organizational Structure, A Theoretical Review. In: *Information Management and Business Review*, Vol. 13, Nr. 1 (I), S. 16-27, 2021, [https://doi.org/10.22610/imbr.v13i1\(I\).3145](https://doi.org/10.22610/imbr.v13i1(I).3145)
- /4/ Rau, K.-H.: Agile objektorientierte Softwareentwicklung – Schritt für Schritt vom Geschäftsprozess zum Java-Programm, S. 10-12, Springer, Wiesbaden 2016, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00776-8>
- /5/ Hanser, E.: Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP, S. 9-11, Springer, Berlin Heidelberg, 2010, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12313-9>
- /6/ Manifest für Agile Softwareentwicklung, Zwölf Agile Prinzipien (2001). [Online]. Verfügbar unter: <https://agilemanifesto.org/iso/de/principles.html> (Zugriff am: 30. November 2023)
- /7/ Scrum.org, Scrum Framework (2020). [Online]. Verfügbar unter: <https://www.scrum.org/learning-series/what-is-scrum> (Zugriff am: 1. Dezember 2023)
- /8/ Jochmann, W.; Böckenholt, I.; Diestel, S. (Hrsg.): HR-Exzellenz – Innovative Ansätze in Leadership und Transformation, S. 153-155, Springer Gabler, Wiesbaden, 2017, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14725-9>
- /9/ Komus, A.; Kuberg, M.: Status Quo (Scaled) Agile 2019/2020 – 4. Internationale Studie zu Nutzen und Erfolgsfaktoren (skalierter) agiler Ansätze, Version 1.0.2 März 2020, S. 11-19, 2020
- /10/ Fearne, M.: The LSP Method – How to engage people and spark insights using the Lego® Serious Play® Method. S. 27-30, Lioncrest, 2020
- /11/ Inkermann, D.; Gürtler, M.; Seegrün, A.: RECAP – A framework to support structured reflection in engineering projects. In: *Proceedings der International Design Conference DESIGN 2020*, Vol. 1, S. 597–606, 2020, <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.99>
- /12/ Jovanović, M., Mesquida, A.-L., Radaković, N., Mas, A.: Agile Retrospective Games for Different Team Development Phases. In: *Journal of Universal Computer Science*, 22 (12), S. 1489-1508, 2016
- /13/ Andresen, J.: Retrospektiven in agilen Projekten: Ablauf, Regeln und Methodenbausteine. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017

## Formulierung und Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based Systems Engineering

Schumacher, T.; Inkermann, D.

*Eine zentrale Herausforderung bei der Umsetzung von Model-based Systems Engineering ist die Sicherstellung der Modellkonsistenz. Um dieser Herausforderung zu begegnen, schlägt dieser Beitrag die Anwendung von Konsistenzregeln vor. Hierzu werden einerseits notwendige Grundlagen, wie die Bewertung der Modellkonsistenz und andererseits die konkrete Formulierung von Konsistenzregeln betrachtet. Um eine strukturierte Formulierung zu ermöglichen, wurde eine Satzschablone entwickelt, welche insbesondere die Bewertung von Architekturmustern beinhaltet. Außerdem wurden entsprechend der Satzschablone konkrete Konsistenzregeln an einem heterogenen Modell beispielhaft angewendet.*



*A crucial challenge by implementing Model-based Systems Engineering is to ensure model consistency. To address this challenge, this paper proposes the application of consistency rules. For this purpose, necessary fundamentals such as the evaluation of model consistency and the concrete formulation of consistency rules are considered. In order to enable a structured formulation, a formulation mask was developed, which particularly includes the evaluation of architectural patterns. In addition, specific consistency rules were applied to a heterogeneous model in accordance with the formulation mask.*

### Einleitung und Problemstellung

Heutige mechatronischer Systeme sind charakterisiert durch eine zunehmende Komplexität und Heterogenität sowie einer intensiven Vernetzung der Systeme untereinander und zum Internet der Dinge und Dienste /1/. Diese Systemeigenschaften führen auch zu Herausforderungen in der Produktentwicklung, wie die Etablierung einer interdisziplinären Kommunikation, Erarbeitung eines ganzheitlichen Systemverständnis und der Betrachtung aller Produktlebenszyklusphasen. Ein Ansatz, um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die digitale Präsentation des Systems durch Modelle /1/. Modelle sind zweckmäßige Abstraktionen bzw. Reduktionen des betrachteten Systems, um dieses besser zu beherrschen und transparenter abzubilden. Dabei unterscheiden sich Modelle beispielsweise im Modellierungszweck und im Formalisierungs- und Detaillierungsgrad entsprechend der betrachteten Entwicklungsaufgabe und -disziplin /2/. Gleichzeitig dienen Modelle als Informationsträger und

Wissenspeicher über das betrachtete System /3/. Daher sollten Produktentwicklungen das Wissen aus vorhandenen Modellen früherer Produktgenerationen berücksichtigen. Die resultierende Modellheterogenität erhöht jedoch die Auftretenswahrscheinlichkeit von Modellinkonsistenzen, welche zu einem extraordinären Anstieg von Entwicklungszeit- und Kosten /4/ und ersthaften technischen Problemen führen kann /5/. Model-based Systems Engineering (MBSE) ist ein Ansatz, um die vielfältigen Modelle zu einem Systemmodell zu verknüpfen. MBSE zielt dabei auf die Einführung eines kohärenten, vollständigen Systemmodells ab, welches als zentrale Informations- und Datenspeicher dient /6/.

Für eine effizientere interdisziplinäre Entwicklung ist innerhalb des MBSE die Systemmodellierung anhand der Systems Modeling Language (SysML) etabliert. Diese grafische Modellierungssprache stellt u. a. abstrakte Modellelemente zur Beschreibung von Systemanforderungen, Systemverhalten und -struktur sowie Verifikations- und Validierungsfällen bereit. Abhängig von der konkreten Entwicklungsaufgabe werden jedoch oft zusätzlich detailliertere Modelle benötigt, wie bspw. CAD-Modelle, um den konkreten geometrischen Aufbau zu definieren und mögliche Auswirkungen aufgrund von externen Störgrößen, z. B. Temperatureinflüsse, zu analysieren. Somit ergibt sich in der aktuellen Produktentwicklungspraxis eine große Heterogenität der eingesetzten produktbeschreibenden Modelle.

Zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen unterschiedlichen Modellen analysiert dieser Beitrag den Begriff der Modellkonsistenz im Kontext Model-based Systems Engineering und schlägt den Einsatz von Konsistenzregeln zur Sicherstellung der Modellkonsistenz vor.

## Zielstellung und Forschungsfragen

Dieser Beitrag zielt auf die Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based Systems Engineering ab. Dabei liegt der Schwerpunkt neben einem grundsätzlichen Verständnis von Modellkonsistenz und dem Einsatz von Konsistenzregeln auf der konkreten Formulierung von Regeln zur Verbesserung der Konsistenz zwischen SysML- und CAD-Modellen.

Folgende korrespondierende Forschungsfragen werden im Rahmen dieses Beitrags untersucht:

- Welche Arten von Konsistenzregeln sind zur Bewertung der Modellkonsistenz zu unterscheiden?
- Welche Formulierungen eignen sich für die Definition von Konsistenzregeln?
- Welcher Konsistenzregeln unterstützen bei der Bewertung der Konsistenz heterogener Modelle?

## Grundlagen und Stand der Technik

Dieser Abschnitt erläutert notwendige Grundlagen zu den Themenfeldern Modellkonsistenz und Inkonsistenzen sowie die Bewertung der Modellkonsistenz anhand unterschiedlicher Typen von Konsistenzregeln.

### Modellkonsistenz

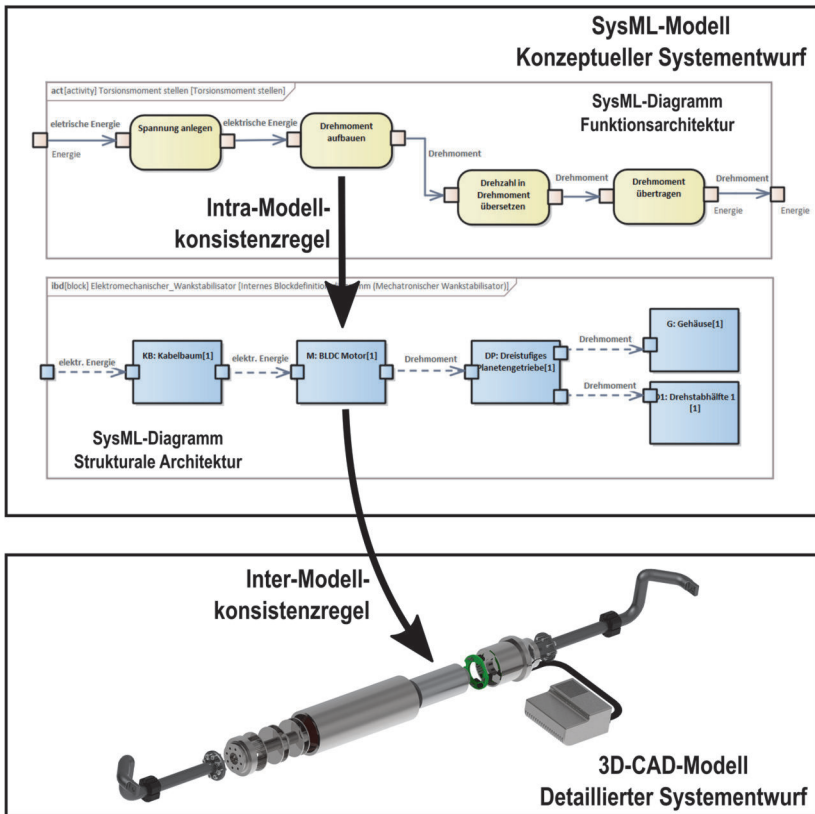
Grundsätzlich kann Modellkonsistenz als eine Modelleigenschaft betrachtet werden, die zur Bewertung der Modellqualität und der Qualität des zu entwickelnden Systems verwendet werden kann /7/. Gleichzeitig ist die Modellkonsistenz wesentlich, um einen effizienten Entwicklungsprozess sicherzustellen /8/. Die Vermeidung bzw. Reduzierung von Modellinkonsistenzen stellt somit eine zentrale Herausforderung für ein effizientes MBSE dar /9/.

Modellinkonsistenz kann als logischer Widerspruch oder irrationale Existenz von Fakten, Artefakten oder Konzepten verstanden werden /10/. Basierend auf Vogel-Heuser et al. /11/, wird im Kontext dieses Beitrags unter Modellinkonsistenz eine Verletzung von domänenspezifischen oder domänenunabhängigen technischen Regeln oder Einschränkungen bei der Modellierung technischer Systeme verstanden. Es existieren verschiedene Beispiele für Modellinkonsistenzen, wie die Verletzung von Wohlgeformtheitsregeln, Inkonsistenzen in redundanten Informationen, Inkongruenz zwischen Modell und Testdaten und die fehlende Beachtung von Heuristiken oder Richtlinien /9/.

### Bewertung der Modellkonsistenz

Modellkonsistenz lässt sich grundsätzlich in zwei Typen unterscheiden: 1) Intra-Modellkonsistenz, welche die Konsistenzbedingungen innerhalb eines Modells beschreiben, und 2) Inter-Modellkonsistenz, welche Konsistenzbedingungen betrachten, die modellübergreifend eingesetzt werden /8/.

Zur Bewertung der Modellkonsistenz greift dieser Beitrag diese Unterscheidung auf und schlägt die Verwendung von Intra- und Inter-Modellkonsistenzregeln vor. Dabei beschreiben Konsistenzregeln Bedingungen, die ein Modell erfüllen muss, um konsistent zu sein. Abbildung 1 stellt diese Unterscheidung anhand von SysML und CAD-Modellen am Beispiel eines aktiven Wankstabilisators vor. Bei dem Wankstabilisator handelt es sich um ein mechatronisches Fahrwerksystem im Automobil, welches insbesondere den Fahrkomfort in Kurvenfahrten verbessert.



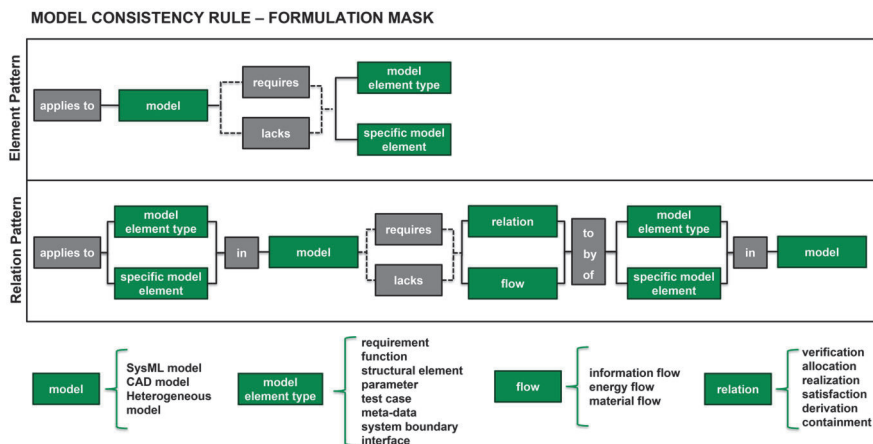
**Abbildung 1:** Unterscheidung von Intra- und Inter-Modellkonsistenzregeln

Abbildung 1 visualisiert die Anwendung von Konsistenzregeln innerhalb eines Modells und modellübergreifend. Model-based Systems Engineering wendet üblicherweise SysML-Modelle an, um bspw. die Entwicklung der Systemarchitektur zu unterstützen. Dabei berücksichtigt eine Systemarchitektur sowohl funktionale als auch strukturelle Architekturbeschreibungen, die miteinander verknüpft sind. Abbildung 1 stellt diese anhand von zwei separaten Diagrammen innerhalb eines SysML-Modells dar. Zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen diesen separaten Architekturbeschreibungen innerhalb eines SysML-Modells können Intra-Modellkonsistenzregeln angewendet werden. Mit fortschreitendem Entwicklungsprozess müssen die definierten strukturellen Systemelemente (SysML-Modell) in einen detaillierten Entwurf überführt werden. Dabei werden diese durch konkrete geometrische und weitere Eigenschaften erweitert. In der mechanischen Produktentwicklungsdisziplin werden für diese Aktivität üblicherweise CAD-Modelle verwendet. Dadurch entstehen modellübergreifende Relationen, die anhand Inter-Modellkonsistenzregeln bewertet werden können.

## Formulierung von Konsistenzregeln

Grundsätzlich ist bei der Formulierung von Konsistenzregeln zu beachten, dass es sich je nach Formulierungsart um positive oder negative Konsistenzregeln handelt. Positive Konsistenzregeln zeigen auf, dass ein Modell als konsistent betrachtet werden kann, wobei negative Konsistenzregeln auf die Existenz von Modellinkonsistenzen hinweisen /12/. Außerdem ist zu beachten, dass Konsistenzregeln sowohl für individuelle Modellelemente als auch für Elementtypen definiert werden können /13/.

Zielstellung dieser Arbeit ist es, geeignete Formulierungen für Konsistenzregeln zu erarbeiten. Basierend auf Hehenberger et al. /13/ wurden Satzschablonen für die Formulierung von positiven und negativen Modellkonsistenzregeln entwickelt, siehe Abbildung 2. Die Konsistenzregeln dienen dabei insbesondere der Modellanalyse auf Grundlage von Architekturmustern.



**Abbildung 2:** Satzschablone für Konsistenzregeln basierend auf /13/

Die eingeführte Satzschablone betrachtet das Vorhandensein (positive Konsistenzregel) bzw. das Fehlen (negative Konsistenzregel) notwendiger Modellelemente bzw. Modellelementtypen sowie deren Relationen und Flüsse untereinander in einem Modell oder modellübergreifend. Beispielhafte Konsistenzregeln, die der vorgegebenen Formulierung der Satzschablone folgen, stellt Tabelle 1 dar.

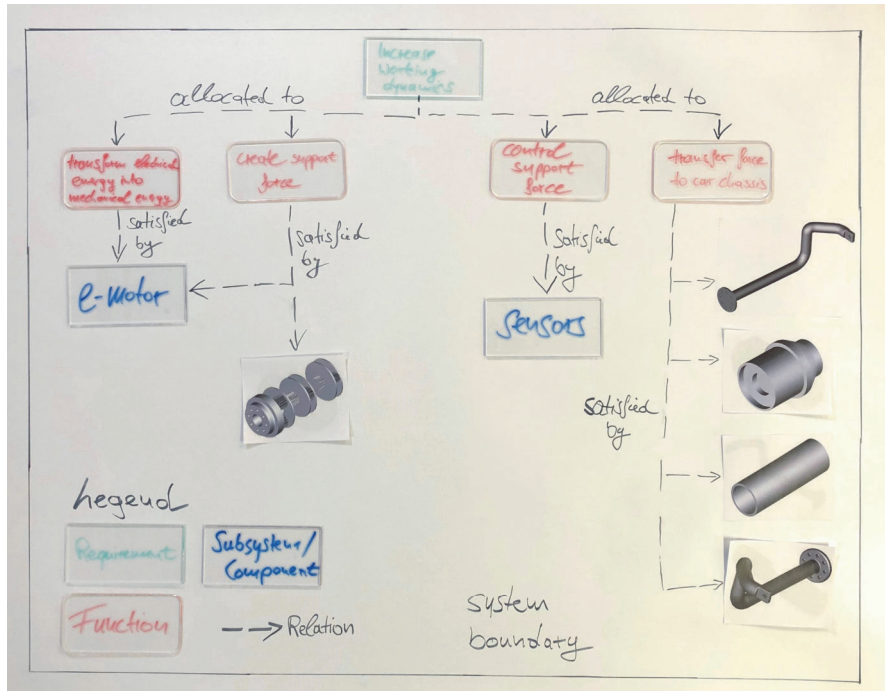
**Tabelle 1:** Beispielhafte Formulierung von Konsistenzregeln

Architekturmuster	Positive/ negative Konsistenzregel	Formulierung
Element Pattern	Positiv	"applies to <SysML model> requires <requirements>"
Element Pattern	Negativ	"applies to <CAD model> lacks <e-motor>"
Relation Pattern	Positiv	"applies to <function> in <SysML model> requires <realization> by <structural element> in <SysML model>"
Relation Pattern	Negativ	"applies to <BLDC motor> in <SysML model> lacks <allocation> to <BLDC motor> in <CAD model>"

### Bewertung der Konsistenz heterogener Modelle

Dieser Beitrag schlägt zur Analyse der Modellkonsistenz die Verwendung von Konsistenzregeln vor und stellt deren Anwendung anhand heterogener Modelle vor. Heterogene Modelle ermöglichen die Integration unterschiedlichen Modellelemente in ein Modell (Visualisierung) /14/. So besteht beispielsweise die Möglichkeit SysML- und CAD-Modellelemente in einem heterogenen Modell zu kombinieren. In /9/ wurde die Anwendung heterogener Modelle zur Aufrechterhaltung der Modellkonsistenz vorgeschlagen. Anhand der Nutzung von Konsistenzregeln soll dieser Ansatz evaluiert werden.

Abbildung 3 zeigt ein manuell erzeugtes (analoges) heterogenes Modell, welches bei der Architekturentwicklung des Wankstabilisators unterstützen kann. Der Modellzweck ist die Darstellung der Rückverfolgbarkeit (Traceability) relevanter Modellelemente. In diesem Fall wird ein Änderungsszenario modelliert, indem die Anforderung *Increase working dynamics*, beispielweise für eine nachfolgende Produktgeneration, geändert wurde. Um eine umfangreiche Analyse der betroffenen Teilsysteme durchzuführen, stellt dieses Modell die Relationen zwischen Anforderungen und dazugehörigen Funktionen sowie Teilsysteme dar.



**Abbildung 3:** Heterogenes Modell zur Darstellung der Modelltraceability

Das heterogene Modell beinhaltet abstrakte und detailliertere Modellelemente. Die detaillierten CAD-Modellelemente visualisieren Elemente, die in der aktuellen Gestalt für die Folgegeneration übernommen werden können. Die abstrakten Modellelemente (*E-Motor*, *Sensoren*) müssen aufgrund der Anforderungsänderung umfangreich analysiert und gegebenenfalls geändert werden.

Um die Konsistenz dieses heterogenen Modells zu untersuchen, werden ausgehend von der erarbeiteten Satzschablone folgende Konsistenzregeln formuliert und bewertet, siehe Tabelle 2.



**Tabelle 2:** Anwendung von Konsistenzregeln

	<b>Konsistenzregel</b>	<b>Ergebnis</b>
1	"applies to <requirement> in <heterogeneous model> requires <allocation> to <function> in <heterogeneous model>"	true
2	"applies to <function> in <heterogeneous model> requires <satisfaction> by <structural element> in <heterogeneous model>"	true
3	"applies to <structural element> in <heterogeneous model> requires <containment> of <parameter> in <heterogeneous model>"	false
4	"applies to <control support force> in <heterogeneous model> requires <satisfaction> by <control unit> in <heterogeneous model>"	false
5	"applies to <e-motor> in <heterogeneous model> lacks <energy flow> to <transmission> in <heterogeneous model>"	true
6	"applies to <e-motor> in <heterogeneous model> requires <energy flow> to <system boundary> in <heterogeneous model>"	false

Die Analyse des dargestellten Modells durch Anwendung von Konsistenzregeln ermöglicht das Ableiten verschiedener Erkenntnisse. Konsistenzregel 1 und 2 zeigen, dass eine grundsätzliche Traceability der Modellelemente vorliegt. Es fehlen jedoch konkrete Modellelemente, wie erforderliche Teilsysteme (*control unit*) und deren Parameterbeschreibungen (Konsistenzregel 3 und 4). Daraus lässt sich schließen, dass dieses Modell als unvollständig und inkonsistent betrachtet werden kann. Außerdem fehlen dem Modell die konkreten Abhängigkeiten (Flüsse) zwischen dem Modellelementen und zur Systemgrenze. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei der Modellanalyse mit Konsistenzregeln immer der Modellzweck zu berücksichtigen ist. Das betrachtete heterogene Modell zielte nicht auf die Modellierung von Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den Modellelementen ab, somit sind die Konsistenzregeln 5 und 6 nichtzutreffend.

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag erläutert die Formulierung und Anwendung von Konsistenzregeln im Model-based Systems Engineering. Konsistenzregeln dienen der Bewertung der Modellkonsistenz innerhalb eines Modells oder modellübergreifend. Um eine strukturierte Formulierung von Konsistenzregeln sicherzustellen, wurde eine Satzschablone entwickelt, welche insbesondere die Bewertung von Architekturmustern beinhaltet. Die erarbeitete Satzschablone wurde an einem heterogenen Modell beispielhaft angewendet, um mögliche Regelabweichungen vorzustellen. Im Allgemeinen zielt die Definition und Anwendung von Konsistenzregeln auf die Aufrechterhaltung der Modellkonsistenz und der Identifikation von Modellinkonsistenzen ab, dies führt zu einer besseren Modellqualität und damit einhergehend effizienteren Produktentwicklung.

Mit der zunehmenden Anzahl an produktbeschreibenden Modellen im MBSE nimmt auch die Anzahl erforderlichen Konsistenzregeln zu, um die Modellkonsistenz zu analysieren bzw. sicherzustellen. Daher beschäftigen sich zukünftige Forschungsarbeiten mit der Anwendung von Konsistenzregeln innerhalb digitaler Produktmodelle.

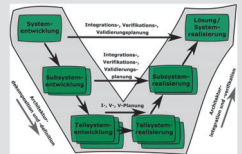
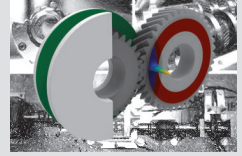
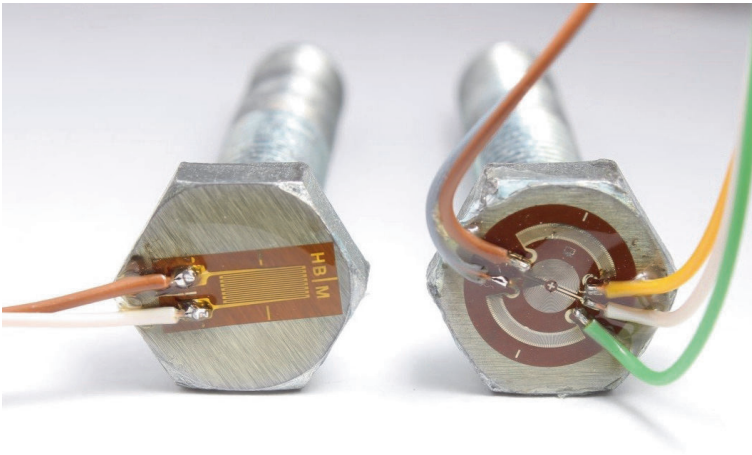
## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Arbeiten des niedersächsischen Zukunftslabors Mobilität. Das Teilprojekt wird gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (Fördernummer ZN3493) im Niedersächsischen Vorab der VolkswagenStiftung und betreut vom Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN).

## Literatur

- /1/ VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. Beuth Verlag, 2021, Berlin
- /2/ Andreasen, M.M.: Modelling—The Language of the Designer. Journal of Engineering Design, Vol. 5 No. 2, 1994, pp. 103–115
- /3/ Mordecai, Y.; Dori, D.: Towards a Quantitative Framework for Evaluating the Expressive Power of Conceptual System Models. INCOSE International Symposium, Vol. 26 No. 1, 2016, pp. 42–57
- /4/ Spanoudakis, G.; Zisman, A.: Inconsistency Management in Software Engineering: Survey and Open Research Issues. 2000, pp. 1 – 38
- /5/ Nuseibeh, B.: Ariane 5: Who Dunnit?. In: IEEE Softw. 14 (3), 1997, S. 15–16, DOI: 10.1109/MS.1997.589224

- /6/ Friedenthal, S; Moore, A; Steiner, R.: A practical guide to SysML. The systems modeling language. Third edition. Waltham, MA: Elsevier/Morgan Kaufmann (The MK/OMG Press), 2015
- /7/ Kalibatiene, D.; Vasilecas, O.; Dubauskaite, R.: Rule Based Approach for Ensuring Consistency in Different UML Models. In: Information Systems: Development, Learning, Security, Bd. 161. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 1–16
- /8/ Fieber, F.; Huhn, M.; Rumpe, B.: Modellqualität als Indikator für Softwarequalität: eine Taxonomie. In: Informatik Spektrum 31 (5), S. 408–424, 2008, DOI: 10.1007/s00287-008-0279-4
- /9/ Schumacher, T.; Inkeremann, D.: Model Inconsistencies and Solution Approaches to Maintain Consistency in Model-based Systems Engineering. In: ICONS 2023: The eighteenth International Conference on Systems, April 24th-28th, 2023, Venice, Italy, IARIA, Wilmington, DE, pp. 23–28
- /10/ Herzig, S.J.I.; Qamar, A.; Reichwein, A.; Paredis, C.J.J.: A Conceptual Framework for Consistency Management in Model-Based Systems Engineering. In: Volume 2: 31st Computers and Information in Engineering Conference, ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Washington, DC, USA, 2011, S. 1329–1339
- /11/ Vogel-Heuser, B.; Fantuzzi, C.; Wimmer, M.; Böhm, M.; Fay, A.: Herausforderungen in der interdisziplinären Entwicklung von Cyber-Physischen Produktionssystemen. In: at - Automatisierungstechnik 67 (6), 2019, S. 445–454. DOI: 10.1515/auto-2018-0144
- /12/ Feldmann, S; Herzig, S.J.I.; Kernschmidt, K.; Wolfenstetter, T.; Kammerl, D.; Qamar, A. et al.: A comparison of inconsistency management approaches using a mechatronic manufacturing system design case study. In: 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Gothenburg, Sweden, 2015, S. 158–165
- /13/ Hehenberger, P.; Egyed, A.; Zeman, K.: Consistency Checking of Mechatronic Design Models. In: Volume 3: 30th Computers and Information in Engineering Conference. ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Montreal, Quebec, Canada, 2010, S. 1141–1148
- /14/ Jansen, S.; Welp, E.G.: A heterogeneous modelling approach for domain allocation in mechatronics. In: Proceedings of 16th International Conference on Engineering Design (ICED 2007), Paris, 2007



**C**

# Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

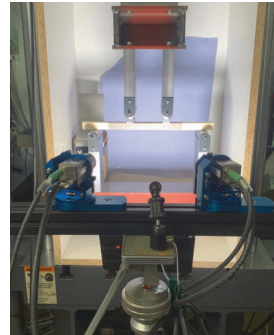




## Analyse der Verschiebung der neutralen Faser bei Holzproben durch optische Dehnungsmessung mit DIC

Losch, M.; Lohrengel, A.

*Die Digitale Bildkorrelation (DIC) stellt eine fortschrittliche Messtechnik dar, die in der Versuchsdurchführung vielfältige Anwendungen findet. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden bietet die Digitale Bildkorrelation berührungslose Messungen, flexible Anpassungsmöglichkeiten und Vollflächenergebnisse.*



*Digital Image Correlation (DIC) is an advanced measurement technique that has a wide range of applications in testing. Compared to conventional methods, digital image correlation offers non-contact measurements, flexible adjustment options and full-field results.*

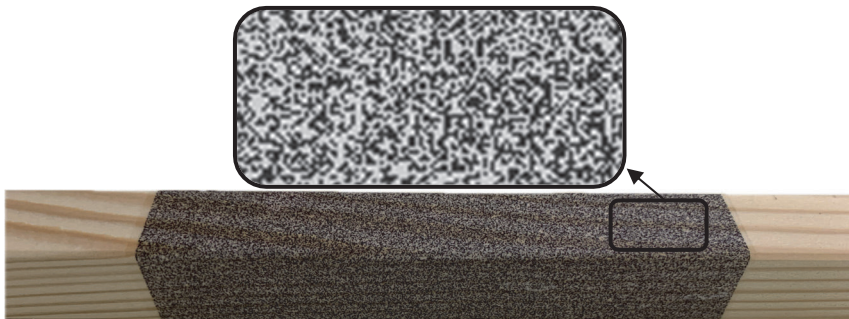
### Vorteile der digitalen Bildkorrelation

Die Digitale Bildkorrelation (DIC – Digital Image Correlation) stellt eine optische und berührungslose Messtechnik dar, die in der experimentellen Festkörpermechanik zur präzisen Analyse von Formen (Kontur), Verformungen und Dehnungen bei Materialprüfungen Verwendung findet. Dieses Verfahren ermöglicht darüber hinaus die exakte Bestimmung kinematischer Größen von diskreten Punkten, einschließlich Rotationen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Im Vergleich zu anderen Messtechniken, wie beispielsweise Dehnungsmessstreifen, bietet das DIC eine Reihe von Vorteilen. Das System der Digitalen Bildkorrelation erfordert keine mechanische Verbindung zur Oberfläche des Prüfobjektes, sodass die Messungen berührungslos stattfinden. Dies führt zu einer gesteigerten Anwendungsflexibilität, da der Messbereich in seinen Abmessungen variabel gewählt werden kann. Im Gegensatz dazu unterliegt der Messbereich bei Dehnungsmessstreifen den Einschränkungen der Messgitterlänge und –breite. Die Beschränkungen dieser festen Messparameter entfallen im Kontext des DIC, was die Betrachtung und Auswertung von umfassenderen Bereichen ermöglicht. Die Messungen des DIC erstrecken sich über die gesamte optisch sichtbare Fläche, was zu umfassenden Messergebnissen führt. Das System ist vielseitig einsetzbar. Die Kameras erfassen Bereiche von wenigen Quadratmillimetern bis hin zu Quadratmetern. Diese Erfassungsfähigkeit bleibt unter dynamischen Bedingungen erhalten, wobei die Messfrequenzen im Bereich von Hertz bis Megahertz variieren können. Dies erlaubt die Generierung präziser Messergebnisse, selbst unter dynamischen Bedingungen, was die Anwendbarkeit der Digitalen Bildkorrelation auf ein breites Spektrum von Anwendungen ausdehnt. Die Messungen erfolgen mit einer Auflösung im Sub-Pixel-

Bereich, wodurch die präzise Erfassung von Mikrodehnungen sowohl innerhalb der Ebene (parallel zu einer gegebenen Oberfläche) als auch außerhalb der Ebene (senkrecht zu einer gegebenen Oberfläche) realisiert werden können. /1/

### Messprinzip

Das Messprinzip des Digitalen Bildkorrelations-Algorithmus basiert auf der Korrelation von Punkten auf der Oberfläche, die eine Verschiebung erfahren. Diese Anordnung wird als Speckle-Muster oder Grautonmuster bezeichnet, welches aus zufällig angeordneten Sprenkeln unterschiedlicher Größen und Formen besteht, siehe Abbildung 1. Es ist von Bedeutung, dass die Dimensionen der Speckles angemessen gewählt werden, weder zu groß noch zu klein. Die Realisierung des Speckle-Musters kann durch verschiedene Methoden erfolgen, darunter das Auftragen von Farbe mittels Airbrush oder Sprühdosen, sowie die Verwendung spezieller Walzen. Alternativ bieten sich Wasserschiebe- oder Tattoo-Folien an, die durch einen handelsüblichen Drucker unter Verwendung einer entsprechenden Vorlage bedruckt werden können. Nachfolgend werden die Folien gemäß den Herstellervorgaben auf das zu untersuchende Objekt appliziert. Das Speckle-Muster passt sich der Ausdehnung des Objekts an, wobei keinerlei mechanische Spannungen in dieses induziert werden.



**Abbildung 1:** Speckle-Muster mit Tattoo-Folie auf einer Holzprobe

Die Kameras erfassen das stochastische Speckle-Muster auf einer Pixel-Ebene und digitalisieren es in diskrete Grauwertintensitäten. Durch die Definition lokaler Pixelgruppen, die als Fenster oder Facetten bezeichnet werden, kann ein charakteristisches Mustermerkmal, vergleichbar mit einem Fingerabdruck, im Referenzbild identifiziert werden. Jedes der identifizierten Mustermerkmale im Referenzbild wird systematisch in sämtlichen nachfolgenden Bildern der Messreihe gesucht. Bei erfolgreicher Lokalisierung erfolgt eine kontinuierliche Verfolgung des identifizierten Merkmals in den nachfolgenden Bildern. Eine Veränderung in der Form des vorab identifizierten Merkmals erfolgt durch eine genaue Korrelationsauswertung, vorausgesetzt, dass derartige Veränderungen vorhanden sind. Dieser Prozess ermöglicht eine fortlaufende Erfassung und detaillierte Analyse

dynamischer Veränderungen in den Formen der Mustermerkmale über die zeitliche Abfolge der Messaufnahmen hinweg. /1/

### Messaufbau

Das am Institut verwendete DIC-System Q 400 stammt von Dantec Dynamics und umfasst zwei Kameras mit einer Auflösung von 2.3 Megapixeln, die an einem flexibel einstellbaren Stativ befestigt sind. Zur Gewährleistung optimaler Lichtverhältnisse werden die zu prüfenden Objekte mithilfe einer LED-Leuchte beleuchtet, deren Farbtemperatur und Lichtleistung individuell anpassbar sind. Dieser Aufbau, siehe Abbildung 2, ermöglicht eine präzise Erfassung hochauflösender Bilddaten unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen und trägt zur Gewährleistung reproduzierbarer Messergebnisse bei.



**Abbildung 2:** DIC Messaufbau mit Kameras, Stativ und LED-Beleuchtung

Eine Anlogschnittstelle fungiert als gezielter Auslösemechanismus für die Digitale Bildkorrelation bei vordefinierten Ereignissen. Über diese Schnittstelle können sämtliche auf das Prüfobjekt einwirkende physikalischen Größen in der Software des DIC erfasst werden. Hierzu erfolgt die Umwandlung dieser Größen vom eigentlichen Prüfaufbau in ein analoges Signal, welches über die Schnittstelle eingespeist wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht nicht nur die Zuordnung der physikalischen Größen zu den einzelnen DIC-Aufnahmen, sondern gestattet auch die Verwendung als Triggersignal für die Implementierung einer Aufnahme-prozedur. Diese Prozedur dient nicht nur dem Initiieren und Abschließen der Aufnahmen, sondern regelt auch den Zeitpunkt sowie die Anzahl der zu speichernden Bilder. Dieser integrierte Ansatz erlaubt somit eine präzise Synchronisation von



physikalischen Ereignissen mit den Aufnahmen und fördert eine umfassende Kontrolle über den DIC-Messprozess.

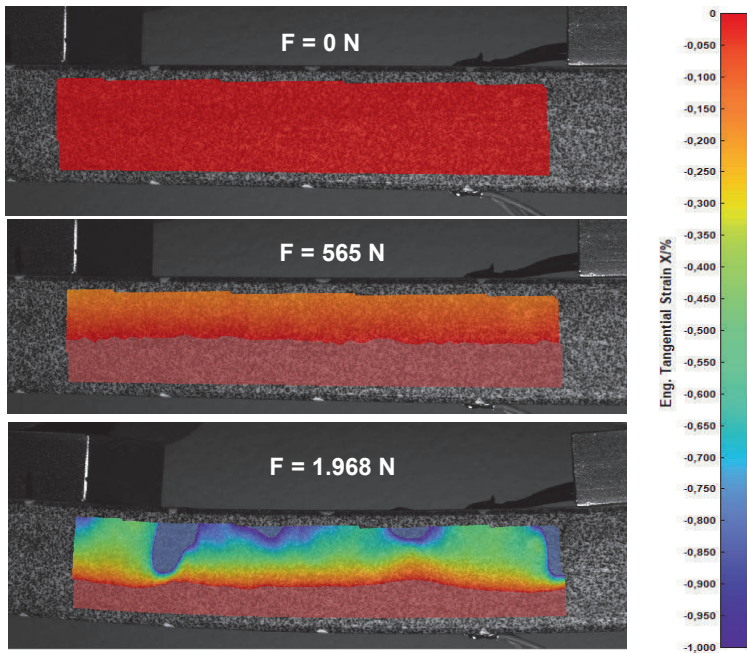
Die Kalibrierung der Kameras vor dem Versuchsdurchlauf erfolgt mittels einer Kalibrierplatte. Hierbei werden die Perspektiven jeder einzelnen Kamera auf ein Objekt erfasst, wobei die internen Parameter Orientierung, Skalierung und die Umrechnung von Pixeln in ein Koordinatensystem mit physikalischen Entfernungseinheiten einschließen. Zusätzlich werden die Perspektiven einer Kamera im Verhältnis zur anderen Kamera erfasst, wodurch die externen Parameter definiert werden. Diese Kalibrierung stellt sicher, dass die Kameras präzise und korrekt die räumlichen Informationen des Objekts während des Versuchsdurchlaufs aufnehmen können. /1/

### Optische Dehnungsmessung am Beispiel von Holzproben

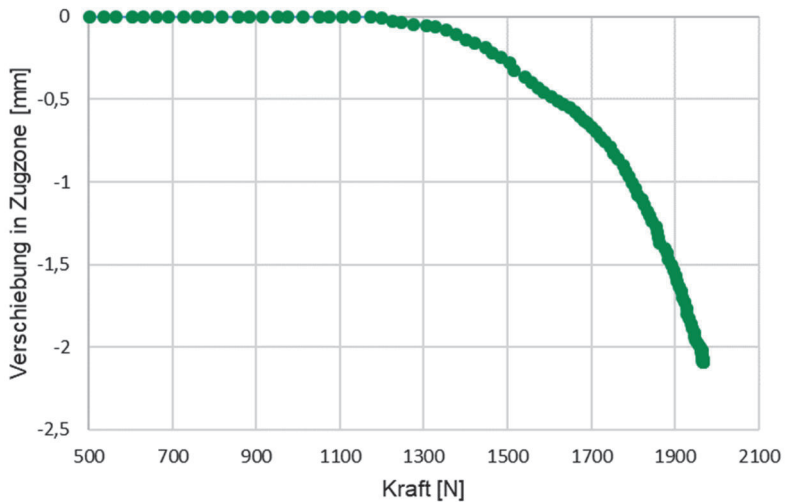
Die Verschiebung der neutralen Faser ist ein wichtiger Parameter für die Charakterisierung des Verhaltens von Holzproben unter Biegebelastung und trägt zur umfassenden Analyse der mechanischen Eigenschaften des Materials bei.

Die Untersuchung von Holzproben mittels 4-Punkt-Biegung zielt darauf ab, die Verschiebung der neutralen Faser während der Belastung zu bestimmen. Für diesen Zweck werden Holzproben aus Fichte mit einem Querschnitt von 20 x 20 mm und einer Länge von 360 mm geprüft. Das Verfahren der 4-Punkt-Biegung beinhaltet das Anwenden einer Last an zwei Punkten entlang der oberen Oberfläche der Probe und das Aufliegen von zwei Stützpunkten an der Unterseite. Dieser Aufbau erzeugt eine definierte Biegespannung in der Probe und ermöglicht die Beobachtung der Verschiebung der neutralen Faser.

In Abbildung 3 sind die mit dem DIC-System ermittelten Dehnungen [%] in X-Richtung zu verschiedenen Belastungszeitpunkten dargestellt. Zur Visualisierung der neutralen Faser wird die Skala am oberen Ende auf 0 % eingestellt. Dies ermöglicht eine klare Abgrenzung der neutralen Faser und erleichtert die visuelle Verschiebung während der Belastungsphasen. Die Ermittlung der Position der 0 % Dehnung entlang von Pfaden im Biegebereich während des Versuchs ergibt eine durchschnittliche Verschiebung der neutralen Faser um 2,13 mm in Richtung der Zugzone (Abbildung 4). Weiterhin lässt sich beobachten, dass sich die neutrale Faser zu verschieben beginnt, wenn die Proportionalitätsgrenze überschritten wird, hier 1.197 N.



**Abbildung 3:** Dehnungen [%] in X-Richtung bei einer Holzprobe unter Biegebelastung



**Abbildung 4:** Belastungsabhängige Verschiebung der neutralen Faser in Richtung der Zugzone

## Zusammenfassung

Die Digitale Bildkorrelation (DIC) ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Analyse von Dehnungen und Verformungen in Materialprüfungen. Sie ermöglicht nicht nur die genaue Bestimmung von kinematischen Größen, sondern bietet auch berührungslose Messungen und hohe Flexibilität in der Anwendung.

Der Messtechnikaufbau umfasst zwei Kameras, eine flexible Anlogschnittstelle und eine sorgfältige Kalibrierung vor dem Versuchsdurchlauf. Die Fähigkeit, die Verschiebung der neutralen Faser während einer 4-Punkt-Biegung an Holzproben mit einer Auflösung im Sub-Pixel-Bereich zu bestimmen, ermöglicht Einblicke in das mechanische Verhalten des Holzes unter Belastung. Die ermittelte durchschnittliche Verschiebung der neutralen Faser um 2,13 mm in Richtung der Zugzone zeigt einen wichtigen Parameter für die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von Holzmaterialien.

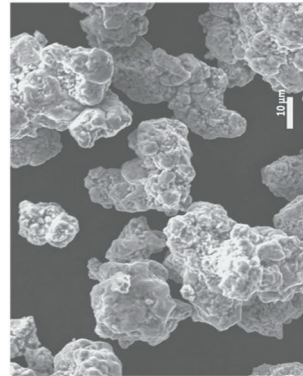
## Literatur

- /1/ Dantec Dynamics: DIC Basic User Training Course 1.0: 1. Introduction to Digital Image Correlation (DIC).

## Charakterisierung von Metallpulvern

Bauer, R.; Dreßler, N.; Inkermann, D.

*Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Charakterisierung von Metallpulvern. Es werden gängige Verfahren zur Pulvercharakterisierung mit zugehörigen Messgeräten vorgestellt. Die Auswirkung von Pulvercharakteristika auf die Eigenschaften von mittels additiver Fertigung hergestellter Werkstoffe werden erläutert und daraus Vor- und Nachteile der verschiedenen Messverfahren abgeleitet und geeignete Anwendungsbereiche zugeordnet.*



*This article gives an overview of metal powder characterization. A selection of common methods for powder characterization with corresponding measuring equipment is presented. The influence of powder characteristics on the properties of materials produced by additive manufacturing are assessed. With the results, advantages and disadvantages of different measuring methods are derived and suitable use cases will be allocated.*

### Einleitung

Metallpulver sind Grundstoffe für die Herstellung metallischer Bauteile durch additive Fertigungsverfahren, wie z. B. Selective Laser Melting (SLM), sowie traditionelle Fertigungsverfahren wie Metallpulverspritzgießen oder Sintern. Durch neue Fertigungstechnologien sind innovative und verbesserte Bauteildesigns (z. B. Leichtbau) möglich und es werden branchenübergreifend neue Anwendungsfelder erschlossen z. B. in der Luft- und Raumfahrt, dem Automobilbau, dem Maschinen- und Anlagenbau sowie der Medizintechnik und dem Bauwesen. Die Herstellung pulvermetallurgischer Produkte umfasst drei grundlegende Teilbereiche /1, 2/:

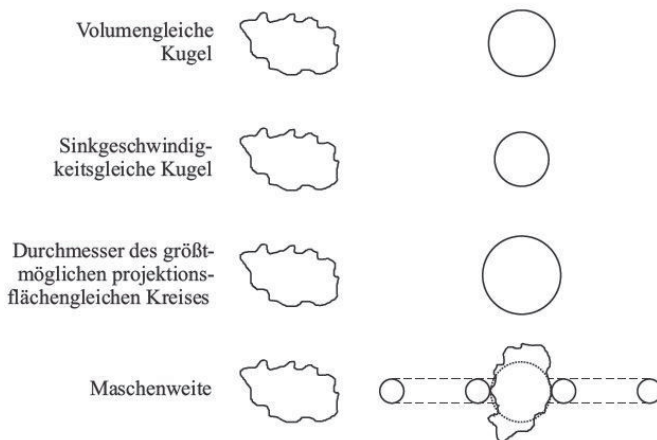
1. Metallpulver: Bereitstellung von Pulvern mit Merkmalen, die für nachfolgende Verarbeitungsmethoden geeignet sind und welche die geforderten Eigenschaften des Werkstückes gewährleisten. Durch Mischen von Metallpulvern können Verbundwerkstoffe hergestellt werden.
2. Verdichtung und Formgebung: Verpressen von Metallpulvern in Matrizen, was mit steigendem Druck zur Kaltverfestigung der Partikel infolge von plastischer Verformung führt. Mit weiterer Zunahme des Drucks brechen die Teilchen, deren Verformungsvermögen erschöpft ist und es treten Kaltverschweißungen auf.

3. Sintern oder Glühen: Der Pulverpressling wird durch Wärmebehandlung in einen gewünschten stabilen Zustand gebracht. Dabei liegt die Sintertertemperatur von einphasigem Pulver bei  $2/3$  bis  $4/5$  der Schmelz- bzw. Solidustemperatur. Pulvermischungen werden in der Nähe oder oberhalb der Solidustemperatur gesintert. Anschließend wird der Pressling weiterverarbeitet, z. B. durch Ur- und Umformverfahren wie Schmieden oder Strangpressen.

Insbesondere durch die zunehmende Verbreitung additiver Fertigungsverfahren steigt dabei der Bedarf an hochqualitativen Metallpulvern /3/. Korngröße und Korngrößenverteilung beeinflussen dabei sowohl die Effizienz des Herstellungsprozesses als auch die Eigenschaften der Bauteile (insbesondere geometrische Genauigkeit, Oberflächengüte, Porosität, Zugfestigkeit und Härte). Die zuverlässige Charakterisierung von Metallpulvern vor und während der Verarbeitung gewinnt damit an Bedeutung.

### Grundlegende Problemstellungen der Pulvercharakterisierung

Die Pulvermetallurgie benötigt Pulver mit bestimmten Partikelmerkmalen, um Werkstücke mit den gewünschten Eigenschaften zu fertigen. In der Industrie wird Pulver mit einer optimalen Schüttdichte, Verpressbarkeit und Mischungsgüte benötigt. Die Pulvercharakterisierung kennzeichnet die Feinheit des Pulvers und beschreibt die Größe, Oberfläche und Form der Partikel. Die Form der Teilchen ist meist unregelmäßig ausgeprägt und weicht von einer Kugelform ab, daher wird zur Vereinfachung ein Äquivalentdurchmesser verwendet. Dieser vergleicht den Wert eines Feinheitsmerkmals einer unregelmäßigen Form mit einer Kugel, die unter gleichen physikalischen Bedingungen denselben Wert des Feinheitsmerkmals hat. In Abbildung 1 ist ein Überblick über die gebräuchlichen Äquivalentdurchmesser dargestellt. In Abbildung 1 sind auf der linken Seite unregelmäßig geformte Teilchen und auf der rechten Seite die Kugelgröße bzw. Kreisgrößen abgebildet, die sich durch die Wahl des Verfahrens zur Bestimmung des Äquivalentdurchmesser ergeben. Nach /2/ ist vor jeder Charakterisierung zu bestimmen, welches Feinheitsmerkmal zu untersuchen ist, dementsprechend ist die Durchmesserdefinition an das angestrebte Analyseziel zu wählen.



**Abbildung 1:** Vergleich einiger Äquivalentdurchmesser /2/

### Zusammenhang zwischen Pulvercharakteristika und Materialeigenschaften

Die Größe der im Pulver enthaltenen Partikel wirkt sich auf die Packungsdichte pulvermetallurgisch gefertigter Bauteile aus. Feine Pulver führen allgemein zu einer höheren Packungsdichte und damit zu weniger Fehlern im Materialgefüge, was Spannungsspitzen im Bauteil reduziert und die Festigkeit steigert. Weiterhin verbessert sich die Oberflächengüte gefertigter Produkte. Große Partikel erhöhen die Fließfähigkeit des Pulvers, was die Erzeugung homogener Materialien erleichtert, jedoch steigt bei der additiven Fertigung mittels grober Pulver der benötigte Energieeintrag über Laserstrahlen aufgrund der großen Partikeloberflächen. Die besten Ergebnisse hinsichtlich einer hohen Packungsdichte werden durch optimierte Mischungen aus feinen und groben Partikeln erzielt /4/. Weiterhin führt eine geringe Partikelgröße zur Bildung feinerer Körner im Gefüge gesinterter oder additiv gefertigter Metalle. Durch die sogenannte Feinkornhärtung steigt dabei die Festigkeit des Materials gemäß der Hall-Petch-Beziehung nach

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

an, wobei  $\sigma$  die Fließgrenze des feinkörnigen und  $\sigma_0$  die eines sehr grobkörnigen Materials ist,  $k$  ist eine materialabhängige Konstante und  $d$  die mittlere Korngröße /5/. Eine weitere positive Auswirkung feiner Partikel ist, dass damit produziertes Material im Allgemeinen korrosionsbeständiger ist, als Bauteile aus groben Pulvern /6/.

Weiterhin hat die Partikelform Einfluss auf die Eigenschaften pulvermetallurgisch gefertigter Bauteile. Sind die Partikel möglichst sphärisch bzw. rund geformt, steigen Packungsdichte und Fließfähigkeit, die Oberfläche der Partikel wird minimiert und dadurch der Energieeintrag zum Sintern oder Laserschmelzen gesenkt und gleichmäßiger verteilt, Korngrenzen werden verrundet, was Spannungsspitzen abbaut /4, 6/. Damit führen sphärische Partikel zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Oberflächengüte von Bauteilen.

## Verfahren zur Pulvercharakterisierung

Für die Prüfung und Charakterisierung von Pulvern existieren zahlreiche Verfahren. Einen Überblick gibt Abbildung 2. Die Verfahren sind nach der Eignung für die Teilchengröße gegliedert. Die untere Zeile beschreibt, wie die benötigte Masse der Probe mit der Teilchengröße zunimmt. Für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Charakterisierung eines Pulvers ist prinzipiell der gewählte Äquivalentdurchmesser, wie zuvor beschrieben, entscheidend. Hinzukommen die gewünschten zu untersuchenden Partikeleigenschaften, wie z. B. Größe, Größenverteilung, Form, Oberfläche, Dichte und Porosität, aber auch Aspekte wie Kosten, Aufwand und Zeit sind zu berücksichtigen /1, 2/.

Teilchengröße µm	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
Trennverfahren							Trockensiebung	
Siebanalyse						Luftstrahlsiebung		
Sichtanalyse					Nasssiebung			
				BAHCO-Sichter				
Sedimentations- verfahren				Schwerkraftsedimentometer				
			Fliehkraftsedimentometer					
Spektrometer			Laserbeugungsspektrometer					
Zählverfahren					Coulter Counter			
unmittelbare				Streulichtzähler				
				Extinktionszähler				
				Laserscanner				
				Lichtmikroskop				
mittelbare		Elektronenmikroskop				online-Bildanalyse		
Probengröße	0,0001 g .....		10 g .....	30 g .....	100 g .....	0,5 kg ....		10 kg

**Abbildung 2:** Übersicht gängiger Verfahren zur Partikelgrößenanalyse /2/

Grundsätzlich lassen sich die Verfahren auch nach ihren zu untersuchenden Parametern einteilen: *Klassifizierung von Pulvern*, *Partikelgrößenanalyse*, *Partikelformanalyse*, *Partikeloberflächenanalyse*, *Partikelgrößenverteilung* und *Porosität*. Im Folgenden werden zu jeder der genannten Analysemethoden ein Verfahren und kurz ein geeignetes Messgerät vorgestellt. Eine Kombination mehrerer Techniken ist in der Regel möglich, um somit eine umfassende Charakterisierung zu erreichen.

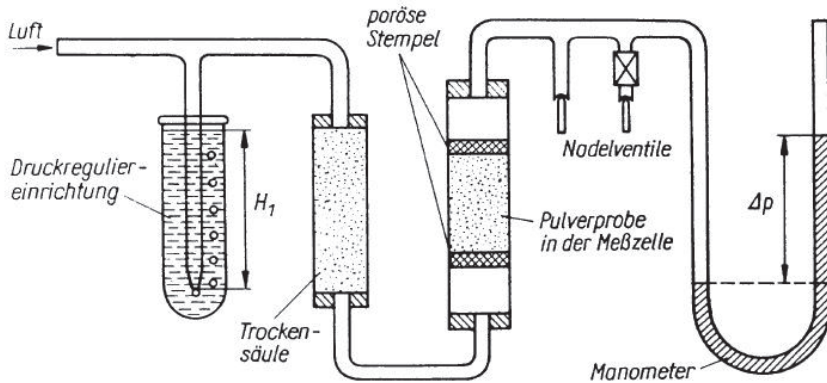
### **Klassifizierung von Pulvern**

Bei der *Klassifizierung von Rohpulvern* werden Partikel durch Siebe unterschiedlicher Maschenweite getrennt. Dabei bezeichnet man die Pulvermasse, welche das Sieb passiert hat, als Durchgang, dieser gehört dann einer Klasse zu. Die Partikel, die in den Maschen des Siebes hängen bleiben, werden als Rückstand bezeichnet /1, 2/. Durch die Klassifizierung erhält man so Aufschluss über die Teilchengröße des Durchgangs. Dies ist ein einfaches und kostengünstiges Verfahren, welches aber begrenzt in der Anwendung ist und nicht für kleine Partikel geeignet ist.

### **Partikelgrößenanalyse und Partikeloberflächenanalyse**

Die *Permeabilitätsmessung*, auch als Luftdurchlässigkeitsmessung bezeichnet, ist eine Methode zur Bestimmung von Partikelgrößen und Porosität. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass aus der Permeabilität einer Teilchenpackung mittels bestimmter Kenngrößen auf die Korngröße oder spezifische Oberfläche geschlossen werden kann. Die Pulverprobe wird durch Verpressen zu einer dichten Pulverpackung verarbeitet, die dem Durchgang eines Gasstromes einen Widerstand entgegensetzt, welcher von der Feinheit des Pulvers abhängt. Auf Grundlage dieser Charakterisierungsmethode arbeitet z. B. das Fisher Subsieve Sizer, welches schematisch in Abbildung 3 dargestellt ist. Es hat seinen Ursprung in den 1940er Jahren und sich somit in der Industrie bewährt. Mit diesem Permeameter werden prozessmäßige Kontrollmessungen mit geringem zeitlichem Aufwand durchgeführt. Das Messgerät arbeitet mit Luft, die in das Permeameter gepumpt und unter konstanten Druck gehalten wird /1/. Die Pulverprobe wird in einem genormten Röhrchen zwischen zwei luftdurchlässigen porösen Stempeln verdichtet. Über eine Höhenmessung der Pulverprobe kann die Porosität bestimmt werden und der erzeugte Druckabfall beim Luftdurchgang wird am Manometer abgelesen. Abschließend wird mit der Gleichung nach Carman-Kozeny die durchschnittliche Korngröße oder die spezifische Oberfläche berechnet. Mit dem Fisher Subsieve Sizer können Partikelgrößen im Bereich von 0,2 – 75 µm bestimmt werden.





**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau des Fisher Subsize Sizer /1/

Das Micromeritics Subsize AutoSizer II 5800 der Micromeritics GmbH ist ein modernisierter Nachfolger des Fisher Subsize Sizer. Es ermöglicht eine Digitalisierung der Messwerte und vereinfacht die Handhabung durch eine Automatisierung der Messung.

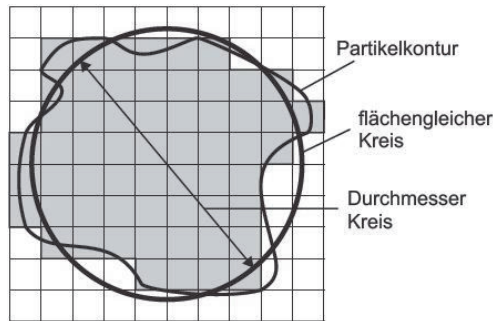


**Abbildung 4:** Micromeritics Subsize AutoSizer II 5800 von Micromeritics GmbH /1/

### Partikelformanalyse

Die Partikelform kann mithilfe von *mikroskopischen Zählverfahren* bestimmt werden. Dazu wird ein Lichtmikroskop oder ein Elektronenmikroskop zur optischen Vergrößerung der Partikel verwendet. Die Partikel werden auf einen Objektträger aufgebracht. Dabei ist es notwendig, dass diese einzeln unterscheidbar sind, was aufwendige Präparierarbeiten erfordert. Die Probe wird entweder direkt durch das

Gerät vermessen oder ein Bild wird mit einer Kamera aufgezeichnet, man erhält einen hoch Auflösenden Einblick in die Partikelstruktur. Dies wird im Anschluss in der Bildanalyse ausgewertet. Dabei wird wie in Abbildung 3 ein Raster über das Bild gelegt und die hellen oder dunklen Felder werden gezählt. Durch Algorithmen werden einzelne und zusammenhängende Strukturen erkannt, sodass sich die Durchmesser der jeweils flächengleichen Kreise ermitteln lassen /2/.



**Abbildung 5:** Flächengleicher Kreis bei der Bildanalyse /2/

Das Desktop-REM JCM-700 vom Hersteller JEOL GmbH ist ein Rasterelektronenmikroskop und eignet sich zur Prüfung von Partikelformen. Es bietet eine Vergrößerung bis x100.000 und kann vollautomatisierte Aufnahmen von REM-Abbildungen und Elementverteilungsbildern anfertigen. /8/

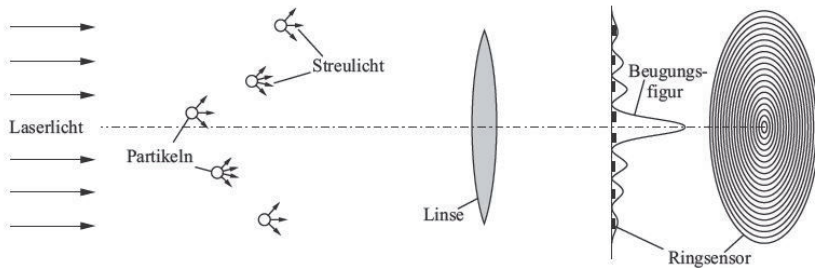


**Abbildung 6:** Desktop-REM JCM-700 vom Hersteller JEOL GmbH /8/

### Partikelgrößenverteilung

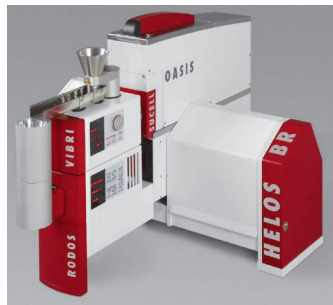
*Laserbeugungsspektrometer* registrieren mit einem Laserstrahl viele Teilchen gleichzeitig und jedes dieser Teilchen liefert abhängig von seiner Größe und Form eine charakteristische Streulichtverteilung. Überlagern sich Streulichtverteilungen von vielen unterschiedlichen Partikeln, entsteht ein Beugungsmuster. Dieses Muster

kann mit mathematischen Verfahren auf die Partikelgrößenverteilung zurückgerechnet werden. Ein wesentlicher Vorteil von Laserbeugungsspektrometern ist, dass viele Partikel gleichzeitig gemessen werden können und eine Vereinzelnung, wie bei der Mikroskopie, nicht notwendig ist. Dabei kann ein großes Spektrum von sehr kleinen bis sehr großen Partikeln bestimmt werden /2/.



**Abbildung 7:** Prinzip des Laserbeugungsspektrometers /2/

Das Laserbeugungsspektrometer HELOS des in Clausthal-Zellerfeld im Harz ansässigen Unternehmens Sympatec GmbH ist ein etabliertes Messgerät, welches die Partikelverteilung, aber auch eine Partikelgröße von  $< 0,1 \mu\text{m}$  bis  $8.750 \mu\text{m}$  bestimmen kann /8/

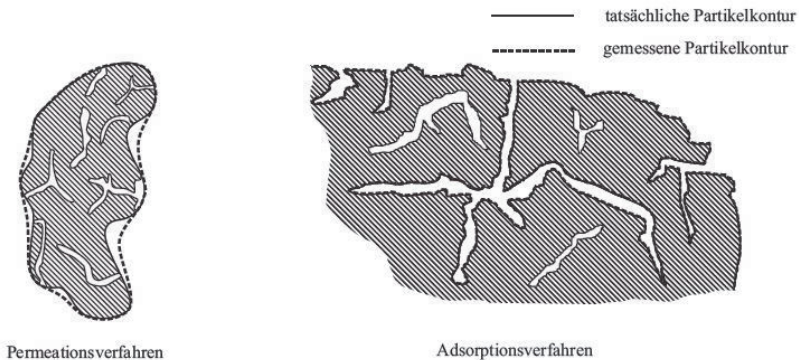


**Abbildung 8:** Laserbeugungsspektrometer HELOS von Sympatec GmbH mit Dispergier-Zusatzgerät OASIS /9/

### Porosität

Das *Gasadsorptionsverfahren* erfasst innere und äußere Oberflächen, siehe Abbildung 9. Das zu untersuchende Pulver wird in eine inerte Gasatmosphäre gegeben und im Anschluss auf sehr tiefe Temperaturen heruntergekühlt. Ein Teil der Gasmoleküle wird dabei von der Oberfläche adsorptiv gebunden. Die dadurch resultierende Volumenminderung des Gases senkt den Druck im Behälter. Die

Druckdifferenz wird gemessen und mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung und der Avogadro-Konstante lässt sich die Anzahl der gebundenen Gasmoleküle berechnen. Abschließend wird die Oberfläche aus dem Flächenbedarf ermittelt, welcher aus einer einschichtigen und gleichmäßigen Bedeckung der Oberfläche mit Molekülen entsteht. Die durch das Gasadsorptionsverfahren gemessenen Partikeloberflächen sind in der Regel deutlich größer als mittels Durchströmungsverfahren bestimmte Werte /1, 2/. Aus den Messwerten wird anschließend die Porosität bestimmt.



**Abbildung 9:** Gemessene Oberflächen bei Durchströmungsverfahren (links) und Gasadsorptionsverfahren (rechts) /2/

Das TriStar II Puls der Micromeritics GmbH ist ein Hochdurchsatz-Oberflächen- und Porositätsanalysator. Mit dem Gerät können Oberflächengrößen von bis zu  $0,01 \text{ m}^2/\text{g}$  mittels eines Stickstoffsystems gemessen werden. Das Messgerät hat drei Stationen für effiziente Qualitätskontrollanalysen /10/.



**Abbildung 10:** TriStar II Puls von Micromeritics GmbH /10/

## Vor- und Nachteile betrachteter Verfahren

Die zuvor betrachteten Verfahren wurden hinsichtlich ihres Aufwands in der Vorbereitung, des Bedarfs an teuren Messgeräten, der benötigten Zeit zur Vermessung einer Probe und des Umfangs der aus den Messergebnissen ableitbaren Pulvercharakteristika analysiert. Daraus wurden Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren abgeleitet, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Einige Verfahren bieten besonders umfangreiche Informationen hinsichtlich der Pulvercharakteristika, wie zum Beispiel die Ermittlung der Größenverteilung mittels Laserbeugung oder mikroskopische Zählverfahren. Aufgrund des hohen Aufwandes in der Durchführung und relativ teurer benötigter Messgeräte sind diese Verfahren eher für vereinzelte Stichproben in der Industrie zwecks genauerer Analysen oder im wissenschaftlichen Bereich geeignet. Zur regelmäßigen Kontrolle von Metallpulvern, z. B. in Fertigungsbetrieben, sind Verfahren mit möglichst hohen Probendurchsatz, kleinem Personalaufwand zur Kostensenkung und weniger umfangreichen Messergebnissen erforderlich. Hier eignet sich z. B. das Permeabilitätsverfahren zur mittleren Partikelgrößenermittlung, um Materialien und Fertigungsprozesse durch einfache aber aussagekräftige Kennwerte zu überprüfen. Sehr simple Verfahren, wie die Klassifizierung von Pulvern, können hingegen nur grobe Aussagen zu einzelnen Pulvercharakteristika treffen, was zur Prozessoptimierung häufig nicht genügt.

**Tabelle 1:** Vor- und Nachteile der Messverfahren

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Klassifizierung (z.B. Siebverfahren)	günstiges Verfahren; einfache Anwendung	sehr grobe Bestimmung Partikelgröße und -verteilung
Partikelgrößenanalyse (z.B. Permeabilitätsverfahren)	schnelles und etabliertes Verfahren	nur Bestimmung mittlerer Partikelgröße + Porosität
Partikelformanalyse (z.B. mikroskopisches Zählverfahren)	Form, Größe und Verteilung der Partikel wird bestimmt	kleine, aufwändig präparierte Proben; langsames Verfahren
Partikelgrößenverteilung (z.B. Laserbeugung)	Größe und Verteilung Partikel wird bestimmt	teures Verfahren; relativ aufwändig
Porositätsermittlung (z.B. Gasadsorption)	Präzise Porositätsbestimmung	Partikelgröße bleibt unbekannt

## Zusammenfassung und Ausblick

In der industriellen Fertigung gewinnen Metallpulver zunehmend an Bedeutung, insbesondere durch Fortschritte in der additiven Fertigung mittels Selective Laser Melting oder etablierte Verfahren wie dem Sintern. Dabei haben Pulvercharakteristika wie Partikelgröße und -form, Partikelgrößenverteilung und Porosität

einen großen Einfluss auf die Materialeigenschaften der hergestellten Bauteile. So können unter anderem durch sehr feine Partikel die Festigkeit, Oberflächengüte und Korrosionsbeständigkeit gesteigert werden. Es existieren eine Vielzahl an Verfahren, um die verschiedenen Pulvercharakteristika zu ermitteln, unter anderem das mikroskopische Zählverfahren, die Laserbeugungsspektrometrie oder das Permeabilitätsverfahren. Sie unterscheiden sich bezüglich Kosten und Aufwand in der Durchführung, aber auch hinsichtlich ihres Umfangs an ermittelten Informationen zum untersuchten Metallpulver, wobei keines detaillierte Informationen zu allen Pulvercharakteristika liefert und dazu Pulver durch mehrere Verfahren untersucht werden müssen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Vor- und Nachteile der Messverfahren. Abhängig von zu messender Pulvereigenschaft, verfügbarer Zeit je Messung, sowie der zulässigen Kosten ist ein geeignetes Verfahren zu wählen. Während im wissenschaftlichen Bereich Verfahren wie die Laserbeugungsspektrometrie oder optische Zählverfahren wegen des hohen Informationsgehaltes der Ergebnisse Anwendung finden, können in Industrieanwendungen auch Verfahren wie die Permeabilitätsmessung sinnvoll sein. Hier sind Aufwand, benötigte Zeit und damit Kosten deutlich niedriger gegenüber den vorgenannten Verfahren. Der geringere Informationsumfang, wie zum Beispiel eine durchschnittliche Partikelgröße anstelle einer präzisen Partikelgrößenverteilung, kann dennoch genügen, um Fertigungsprozesse zu kontrollieren oder die Materialqualität abzusichern.

In weitergehenden Untersuchungen soll das Permeabilitätsverfahren hinsichtlich seines Ablaufes und seiner Genauigkeit optimiert werden. Bis heute wird in Industriebetrieben der Fisher Subsize Sizer zur Pulververmessung genutzt, obwohl dieses Gerät bereits in den 40er Jahren entwickelt wurde und seitdem kaum verändert worden ist. Zusammen mit Industriepartnern sollen Möglichkeiten zur Automatisierung des Permeabilitätsverfahrens und der Verbesserung seiner Genauigkeit mittels moderner Messtechnik analysiert werden. Durch Versuchsmessungen an einem eigens dazu konstruierten Prüfstand sollen Verbesserungskonzepte überprüft und schließlich im realen Industrieumfeld getestet werden. Daraus resultierende Fortschritte in der Charakterisierung von Pulvern können für die Verbesserung der Materialqualität und der Fertigungsprozesse genutzt werden.

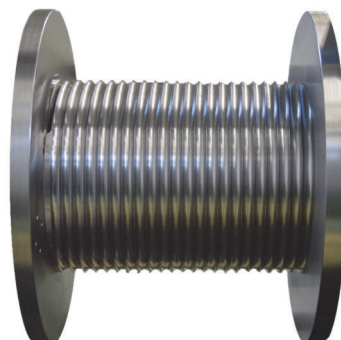
## Literatur

- /1/ Schatt, W.; Wieters, K.; Kieback, B.: Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe. Springer, Berlin, 2007, ISBN 978-3-54-023652-8
- /2/ Müller, W.: Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten. De Gruyter Oldenbourg, München, 2014, ISBN 978-3-11-034344-1
- /3/ Wohlers, T.T., Campbell, I., Diegel, O., Huff, R., Kowen, J.: Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry. Wohlers Associates, Fort Collins, 2023, ISBN 978-1-6220-4966-0
- /4/ Muthuswamy, P.: Influence of powder characteristics on properties of parts manufactured by metal additive manufacturing. In: Lasers in Manufacturing and Materials Processing. Volume 9, S. 312–337, 2022, <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00177-3>
- /5/ Bohn, T.: Gefüge und mechanische Eigenschaften verzweigter Blechstrukturen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2010
- /6/ EPMA: Introduction to Metal Injection Moulding. 4<sup>th</sup> Edition, European Powder Metallurgy Association, 2018
- /7/ Micromeritics: MIC SAS II Micromeritics Sub-Sieve AutoSizer II Air-Permeability Particle Size. Micromeritics Instrument Corporation, 2017
- /8/ <https://www.jeol.de/electronoptics/produktgruppen/elektronen-ionenoptische-systeme/rasterelektronenmikroskope/rem-thermische-kathode/jcm-7000.php> (Stand 05.12.2023)
- /9/ Sympatec: HELOS, RODOS & Co. Sympatec GmbH, 2021
- /10/ Micromeritics: TriStar II Plus Surface Area and Porosity Analyzer. Micromeritics Instrument Corporation, 2020

## Erfassung der Trommelspannungen einer mit Faserseil bewickelten Seiltrommel in der Mehrlagenwicklung

Küster D.; Stök M.; Lohrengel A.

*Aktuelle Forschungsaktivitäten im Bereich hochleistungsfähiger Faserseile und der Nutzung kleinerer, gewichtsoptimierter Seiltrommeln benötigen gelegentliche Optimierung der genutzten Prüfeinrichtungen am IMW. Die innen hohlgedrehten Trommeln bieten eine Möglichkeit zur Anpassung des Wickelprüfstands. Die Erfassung der Spannungen innerhalb des Trommelmantels und der Bordscheiben erfolgte lange Zeit mithilfe von Telemetrie und HF-Signalen aus dem Trommelinneren. Diese potenzielle Fehlerquelle mit gelegentlichen Störungen bei der Übertragung wurde durch ein innovatives Messsystem erfolgreich ersetzt und bereits zuverlässig in mehreren Wickelversuchen getestet.*



*Current research in the field of high-performance fibre ropes and the use of weight-optimised rope drums necessitate occasional optimisation of IMW's testing equipment. The hollow-twisted drums present an opportunity to modify the winding test rig. Telemetry and HF signals were previously used to record tensions inside the drum shell and flanged discs for an extended duration. This potential error source, occasionally causing interference during transmission, has been replaced by an innovative measuring system. The system has been thoroughly tested in multiple winding trials with reliable results.*

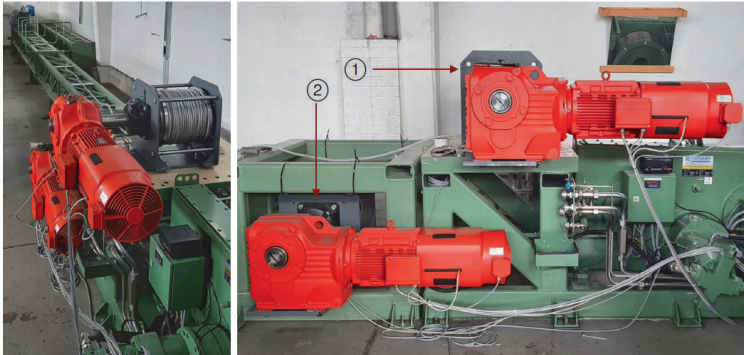
### Einleitung

Die Forschung an Seiltrommeln und Drahtseilen hat am Institut für Maschinenwesen eine lange Tradition. Im Vergleich zu früheren Zeiten sind die Schwerpunkte der Forschungen um die Thematik hochleistungsfähiger Faserseile gewachsen. Diese Seile besitzen das Potenzial, konventionelle Stahldrahtseile in verschiedenen Anwendungen ersetzen zu können. Die bisherige Forschung im Bereich von Seiltrommeln mit mehreren Lagen, die Faserseile verwenden, hat bedeutende Unterschiede im Verhalten der Trommel und des Seils im Vergleich zu Drahtseilen aufgezeigt. Das bereits bekannte Wissen über Stahldrahtseile lässt sich nicht einfach auf die Interaktion mit Faserseilen übertragen. Ein beobachtetes Phänomen ist beispielhaft die höhere Belastung der Bordscheiben als Folge von Seilovalisierung. Diese veränderte Dynamik lässt sich auf die spezifischen Eigenschaften der Seile zurückführen. Die Kenntnis des Verhaltens bestimmter Seilcharakteristika sowie die Auswirkungen einer Änderung der Zugmittel-



Eigenschaften auf die Beanspruchung der Seiltrommel sind für eine betriebssichere Auslegung der verwendeten Trommeln von essenzieller Bedeutung. Im Rahmen experimenteller Untersuchungen ist es unabdingbar, die eingesetzten Prüfstände kontinuierlich zu optimieren. Dabei steht stets der Anspruch im Vordergrund, potenzielle Fehlerquellen zu identifizieren und aus der Messkette zu eliminieren.

### Wickelprüfstand des IMW



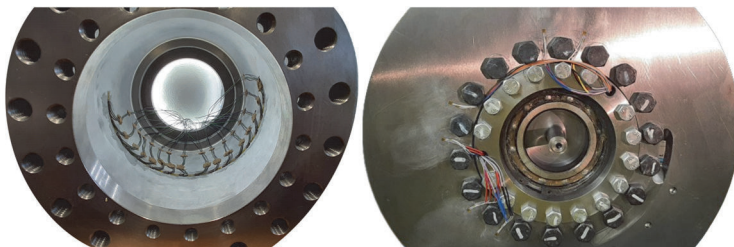
**Abbildung 1:** Wickelprüfstand am Institut für Maschinenwesen zum Hin- und Herspulen des Zugmittels

Für die Untersuchung von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln steht der institutseigene Wickelprüfstand zur Verfügung, wie in Abbildung 1 dargestellt. Der Prüfstand besteht hauptsächlich aus einer oberen (1) und einer unteren (2) Seiltrommel, zwei E-Motoren für das Verfahren des Seils und das Aufbringen der Seilkraft, einer Steuereinheit sowie einem Rechner, der die Prüfsoftware beherbergt. Die Steuerung des Prüfstands ermöglicht es, je nach Verfahrriichtung einen Motor als Antrieb zu nutzen und den anderen als Bremse einzusetzen. Der bremsende Motor fungiert dabei als Generator, und die erzeugte Spannung wird zur Versorgung des Motors verwendet. Diese Konfiguration macht den Prüfstand äußerst energieeffizient, da nur die Verluste durch Fremdeinspeisung ausgeglichen werden müssen. Die Erfassung der Spannungen innerhalb des Trommelmantels sowie der Bordscheiben erfolgte lange Zeit über die Nutzung einer Nahfeldtelemetrie. Bedingt eines fortgeschrittenen Alters der Messanlage und zunehmenden Störungen mit drohendem Datenverlust wurde die Messwerterfassung umkonstruiert und neue Hardware angeschafft.

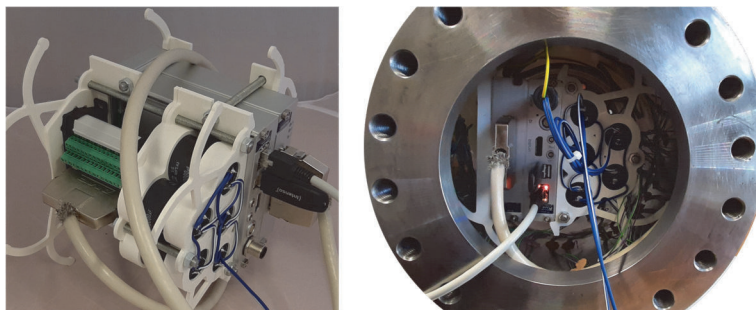
### Trommelaufbau und Messdatenerfassung

Die bei Wickelversuchen genutzte Seiltrommel setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Zu den Komponenten gehören das hohlgedrehte Mantelteil mit Lebusrilling und die beiden Bordscheiben. Die Trommel ist im

Vergleich zu früheren eine gebaute Trommel. Der Zusammenbau erfolgt durch Verschraubung der Einzelkomponenten. Zur Erfassung der Tangentialspannungen im Mantel wird die Trommel in ihrem Inneren mit 16 linearen Dehnungsmessstreifen beklebt. Die Bordscheibe wird im Anlagebereich der ersten Seillage mit insgesamt 12 Dehnungsmessstreifen beklebt. Alle DMS sind dabei so angebracht, dass zum einen der Kreuzungs- und auch der Parallelbereich erfasst werden kann, vgl. Abbildung 2.

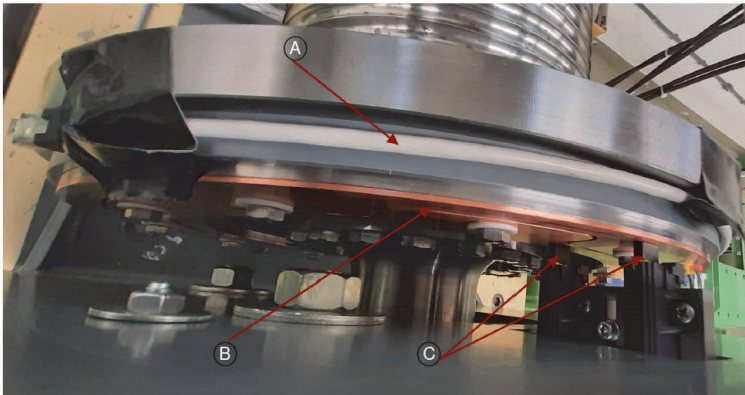


**Abbildung 2:** DMS innerhalb der Trommel links und an der Bordscheibe rechts



**Abbildung 3:** Messpaket links, integriertes Messpaket in der rotierenden Trommel

Das vollständige Messwerterfassung besteht aus Dehnungsmessstreifen (DMS), einem Anschlussstecker, dem Messverstärker mit Speichermedium, einem Kondensatorenpaket sowie den Anschlüssen für Datenübertragung und Spannungsversorgung. Das Kondensatorenpaket dient dazu, kurzzeitige Ausfälle der Spannungsversorgung zu überbrücken. Mithilfe von 3D-gedruckten Kunststoffteilen und Klebstoff wird das gesamte Messpaket, wie in Abbildung 3 dargestellt, im Inneren der Trommel fixiert. Die Spannungsversorgung und das Netzkabel müssen während des Zusammenbaus der Trommel verlegt werden. Das Netzkabel (A) wird durch Kanäle innerhalb der Bordscheiben nach außen geführt, dort befestigt und kann mit der Trommel rotieren. Eine Verbindung zu nicht rotierenden Komponenten erfolgt nur bei einem Stillstand der Trommel.



**Abbildung 4:** Spannungversorgung und Möglichkeit zur Datenübertragung

Die Anschlusskabel werden ähnlich zur Außenseite der Bordscheibe verlegt und dort mit den installierten Schleifringen (B) verbunden. Über ein Netzteil wird die Versorgungsspannung zu den Kohlebürsten (C) geleitet, die mit einem Federmechanismus gegen die Schleifringe gedrückt werden. Auf diese Weise wird die erforderliche Spannung für den Messverstärker zuverlässig übertragen. Die Installation des Netzkabels, der Schleifringe und der Kohlebürsten wird in Abbildung 4 dargestellt. Um die Messdaten vom Speichermedium des Messverstärkers bei gestopptem Prüfstand abzurufen, steht ein Messlaptop zur Verfügung. Über das Netzkabel kann eine Verbindung hergestellt werden. Zudem ermöglicht die zur Software des Messverstärkers gehörige Anwendung den Zugriff auf die Einstellungen des Messverstärkers.

### Zusammenfassung

Die Forschungsaktivitäten am Institut für Maschinenwesen konzentrieren sich unter anderem auf hochleistungsfähige Faserseile und deren Veränderungen während der Nutzungsphase sowie auf die Auswirkungen dieser Änderungen auf das Belastungsszenario von Seiltrommeln. Um die Prüfeinrichtungen zu optimieren und mögliche Fehlerquellen zu minimieren, wird in diesem Beitrag die Modifikation der Messwerterfassung für die Spannungen innerhalb des Trommelmantels und der Bordscheibe beschrieben. Hierfür wird der Hohlraum gewichtsoptimierter und somit innen hohlgedrehter Seiltrommeln zur Integration eines vollständigen Messpakets genutzt. Durch dieses Vorgehen konnte die bisherige Messwerterfassung mit Telemetrie und HF-Signalen, die gelegentlich Störungen verursachte, erfolgreich durch ein innovatives Messsystem ersetzt und in mehreren Wickelversuchen getestet werden. Die Grundidee, das Messwerterfassungssystem innerhalb der Trommel mit rotieren zu lassen und die Spannungversorgung über Kohlebürsten zu realisieren konnte neben dem Prüfstand bereits auch in einer Seiltrommel eines Industriepartners umgesetzt werden und ist somit ortsunabhängig einsetzbar.

## Energy Harvesting in rotierenden Maschinenelementen

Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.

*Im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 2305 „Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung“ wird als ein Teilaspekt untersucht, wie mittels Energy Harvesting die im System vorhandene Energie genutzt werden kann, um Sensoren und eine integrierte Auswerteelektronik in rotierenden Antriebselementen mit elektrischer Energie zu versorgen. Dazu wurden Vorversuche mit kleinen permanentenregten DC-Maschinen im Generatorbetrieb durchgeführt.*

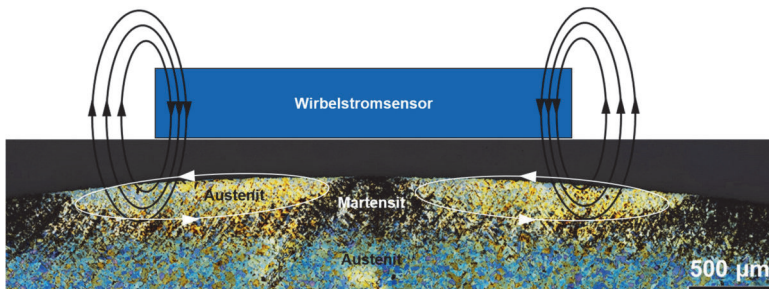


*As a part of the DFG priority program 2305, "Sensor-integrating machine elements as a pioneer of comprehensive digitalization", researchers are investigating the use of energy harvesting to supply sensors and integrated evaluation electronics in rotating drive elements with electrical energy while making use of the energy available in the system. Therefore, preliminary tests have been carried out using small permanently excited DC machines in generator mode.*

### Einleitung

Um den Ermüdungszustand von Maschinenelementen zu untersuchen, werden Sensoren eingesetzt. Bisher ist es notwendig die Sensoren über Kabel mit der Auswerteelektronik und der Energieversorgung zu verbinden. Die erfassten Daten müssen ebenfalls über eine Kabelverbindung oder durch eine Funkverbindung übertragen werden. Die Sensoren sind oft an schwer zugänglichen Stellen montiert. Dies macht die Wartung und den Batteriewechsel aufwendig oder es müssen unwirtschaftliche Übertragungsmöglichkeiten wie Schleifringe für die Stromversorgung eingesetzt werden, bei denen die Schleifkontakte durch auftretende Verschleißerscheinungen ebenfalls regelmäßig ersetzt werden müssen.

Für eine einfache, wartungsarme im Maschinenelement integrierte Energieversorgung bietet sich das Energy Harvesting an. Dieser Begriff beschreibt die Nutzung von im System vorhandener Energie und deren Umwandlung, um beispielsweise Sensoren oder Mikroelektronik mit elektrischer Energie zu versorgen. Im Idealfall, wenn die Sensordaten per Funk übertragen werden, kann dann auf aufwendige Lösungen wie den Einsatz von Schleifringen gänzlich verzichtet werden. Dadurch können Wartungen vermieden oder deren Häufigkeit reduziert werden.



**Abbildung 1:** Querschnitt eines exemplarischen sensorischen Werkstoffs mit stark vereinfachter Darstellung der Funktionsweise des Wirbelstromsensors

Im Rahmen des Teilprojekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ des DFG Schwerpunktprogramms (SPP) 2305 wird die Belastung der Zahnwelle durch einen Werkstoffsensor erfasst. Ein Teilziel besteht darin, die erforderliche elektrische Energie durch Energy Harvesting zu gewinnen. Die Stromversorgung muss dabei ausreichend Leistung zur Verfügung stellen, um die auf dem Werkstoffsensor angebrachte Wirbelstromspule, sowie die Bauteile zur Datenauswertung und -übertragung zu versorgen. Dazu ist eine Leistung in Höhe von 1,25 W während des Auslese- und Übertragungsvorgangs notwendig. Ein Querschnitt durch einen solchen Werkstoffsensor ist in Abbildung 1 dargestellt.

### Literaturrecherche

In /1/ wird eine Übersicht über die nutzbaren physikalischen Effekte für das Energy Harvesting gegeben und wie diese kategorisiert werden können. Nutzbar sind beispielsweise Relativbewegungen, Temperaturdifferenzen, Licht, elektromagnetische Strahlung und chemische Energie. Im Getriebe treten Relativbewegungen, mechanische Schwingungen und Temperaturunterschiede auf. Für den Einsatz in rotierenden Maschinenelementen bieten sich somit der piezoelektrische, elektromagnetische und der thermoelektrische Effekt (Seebeck-Effekt) an.

Die erzielbare Leistung hängt von dem physikalischen Effekt sowie vom verwendeten Energiewandler ab und reicht von einigen  $\mu\text{W}$  bis zu einigen Watt /2/. Im Anwendungsfall rotierender Antriebswellen besitzt die elektrodynamische Energieumwandlung nach /2/ die höchste nutzbare Leistung, gefolgt von den Thermogeneratoren und den Piezoelementen.

In /3/ werden ebenfalls verschiedene Methoden des Energy Harvesting verglichen. Dabei wird aufgezeigt, dass ein Nachteil der Nutzung des piezoelektrischen Effekts die starke Variabilität der Ausgangsleistung, abhängig vom Betriebszustand, ist. Dem gegenüber stehen bei Nutzung der thermischen Energie eine kontinuierliche

Energieversorgung bei vorhandenem Temperaturunterschied, sowie Langlebigkeit und Zuverlässigkeit. Allerdings hängt die nutzbare elektrische Energie stark vom Temperaturgradienten ab und fällt bei geringen Temperaturdifferenzen sehr gering aus. Die nutzbare Leistung wird durch den geringen Wirkungsgrad der Methode noch weiter reduziert.

Aus diesen Gründen wird für das weitere Vorgehen der elektromagnetische Effekt genutzt. Ziel ist es, einen Generator in eine Zahnwelle zu implementieren. Ein Beispiel ist im Titelbild dargestellt. Dazu wird die Zahnwelle als Hohlwelle ausgeführt. Dieses Vorgehen ist ideal, da das Material im Inneren der Zahnwelle unter Torsionsbelastung kaum beansprucht wird und deshalb entfernt werden kann. In /4/ wird als Grenze angegeben, dass Bohrungen mit einem Durchmesser von  $0,33 d_B$  ( $d_B$  = Bezugsdurchmesser der Zahnwelle) nahezu keine Spannungserhöhung hervorrufen und dass ein Bohrungsdurchmesser von  $0,5 d_B$  die Beanspruchung im Zahnfuß um weniger als 10 % erhöht. Die Grenzen des maximal möglichen Bauraums für die Generatoren werden hierdurch klar festgelegt. Der Generator (schwarz) ist über sein Gehäuse starr mit der Zahnwelle verbunden, das Gehäuse rotiert demnach mit der Zahnwelle. Um elektrische Energie induzieren zu können, muss die Rotorwelle des Gleichstrommotors fixiert werden. Dies wird durch eine träge Masse (grau, halbrund) erreicht, welche mit der Rotorwelle des Generators verbunden ist. Wenn die Zahnwelle rotiert, bleibt die Masse in Ruhe.

### Durchgeführte Versuche

Für die Vorversuche wurden verschiedene Gleichspannungs-Elektromotoren mit Permanentmagnet, die in Tabelle 1 mit den jeweiligen Kennzahlen aufgelistet sind, generatorisch betrieben.

In Umkehrung zum Anwendungsfall in der Zahnwelle wurde jedoch die Rotorwelle angetrieben und das Gehäuse fixiert, da dadurch der erste Prüfaufbau vereinfacht werden konnte. Die erzeugte elektrische Leistung der Generatoren wurde durch die Verwendung von zwei Multimetern (Strom- und Spannungsmessung) gemessen. Zusätzlich wurde die Drehzahl in den Schritten 170, 240, 355, 560, 800, 1180, 1700, 2400 sowie 3550 Umdrehungen pro Minute variiert.

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Energy Harvesting Mechanismus in der Zahnwelle soll für den Betrieb der Wirbelstromspule und der Auswerteelektronik eine Leistung von 1,25 W generieren. Diese Leistung wird als „Erforderliche Mindestleistung“ im Diagramm dargestellt. Es ist ersichtlich, dass drei Motoren diese Leistung oberhalb einer Mindestdrehzahl kontinuierlich bereitstellen können. Der Getriebemotor IG420014-25271R generiert bereits bei sehr niedrigen Drehzahlen genug elektrische Energie, um die kontinuierliche Stromversorgung sicherstellen zu können. Jedoch ist der Drehzahlbereich begrenzt, als Nennzahl sind 420 U/min angegeben /5/. Weiterhin wird dabei das größte Schleppmoment erzeugt, da ein Getriebe genutzt wird. Dadurch wird eine entsprechend große träge Masse benötigt, um die Rotorwelle im Anwendungsfall in



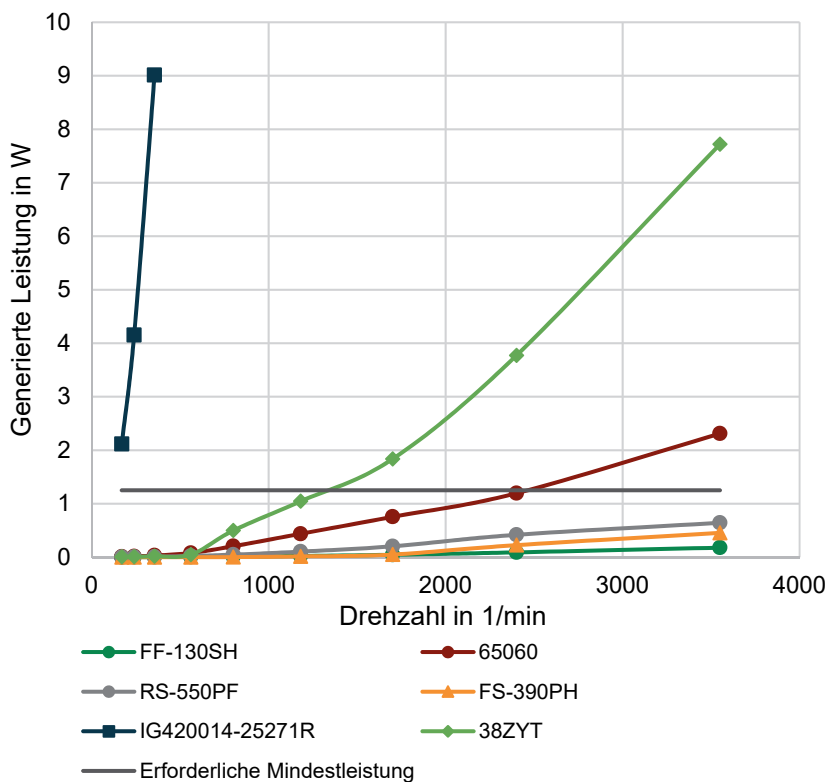
Ruhe halten zu können. Aus diesem Grund ist der Getriebemotor nur für sehr große langsam laufende Zahnwellen geeignet.

**Tabelle 1:** *Verwendete Elektromotoren /5-7/*

Bezeichnung	65060-9167AH	FS - 390PH	FF - 130SH	RS - 550PF	38ZYT	IG420014 25271R
Hersteller	Johnson Electric	Mabuchi Motor Co. Ltd.	Mabuchi Motor Co. Ltd.	Mabuchi Motor Co. Ltd.	Ningbo Leison Motor Co. Ltd	Tru Components
Bauart	DC-Motor	DC-Motor	DC-Motor	DC-Motor	DC-Motor	DC-Getriebemotor (i=1:14)
Nenn Drehzahl [1/min]	5400	11.330	6060	15.000	2800	420
Spannung [V]	13,6	12	6	12	24	24
Stromstärke [mA]	170	2650	230	900	600	< 2100
Leistung [W]	n.a.	21,6	0,76	n.a.	9	34,7
Durchmesser [mm]	37	28,5	20,5	37	38	45

Die Motoren 65060 und 38ZYT übertreffen die notwendigen Leistungsanforderungen ebenfalls, jedoch erst mit Erreichen üblicher Betriebsdrehzahlen von Asynchronmaschinen. Der Motor 65060 erreicht die erforderliche Leistung bei etwa 2500 U/min, während der Motor 38ZYT diese bereits ab 1300 U/min erreicht. Demnach sind diese Motoren ab den entsprechenden Drehzahlen in der Lage die erforderliche Leistung kontinuierlich zu liefern. Als kritisch erweist sich der Drehzahlbereich unter 1300 U/min. Für diesen Bereich liefert keiner der Motoren ohne Getriebe genug Leistung, um eine kontinuierliche Stromversorgung sicherstellen zu können.

Da die Sensoren und zugehörigen elektronischen Bauteile allerdings häufig nicht durchgehend mit der genannten Leistung versorgt werden müssen, können über zusätzliche Speicher die zeitweise notwendigen Leistungen bereitgehalten und von weniger leistungsfähigen Generatoren über längere Ladezeiten gesammelt werden. Diese Vorgehensweise mit einem zusätzlichen Ladungsspeicher ist auch sinnvoll einsetzbar, wenn Maschinen mit deutlich unterschiedlichen Drehzahlen betrieben werden oder auch bereits während eines Anfahrvorgangs eine Datenaufnahme und -übertragung sichergestellt werden soll.



**Abbildung 2:** Generierte Leistung in Abhängigkeit von der Drehzahl für verschiedene Motoren sowie erforderliche Mindestleistung

### Zusammenfassung

Für diese Betrachtung wurden Voruntersuchungen zur Leistungsabgabe von permanenterregten DC-Motoren im Generatorbetrieb durchgeführt. Generell zeigt sich, dass die untersuchten Motoren ab 1300 U/min (38ZYT) beziehungsweise ab 2500 U/min (65060) die zum Betrieb der Wirbelstromspule erforderliche Leistung kontinuierlich bereitstellen können. Dies ermöglicht einen dauerhaften Sensor- und Übertragungsbetrieb ab den jeweiligen Drehzahlen. Unterhalb dieser Grenzdrehzahlen könnte ein Akku verwendet werden, der im Betrieb geladen werden muss und nur bei Bedarf die benötigte Leistung abgeben kann. Ein Dauerbetrieb unterhalb von 1300 U/min ist ausschließlich mit dem untersuchten Getriebemotor möglich, jedoch nur in einem begrenzten Drehzahlbereich und verbunden mit weiteren Einschränkungen. Dazu zählen unter anderem die große



erforderliche träge Masse zur Fixierung der Rotorwelle sowie die Dimensionen des Getriebemotors selbst.

Im weiteren Vorgehen sind Versuche in einer rotierenden Welle geplant, die Aufschluss zu den notwendigen trägen Massen und deren Verhalten bei instationärem Betrieb geben sollen. Daneben wird untersucht, inwiefern Thermoelemente und Piezoelemente zur Erzeugung elektrischer Leistung in rotierenden Antriebselementen genutzt werden können. Eine denkbare Lösung könnten Thermoelemente im Anfahrbetrieb sein, der meist durch deutliche Temperaturgradienten gekennzeichnet ist, die im stationären Betrieb dann durch Generatoren abgelöst werden. Weitere Kombinationen von verschiedenen Energy Harvesting Mechanismen sind ebenfalls denkbar.

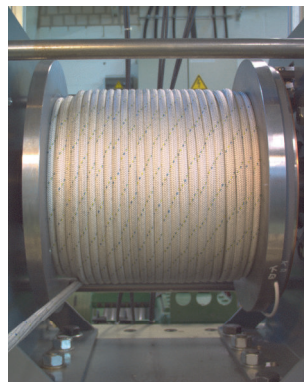
## Literatur

- /1/ M. Kiziroglou, E. Yeatman: 17 - Materials and techniques for energy harvesting, In Woodhead Publishing Series in Energy, Functional Materials for Sustainable Energy Applications; S. 541-572, 2012, <https://doi.org/10.1533/9780857096371.4.539>
- /2/ K. Dembowski: Energy Harvesting für die Mikroelektronik, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2011, ISBN 978-3-8007-3799-4
- /3/ Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.: Low Cost Sensors – Trendstudie Low Cost Sensors – Forschungsvorhaben Nr. 899 I, Heft 1422, 2021
- /4/ G. Schäfer: Kerbspannungen von Passverzahnungen auf Hohlwellen, in Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Band 41, 2017, DOI: 10.21268/20190528-16
- /5/ TRU Components, Datenblatt Gleichstrom-Getriebemotor IG420014-25271R, <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001601533DS00/datenblatt-1601536-tru-components-ig420014-25271r-gleichstrom-getriebemotor-24-v-2100-ma-0529559-nm-420-umin-wellen-durchmesser-8-mm.pdf>, abgerufen am 04.12.2023
- /6/ Ningbo Leison Motor Co. Ltd, Datenblatt DC-Motor 38ZYT, [https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/DATASHEET38ZYT\\_A.pdf](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/DATASHEET38ZYT_A.pdf), abgerufen am 04.12.2023
- /7/ Mabuchi Motor Co. Ltd., Datenblatt FF-130SH-14230, <https://product.mabuchi-motor.com/detail.html?id=25>, abgerufen am 04.12.2023

## Prüfzeitreduktion bei Wickelversuchen

Stök, M.; Lohrengel, A.

Die Eigenschaften von Seilen beeinflussen maßgeblich die Beanspruchung von Seiltrommeln. Während der Nutzung von Seilen verändern sich die Eigenschaften, was zu veränderten Beanspruchungen der Seiltrommel führen sollte. Für Voruntersuchungen ist deshalb in einer studentischen Abschlussarbeit ein Modul entwickelt worden, mit dem die Laufzeit des Prüfstands erheblich verkürzt werden konnte.

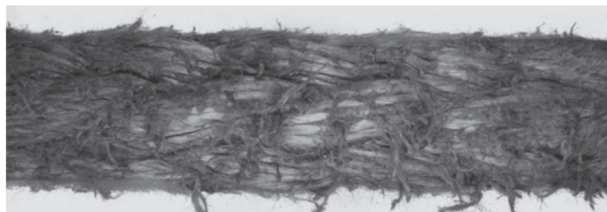


*The characteristics of ropes have a substantial impact on the load experienced by rope drums. As the properties of ropes are changing during use, the stresses on the rope drum are expected to change. Therefore, a module was created for preliminary testing as part of a student thesis, which significantly reduced the running time of the test rig.*

## Die Veränderung von Seileigenschaften über die Nutzungsdauer

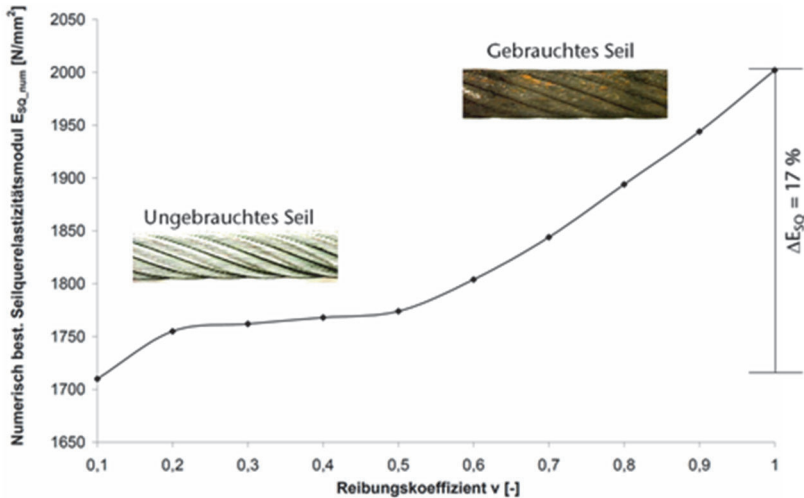
Die Belastung einer Seiltrommel ist von den Eigenschaften des verwendeten Seils abhängig. Über die Nutzungsdauer eines Seils variieren die Eigenschaften jedoch und sind nicht konstant. Untersuchungen von Leistner an Stahldrahtseilen zeigen eine Steigerung des Querelastizitätsmoduls der Seile um 87,5 % /1/. Stahr zeigte in /2/ mit der Seilsimulation, dass die Zunahme des Seilquerelastizitätsmoduls teilweise mit einer Zunahme des Reibkoeffizienten erklärbar ist, siehe Abbildung 2.

Die DIN EN ISO 9554 beschreibt für Faserseile, dass es durch äußeren Abrieb zu einem Pelz oder Faserhaufen an der Außenseite kommen kann (vgl. Abbildung 1) /3/. Hierdurch wird sich der Reibwert zwischen dem Seil und seinem Kontaktpartner verändern.



**Abbildung 1:** Äußerer Seilabrieb eines Faserseils /3/

Eine Veränderung der Seileigenschaften führt zu sich ändernden Belastungen der Bordscheibe und des Trommelmantels. Für eine sichere Auslegung der Seiltrommel sind somit Kenntnisse über die Veränderung von Seileigenschaften unerlässlich.



**Abbildung 2:** Numerisch bestimmte Seilquersteifigkeit in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten für ein einlagiges Seil /2/

### Der Spulprüfstand am Institut für Maschinenwesen

Auf dem Windenprüfstand des Institutes (siehe Abbildung 3) werden Seile zwischen zwei Seiltrommeln hin- und her gespult. Die Seiltrommeln sind übereinander angeordnet und werden jeweils von unten angelaufen. Der Prüfstand hat in dieser Konfiguration also eine Gegenbiegung des Seils zu Folge. Am Ende des Prüfstands wird das Seil über eine Umlenkscheibe zurückgeführt. Das D/d Verhältnis der Seilscheibe ist so groß, dass die Biegung als Schädigung des Seils keine Berücksichtigung findet. Eine Schädigung des Seils tritt lediglich beim Auf- und Ablaufen auf die Seiltrommel auf.

Untersuchungen zur Beanspruchung der Seiltrommel bei sich verändernden Seileigenschaften sind durch die äußerst langsame Schädigung des Seils langwierig und damit kostenintensiv. Um die Versuchszeit zu verkürzen ist deshalb ein Modul entwickelt worden, dass die Seile beim Durchlauf möglichst stark schädigt. Als Randbedingungen sind die Anzahl der Seilscheiben (4) und der Verzicht auf schädigende Medien (Wasser, Chemikalien, Wärme, UV-Licht) vorgegeben worden. /4/

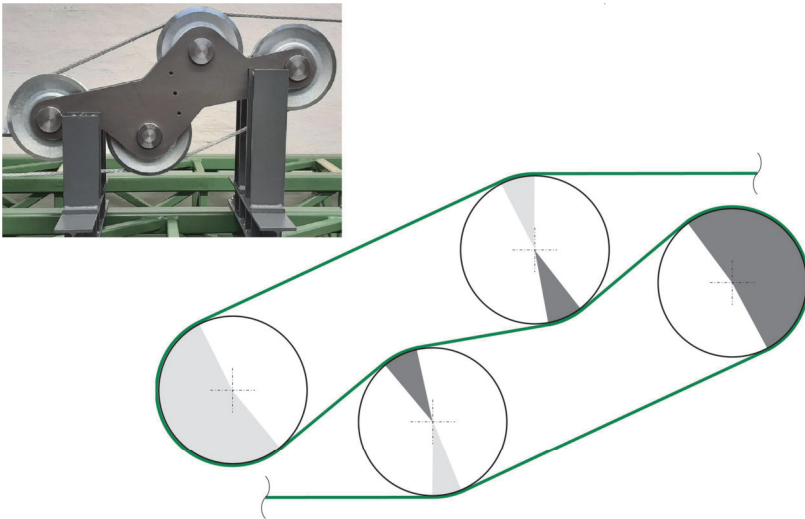


**Abbildung 3:** Der Spulprüfstand am Institut für Maschinenwesen, ausgestattet mit zwei elektrischen Antrieben für einen effizienten Dauerprüfbetrieb

### Die Maximierung der Biegewechsel

Für die zusätzliche Schädigung der Seile können, aufgrund der Randbedingungen, lediglich Biegewechsel des Seils realisiert werden. Je nach Seilmaterial (Stahl- oder hochmodulare Polymerfaser) haben Gegenbiegungen einen geringen oder starken Einfluss auf die Seilnutzungsdauer. Bei der finalen Lösung werden die Seilscheiben so angeordnet, dass die beiden mittleren Seilscheiben doppelt angelaufen werden. Mit den vier Seilscheiben werden sechs Biegewechsel realisiert. Die Hälfte davon sind Gegenbiegewechsel. In Abbildung 4 ist der Lauf durch das Prüfstandsmodul von oben rechts nach unten links gezeigt.

Anstelle von zwei Gegenbiegewechseln durch das Auf und wieder Ablaufen auf die Seiltrommeln, sind mit dieser Anordnung der Seilscheiben acht Gegenbiegewechsel und sechs gleichsinnige Biegewechsel realisiert worden. Bei der konservativen Annahme, dass die Gegenbiegewechsel keine stärkere Schädigung der Seile hervorrufen ist die Prüfzeit bereits um Faktor 7 verkürzt. Da Gegenbiegungen bei vielen Seilmaterialien jedoch die Nutzungsdauer sehr viel stärker verkürzen ist für die meisten Seile eine noch größere Zeitersparnis zu erwarten.



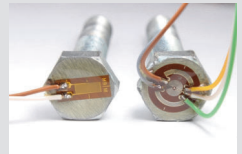
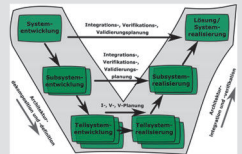
**Abbildung 4:** Die gleichsinnigen Biegewechsel sind in hellgrau dargestellt, die Gegenbiegewechsel in dunkelgrau für einen Seillauf von oben nach unten /5/

### Zusammenfassung

Durch eine effiziente Anordnung von vier Seilscheiben, sodass ein doppeltes Anlaufen möglich wurde, konnte die Versuchsdauer zur Ermittlung der Seiltrommelbeanspruchung durch sich verändernde Seileigenschaften um mindestens den Faktor 7 reduziert werden.

### Literatur

- /1/ Leistner, C.; Lohregel, A.; Traxel, R.; Dauböck, H.: Influences on winch drums arising from variations of the transverse compressive stiffness of wire ropes in correlation to their service life. 20th North Sea Offshore Crane and Lifting Conference
- /2/ Lohregel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Sicherer Einsatz von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen und/oder großer Nenn-durchmesser. Technical Report, Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal Dezember 2011
- /3/ DIN EN ISO 9554:2019-12 Faserseile - Allgemeine Festlegungen; Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- /4/ Kloe, S.: Konstruktion eines integrierten Prüfstandsmoduls zur schnelleren Seilalterung, unveröffentlichte Masterarbeit, TU Clausthal, 2023
- /5/ Küster, D.: Untersuchungen des Querelastizitätsmoduls über die Seillebens-dauer, unveröffentlichte Masterarbeit, TU Clausthal, 2023



Hochschule und Kontakte

D





## Einsatz Virtueller Realität im interaktiven Lernlabor am IMW

Meyer, J.; Inkermann, D.

*Virtuelle Realität spielt in Lehre und Ausbildung sowie der industriellen Anwendung eine immer größere Rolle. In diesem Artikel zeigen wir auf, wie VR-Technologien nutzbringend in der Grundlagenlehre eingesetzt werden können. Der Aufbau einer Lernstation zum Thema VR ist dabei Teil der Realisierung eines LifeLabs am IMW. Hier soll VR zukünftig für Aufgaben in der zirkulären Produktentstehung eingesetzt werden.*



*Virtual reality is performing an increasingly important role in teaching, training and industrial applications. In this article, we show how VR technologies can be used beneficially in basic teaching. The design of a learning station for VR is part of the realization of a LifeLab at the IMW. Here VR will be used to support different task within the circular product creation process and assist teaching and demonstration for students and industry partners.*

### Einleitung

Seit jeher werden Technische Zeichnungen als Dokumentations- und Kommunikationsmittel eingesetzt, um ein einheitliches Verständnis über die Geometrie, den Aufbau und weitere Produkteigenschaften, wie z. B. die Fertigbarkeit oder Montierbarkeit zu gewährleisten. Dieses Verständnis muss auch Nachwuchingenieur:innen vermittelt werden. Entscheidend ist dabei neben der Kenntnis formaler Regeln für die Dokumentation ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen, um bspw. die Funktionsweise eines Produktes verstehen zu können. Nur mit diesen Grundlagen kann ein Transfer zwischen 2D-Zeichnungen und 3D-Modellen und andersherum erfolgen. Insbesondere (erweiterte) 3D-Modelle sind geeignet, um räumliche oder kinematische Restriktionen zu analysieren. Dabei ist das kommunikative Verständnis in Bezug auf geometrische Erläuterungen zwischen Ingenieur:innen auf ein gewisses Maß begrenzt. Dies gilt auch für die Kommunikation zwischen Studierenden und Lehrenden. Beispielsweise sind Maschinenkomponenten, welche über zahlreiche Anbindungen zu anderen Bauteilen und somit auch Randbedingungen besitzen sowie ihre Funktionsweise am Bildschirm häufig schwer zu vermitteln. Auch große Anlagen oder Abläufe oder die Zugänglichkeit einer Schraubenverbindung können hier schwer überblickt werden. Um diese Herausforderungen insbesondere in die Grundlagenausbildung zu adressieren, wird derzeit am IMW eine Lernstation für Virtuelle Realität aufgebaut. Diese Lernstation ist Teil des LifeLabs *Circular Design* am IMW und soll die gezielte



Nutzung von VR-Technologien zur Verbesserung des Produktverständnisses unterstützen. Im LifeLab werden schrittweise verschiedene Lernstationen zu Fragestellungen der zirkulären Produktentstehung realisiert. Das Konzept des LifeLabs orientiert sich am Ansatz von Lernfabriken /1/.

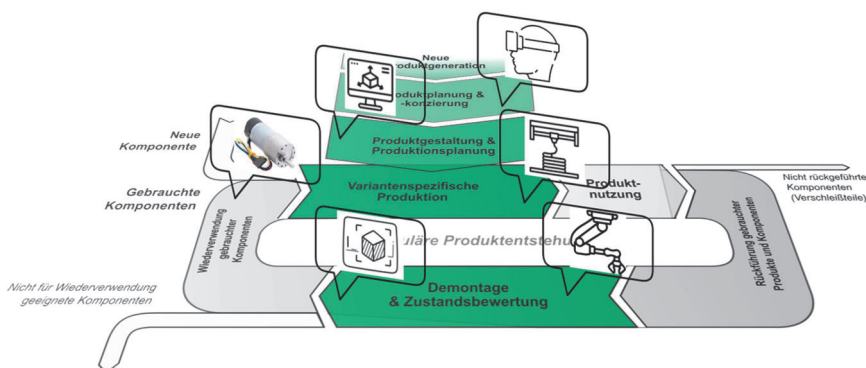
### Relevanz und Möglichkeiten Virtueller Realität

Die Relevanz von VR in Ingenieur Anwendungen ergibt sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Anwendungsgebieten. Grundsätzlich sind rein präsentative und wirtschaftliche Gründe sowie technische Gründe zu unterscheiden. Aus der wirtschaftlichen Sichtweise kann es für einen Vertriebsingenieur, aber auch für einen präsentierenden Studierenden wichtig sein, das Produkt ansprechend und gut verständlich zu präsentieren. Ebenfalls kann mittels VR gemeinsam zwischen dem Vertrieb und dem Kunden an einem digitalen Produktmodell gearbeitet werden /2/. Aus technischer Sicht bieten sich effiziente Möglichkeiten, komplexe ineinander verschachtelte Baugruppen einfach zu überblicken und auch kollaborativ zu analysieren /3/. Ebenfalls sind Absicherungen der Montierbarkeit, z. B. durch Analyse der Zugänglichkeit möglich. Dies kann bspw. durch virtuelle Werkzeuge wie Schraubschlüssel erfolgen, die in die zu überprüfenden Baugruppe geladen werden, um die Verschraubungsbewegung und den erforderlichen Bewegungsraum nachzubilden. Hierbei können mögliche Kollisionen mit anderen Objekten detektiert werden /4/. Ein weiterer wichtiger Einsatzzweck von VR ist die Überprüfung ergonomischer Fragestellungen. Dies kann den Endkunden z. B. in einer bestimmten Sitzposition betreffen oder konkrete Montageprozesse fokussieren /5/. Weiterhin ist es von Interesse große Baugruppen, wie Industrieanlagen zu durchlaufen und die Gesamtfunktionsweise auch in Einzelheiten zu analysieren. /3/ Ebenfalls lässt sich durch VR ein besseres Verständnis von Bauteilgrößen vermitteln, was insbesondere für unerfahrene Konstrukteur:innen hilfreich ist. In jedem Fall lässt sich die Diskussion technischer Fragestellungen untereinander fördern /6/.

### LifeLab Circular Design am IMW

Als Lern- und Demonstrationsplattform wird am IMW derzeit das LifeLab *Circular Design* aufgebaut. Ziel ist es, Methoden und Technologien zur Unterstützung wesentlicher Aufgaben in der zirkulären Produktentstehung aus Sicht der Produktentwicklung zu entwickeln und für Studierende und Industriepartner nutzbar zu machen. Ausgehend von bestehenden Lehrinhalten und Ergebnissen aus laufenden Forschungsprojekten werden hierfür schrittweise einzelne Lernstationen realisiert. Im Sinne der zirkulären Produktentstehung soll dabei aufgezeigt werden, wie aufbauend auf dem Konzept des Remanufacturings eine konsequente und vorausschauende Wiederverwendung und Aufwertung genutzter Produkte und Komponenten ermöglicht wird. Das Leitbild der zirkulären Produktentstehung geht dabei über die Wiederverwendung von Komponenten in ähnlichen oder gleichen Produktgenerationen hinaus und zielt auf die Entwicklung vollständig neuer, innovativer Produktgenerationen ab. Hierdurch ergibt sich eine besonders hohe

Ressourceneffizienz. Für die Entwicklung und Produktion neuer Produktgenerationen werden demnach zu einem Großteil gebrauchte Komponenten (weiter-)genutzt. Da Anzahl und Spezifikationen (Geometrie, Zustand, Funktionseigenschaften) der rückgeführten Komponenten erst nach Demontage und Zustandsbewertung bekannt sind, muss in der Produktentwicklung mit größeren Unsicherheiten umgegangen werden. Im Gegensatz zur etablierten Produktentwicklung müssen daher in der zirkulären Produktentstehung nicht/ kaum spezifizierte Komponenten gehandhabt werden. Bei der Entwicklung neuer Produktgenerationen müssen daher Gestaltungsbereiche (z. B. Bauräume, geometrische Schnittstellen) vorgesehen werden und diese im Gestaltungsprozess an die realen Spezifikationen der verfügbaren gebrauchten Komponenten angepasst werden. Im LifeLab Circular Design werden die skizzierten Forschungsfelder, siehe Abbildung 1, schrittweise in Form vernetzter Lern- und Demonstrationsstationen umgesetzt.



**Abbildung 1:** Konzept sowie Forschungsfelder der zirkulären Produktentstehung als Grundlage für den Aufbau des LifeLabs Circular Design am IMW

Auf der ca. 70 m<sup>2</sup> großen Fläche des ehemaligen CAD-Raums im 1.OG sollen im ersten Schritt folgende Stationen realisiert werden:

- Station zur automatisierten Geometrieerfassung und initialen Zustandsbeurteilung gebrauchter Komponenten durch einen robotergeführten 3D-Scanner (Reverse Engineering)
- Station zur Entwicklung und Anwendung von Design Automation Ansätze für die effiziente Anpassung geometrischer Schnittstellen sowie die Verwendung Additiver Fertigungsverfahren
- Station für die robotergestützte Handhabung (vereinfachter) Produkte mit unterschiedlichen Geometrien bei der (De-)Montage
- Station für die Visualisierung (VR-Station) des vollständigen Produktentstehungsprozesses (nachgebildeter Demontage- und Produktionsprozess)

Als durchgehendes Produktbeispiel wird im LifeLab zunächst ein Elektromotor verwendet, der in unterschiedlichen Ausprägungen in üblichen Haushaltsgeräten eingesetzt wird. Neben realistischen Herausforderungen der Demontage und Zustandsbeurteilung repräsentieren Elektromotoren im Rahmen der Kreislaufwirtschaft eine Komponente, welche mit großen Ressourcenaufwand in der Herstellung und der Nutzung aufweist. Ergänzend zu den skizzierten Stationen sind im LifeLab (Rechner-) Arbeitsplätze und Hilfsmittel, z. B. Methodenanleitungen, für die Entwicklung zirkulärer Produkte verfügbar. Das gesamte LifeLab sowie die einzelnen Stationen werden schrittweise in die Lehrveranstaltungen integriert und wird für semesterbegleitende Projektaufgaben studentischer Teams genutzt.

### VR-Lernstation im LifeLab

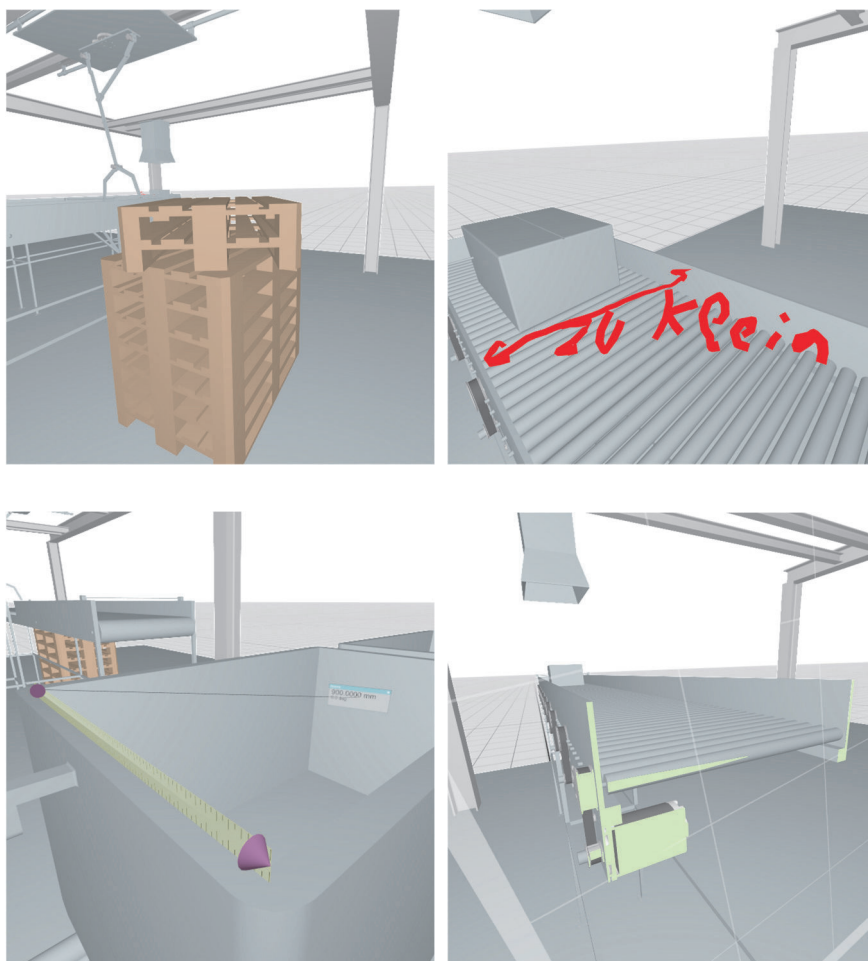
Als Teil des LifeLabs zielt die VR-Lernstation darauf ab, einerseits Studierende für die praktische Nutzung von VR-Technologien zu befähigen und andererseits VR-Technologien für das Remanufacturing im Rahmen der zirkulären Produktentstehung zu erforschen und zu demonstrieren. Bestandteile der Lernstation sind eine Videowall sowie eine VR-Brille für die kollaborative Analyse virtueller Produkte, Fertigungs- und Montageprozesse. In Abbildung 2 ist die verwendete VR-Brille dargestellt. Diese funktioniert in Kombination mit einem CAD-fähigen Computer und einem entsprechenden Display.



**Abbildung 2:** VR-Brille HTC VIVE mit dazugehörigen Controllern am IMW

Derzeit wird ausschließlich Siemens NX als Software-Tool genutzt. NX bietet einerseits die Möglichkeit direkt (ohne Konvertierung) Baugruppen in eine VR-Szene zu überführen und andererseits sind verschiedene Funktionen für die Analyse, Kommentierung und Zusammenarbeit verfügbar, siehe Abbildung 3. Beispiele

hierfür sind, einen Schnitt in der geöffneten Baugruppe zu erzeugen, Maße mittels einem Messen-Tool zu generieren, markante Stellen in einem 3D-Modell farbig zu markieren bzw. Bemerkungen einzuzichnen oder Parameter eines Bauteils abzufragen. Im Weiteren können zur einer verbesserten Betrachtung Bauteile ausgeblendet werden. Ebenfalls besteht die Möglichkeit Bauteile zu greifen und zu verschieben.



**Abbildung 3:** Auswahl von Werkzeugen der VR-Umgebung am IMW, oben links: Verschieben-Werkzeug, oben rechts: Zeichnen-Werkzeug, unten links: Messen-Werkzeug, unten rechts: Schnitt-Werkzeug

Durch den Anschluss des LifeLabs an das hauseigene Dateisystem und durch die Existenz vorgefertigter CAD-Modelle für die VR-Umgebung, ist eine hohe Dateiverfügbarkeit gegeben. In Kombination mit geometrischem Freiraum für das Bewegen in VR mit den Sitzgelegenheiten des LifeLabs können auch größere Personengruppen hier unterkommen und effektiv arbeiten.

### Erste Erfahrungswerte aus der Lehre

Zum Zeitpunkt dieses Beitrages wurde die VR-Lernstation initial in Betrieb genommen und von ausgewählten Studierenden, z. B. im Rahmen des Praktikums „Konstruktion und Simulation mit 3D-CAD“ genutzt. In dieser Lehrveranstaltung werden wichtige konstruktive Kernthemen wie Parametrik, Mehrkörpersimulation, virtuelle Inbetriebnahme und Produktvisualisierung behandelt. Neben der praktischen Anwendung verschiedener CAx-Module in Siemens NX werden Grundlagen der Entwicklungsmethodik vertieft und die analytischen Fähigkeiten der Studierenden geschult. Betrachtet wurde ein Übungsbeispiel einer Paketförderanlage, bei der Pakete sortiert werden. Diese werden entweder automatisiert in einen Waggon gefördert oder auf einer Palette gestapelt. Die Studierenden waren von den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Funktionalitäten der VR begeistert. Dies zielte besonders auf die Immersion der definierten Geometrien ab. Somit konnte ein schnelles Verständnis geschaffen werden, welches die Funktion der Paketförderanlage angeht. Ebenfalls ist die Möglichkeit die zu modellierende Projektaufgabe der Lehrveranstaltung „Konstruktion und Simulation mit 3D-CAD“ in VR zu präsentieren, auf eine positive Rückmeldung gestoßen. Anweisungen für die Hilfswissenschaftler, welche die Modellierung der Paketförderanlage meinen, konnten ebenfalls durch den Einsatz von VR deutlich intuitiver kommuniziert werden. Weiterhin hatte das IMW an Schülerinformationstagen einen kurzen Workshop zur Modellierung mit anschließendem Einblick der Übungsaufgabe einer heruntergebrochenen Kleinstbaugruppe eines Automobils veranstaltet. Hier konnte ebenfalls ein Einblick in die VR gegeben werden, welcher auf großes Interesse bezüglich der weiteren Verwendung dieser stieß.

### Weiterentwicklung der Funktionalitäten und Anwendungsfälle der VR-Lernstation

Im Weiteren soll der aktuelle Stand der VR-Lernstation als Ausgangsbasis für Modifikationen und Erweiterungen dienen. Für die Nutzung in der Lehre sind folgende Erweiterungen geplant:

- Erweiterung der VR-Umgebung um eine zweite VR-Brille
- Integration weiterer umfangreicher VR-Tools zur Unterstützung von Analyseaufgaben in Konstruktion und (De-)Montage

Für die Unterstützung der Forschung sollen folgende Erweiterungen und Anwendungsfälle realisiert werden:

- Nutzung der VR für die Analyse und Absicherung von Demontageprozessen und Remanufacturing-Aufgaben in der zirkulären Produktentstehung
- Bauraum- und Montageuntersuchungen für die gezielte Weiterverwendung gebrauchter Komponenten in der Produktgenerationenentwicklung
- Kollaborative Modellerstellung und -analyse im Model-based Systems Engineering

Für die geplanten Weiterentwicklungen sollen zusätzliche Programme eingesetzt werden, um beispielsweise gesetzte Markierungen oder Veränderungen geometrischer Art in der virtuellen Umgebung zum eigentlichen CAD-Programm zurückspielen zu können. Ein Beispiel hierfür kann das Erstellen von Anmerkungen in der VR-Umgebung sein, welche in das CAD-Modell übertragen werden. Weiterhin gibt es bisher keine Möglichkeit Simulationen oder eine virtuelle Inbetriebnahme in einer VR-Szene zu durchlaufen. Im Weiteren könnten virtuelle Meetings, welche durch VR unterstützt werden, ein interessanter Anwendungsfall für die Lehre in Zukunft sein. Ebenfalls gilt es von der VR in die Augmented Reality, kurz AR, zu unterscheiden. Bei der AR wird ein Bild bzw. werden digitale Objekte in das reale Umfeld projiziert /3/. Hier gilt es seitens der Umsetzung einen Test durchzuführen, um dann entschieden zu können, ob eine Integration in die Lernumgebung am IMW ebenfalls sinnvoll ist.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Integration einer virtuellen Realität für Anwendungsfälle in der Lehre am IMW der TU Clausthal vorgestellt. Hierbei wurde auf die grundsätzliche Relevanz und die Möglichkeiten eingegangen, welche die Verwendung einer virtuellen Realität mit sich bringt. Nachfolgend wurde ein Überblick über das LifeLab im Kontext der geplanten *Circular Design* eingeführt. Die Integration der VR in das LifeLab als Station wurde aufgezeigt. Einzelne Funktionalitäten der VR-Lernstation wurden vorgestellt. Weiterhin wurden erste Erfahrungswerte aus der Lehre geteilt. Letztlich lag ein inhaltlicher Schwerpunkt auf einer geplanten Weiterentwicklung und damit einhergehende Funktionalitäten der VR- Lernstation. In diesem Zug wurde auch ein Augenmerk auf Anwendungsfälle in den Bereichen Lehre und Forschung gelegt.

## Literatur

- /1/ Abele, Eberhard; Metternich, Joachim; Tisch, Michael: Learning Factories. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Schweiz, 2019, ISBN 978-3-319-92260-7
- /2/ Buchenau, Peter: Chefsache Strategisches Vertriebsmanagement. Springer Gabler, Wiesbaden, 2022, ISBN 978-3-658-37379-5
- /3/ Knoll, Matthias; Stieglitz, Stefan: Augmented Reality und Virtual Reality – Einsatz im Kontext von Arbeit, Forschung und Lehre. Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, 2022, DOI <https://doi.org/10.1365/s40702-022-00840-5>
- /4/ Husung, Stephan; Sladeczek, Christoph; Rath, Michael; Brix, Sandra; Brix, Torsten; Weber, Christian: Audiovisuelle VR-Simulation am Beispiel einer Pick-and-Place Maschine. Tagungsband, 14. IFF-Wissenschaftstage, Fraunhofer IFF, Magdeburg, 2011, ISBN 978-3-8396-0281-2
- /5/ Titov, Fedor; Friedewald, Axel; Lödding, Hermann: Ergonomie-Absicherung in Virtual Reality mit dem ViP-Toolset. Tagungsband, Go-3D 2012, Fraunhofer Verlag, Rostock, 2012, ISBN 978-3-8396-0427-4
- /6/ Dörner, Ralf; Broll, Wolfgang; Grimm, Paul; Jung, Bernhard: Virtual und Augmented Reality (VR/AR). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-28902-6

## Auszeichnungen im Maschinenbau

Wächter, M.

*In diesem Jahr konnten gleich drei Absolvent\*innen bzw. Studierende des Masterstudiengangs Maschinenbau ausgezeichnet werden. Dies soll Grund genug sein, diesen drei Personen einen Beitrag zu widmen.*

*This year, three graduates and students of the Master's degree program in Mechanical Engineering could be honored. This should be reason enough to dedicate an article to these three people.*



### Wissenschaftspreis Niedersachsen 2023

Die TU Clausthal und im Besonderen der Maschinenbau freut sich mit Herrn Vincent Hahn über seine Auszeichnung mit dem Wissenschaftspreis des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur. Herr Hahn ist einer der vier Preisträger in der Kategorie „Student\*innen“ und reiht sich ein in die Liste der diesjährigen Preisträger von der Technischen Universität Braunschweig, der Leibniz Universität Hannover und der Hochschule Hannover. In dieser Kategorie des Wissenschaftspreises werden Studierende geehrt, die sich durch ihr vorbildliches soziales und gesellschaftliches Engagement in der Hochschule z.B. in der studentischen Selbstverwaltung oder durch selbstorganisierte Workshops, um nur einige zu nennen, hervorgetan haben. Die Einreichung der Unterlagen hatte zum 28. April 2023 zu erfolgen und am 22. November erfolgte die Auszeichnung im Landesmuseum Hannover (Abbildung 1).

Vor der Preisübergabe stellten sich die jeweiligen Kandidat\*innen in einem Video vor (Abbildung 2). Das Video ist unter <https://video.tu-clausthal.de/film/1364.html> abrufbar.

In der Laudatio wurde aufgezeigt, dass Herr Hahn über den zweiten Bildungsweg im Rahmen des Programms Techniker2Bachelor das Bachelorstudium Maschinenbau aufgenommen hat. Weitere Informationen zum Programm sind unter <https://www.t2b.tu-clausthal.de/ueber-unser-projekt> abrufbar.

Schon früh nach dem Studienbeginn war er als studentische Hilfskraft im Institut für Maschinenwesen tätig. Darüber hinaus hat er sich aktiv in die Arbeit der Fachschaft Maschinenbau/Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen eingebracht und im Studienzentrum der TU Clausthal sowohl als Tutor in der Einführungswoche als auch als Lernscout aktiv und engagiert mitgewirkt. Über mehrere Semester war er





**Abbildung 1:** Vincent Hahn (links) nach der Auszeichnung durch Herrn Minister Falko Mohrs (rechts) mit Frau Schultz TU Braunschweig (Mitte) (Foto Martinez)



**Abbildung 2:** Ausschnitt aus dem Video (Foto Martinez)

eine Stütze im Betreuungsprogramm der Fakultät, welches den Studienanfängern den Studieneinstieg im 1. und 2. Semester erleichtern soll, ferner hat er sich als studentisches Mitglied in diversen Gremien der universitären Selbstverwaltung eingebracht und sich für die Belange der Studierenden eingesetzt.

Wir wünschen Herrn Hahn für seinen weiteren Lebensweg alles Gute und hoffen, dass er sich gerne an seine Zeit an der TU Clausthal erinnert. (weitere Informationen unter: <https://www.tu-clausthal.de/universitaet/einrichtungen/presse-und-oeffentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/artikel/clausthaler-gewinn-wissenschaftspreis-niedersachsen>)

### Förderpreis des Vereins der Freunde der TU Clausthal

Im Rahmen der Verabschiedung der Absolventen der TU Clausthal erfolgte die Übergabe verschiedener Förderpreise. In diesem Jahr wurden gleich zwei Masterarbeiten aus dem Institut für Maschinenwesen ausgezeichnet.

Frau Merle Neumann wurde für die herausragende Leistung im Rahmen ihrer Masterarbeit „Entwicklung eines Verschleißmodelles für Zahnwellenverbindungen mit Hilfe maschinellen Lernens“ durch den Förderpreis des Vereins von Freunden der TU Clausthal ausgezeichnet, überreicht wurde dieser vom Vorsitzenden des Vereins Herrn Dr.-Ing. Ulrich Grethe.

In der Masterarbeit hat Frau Neumann die Einflussfaktoren auf den Zahnwellenverschleiß zusammengetragen und bewertet, die Methoden des maschinellen Lernens analysiert und daraus neuronale Netze entwickelt um mit Hilfe von Datensätzen Aussagen zum Verschleißverhalten durch künstliche Intelligenz zu ermöglichen.



**Abbildung 3:** Merle Neumann und Dr.-Ing. Grethe nach der Übergabe des Förderpreises (Foto TUC)

### Förderpreis der Eberhard-Schürmann-Stiftung

Der Eberhard-Schürmann-Preis wird jährlich für besondere Studien- und Forschungsleistungen auf den Gebieten Metallurgie, Material- und Werkstoffwissenschaften vergeben.

Die diesjährige Auszeichnung ging an Herrn Sören Krahl für seine herausragende Masterarbeit „Bestimmung von Anwendungsreibwerten stirnseitig befestigter Freiläufe“.

Der Vorsitzende des Kuratoriums der Eberhard-Schürmann-Stiftung, Herr Dr.-Ing. Grethe, übergab den Preis und fasste in seiner Laudatio die Arbeit zusammen, dabei wurden die 528 Versuche, auf die sich die Erkenntnisse zu den Einflüssen auf den Reibbeiwert der stirnseitig befestigten Freiläufe stützen, hervorgehoben.



**Abbildung 4:** Sören Krahl und Dr.-Ing. Grethe nach der Übergabe des Eberhard-Schürmann-Preises (Foto TUC)

Die Videos zur Verleihung des Förderpreises vom Verein von Freunden der TU Clausthal als auch zur Verleihung des Preises der Eberhard-Schürmann-Stiftung sind unter <https://video.tu-clausthal.de/film/1360.html> abrufbar.





## Das Institut und seine technische Ausrüstung

### Institut

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche in den Maschinenelementen und der integrierten Produktentwicklung ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen und Maschinenteilen, speziell Welle-Nabe-Verbindungen, Freiläufe, Gelenkwellen, Druckkamm Lagerungen und Seiltriebe
- Numerische und experimentelle Beanspruchungsermittlung
- Maschinenakustik und Schwingungsdiagnostik
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Design for X
- Modellbasierte Systementwicklung
- Kollaborative Produktentwicklung
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling / Additive Manufacturing

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht um die beiden Lehrstuhlleiter herum aus 15 wissenschaftlichen Mitarbeitern:innen. Weitere 9 Mitarbeiter:innen arbeiten in der Verwaltung, IT, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

### Technische Ausrüstung

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore, ein umfangreiches Prüffeld und die notwendige Hard- und Softwareausstattung für Simulation und Berechnung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf sieben Verspannprüfständen bis 1 MW, sechs Torsions-Schwingprüfständen bis 500 kNm, zwei kombinierten Umlaufbiege- und Torsionsprüfständen, einem statischen Torsionsprüfstand bis 5 kNm sowie zwei separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung und zwei Druckkammprüfständen durchgeführt werden. Für das Fügen von Naben auf Hohlwellen mit Innenhochdruck steht eine Maximator-Hochdruckanlage bereit. Für die Untersuchung von Freiläufen stehen zwei dynamische Servoschaltprüfstände mit zusätzlichen Axialbelastungseinheiten, zwei Lebensdauerprüfstände, ein dynamischer Servoschaltprüfstand mit zusätzlicher Radialbelastungseinheit, eine hochdynamische Belastungseinheit für stirnseitige Verschraubungen und ein statischer Prüfstand zur Ermittlung der Drehfedersteifigkeit zur Verfügung. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente (Seile) und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät, sowie ein separates mobiles Prüfgerät für Seilquerelastizitätsmessungen und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Für die experimentelle Beanspruchungsermittlung werden Systeme von HBM, Gantner und IMC (imc CRONOSflex 2000) mit bis zu 40 simultanen Kanälen eingesetzt. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Messwerten werden mit

vier Telemetrieanlagen (64, 32, 8, 4 Kanäle) bewältigt, die auch für ICP-Beschleunigungssensoren geeignet sind. Für die optische Beanspruchungs- und Verformungsmessung steht ein 3D-DIC-Messsystem der Firma LIMESS/DANTEC auf Basis der Digital-Image-Correlation zur Verfügung. Ein Schleuderprüfstand bis 40.000 U/min für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter) und ein Prüfstand zur mechanischen Zerkleinerung und einer zur Verinselung ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Recyclingmaschinen. Für Untersuchungen an den genannten Maschinenteilen unter thermischen Bedingungen steht ein 100 l-Temperierschrank für den Temperaturbereich von -70 °C bis 180 °C zur Verfügung. Für Oberflächenanalysen wird ein 3D-Laserscanning-Mikroskop (KEYENCE VK-X 100K) mit zusätzlichem Koordinatentisch für die Untersuchung größerer Bauteile, ein digitales Mikroskop (OLYMPUS DSX1000) zur Fehleranalyse und Geometriebestimmung, sowie ein Rauigkeitsmessgerät MAHR MarSurf XR20 mit Rotationsachse eingesetzt.

Die technische Ausstattung des Labors für Maschinenakustik und Schwingungen ermöglicht Messungen an kombiniert belasteten Bauteilen. Mittels elektrodynamischer Schwingerreger können Bauteile neben ihrer stat./dyn. Betriebslast gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 5 kHz unterworfen werden. Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Messequipment auf dem aktuellen Stand der Technik ausgestattet:

- 3 Modalshaker (1 kN, 200 N, 10 N)
- Rotations-Laservibrometer
- Feinwuchtgerät mit Analysefunktionen
- Intensitätsmesssonde
- Freifeld-Messmikrofone
- Ein großes Sortiment an Schwingungsaufnehmern
- CAE Intensity Inspector zur Schallquellenortung

Darüber hinaus verfügt das IMW über einen schallarmen Messraum. Zur maschinenakustischen Beurteilung von Maschinenstrukturen stehen gängige Analyseverfahren zur Verfügung wie beispielsweise:

- Schalleistungsbestimmung nach DIN EN ISO 3744, DIN EN ISO 3745, DIN EN ISO 9614-1 und -2
- Experimentelle Modalanalyse
- Akustische Resonanzanalyse zur Bauteildiagnose

Das fertigungstechnische Labor besteht aus drei Fräsmaschinen, vier Drehmaschinen, einer Senkerodiermaschine (CHARMILLES ROBOFORM 505), einer Drahtrodiermaschine (Mitsubishi MV2400S) und einer Startlochbohrmaschine (Mitsubishi START43Z). Als CAD/CAM-System wird Siemens NX und Creo Parametric (früher: Pro / Engineer Wildfire mit Pro / Manufacturing) eingesetzt.

Die Rechnerausstattung umfasst mehrere Server, welche die insgesamt ca. 160 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. mehrere Compute-Server für die numerischen Simulationen. Als Standardsoftware für numerische Simulationen wird ANSYS mit HPC-Option eingesetzt.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Additive Manufacturing bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette. Hierzu gehören im Einzelnen eine Trumpf TruPrint 1000 mit Powder Bed Monitoring und hochauflösendem Sauerstoffsensor, zum Generieren von metallischen Prototypen, Funktionsteilen und Werkzeugen (Formen und Elektroden), für die Mischung der Pulver ein Turbula T2F Mischer, die TUCreate Werkstatt mit mehreren 3D-Druckern und einem Lasercutter für studentische Anwendungen, ein optischer 3D-Scanner HandySCAN von CREAFORM, verschiedene 3D-Konstruktionsarbeitsplätze, Apparaturen und Geräte zum Infiltrieren und Beschichten der Sinterbauteile mit Harzen und niedrig schmelzenden Metallen sowie eine Sandstrahlkabine für verschiedene Strahlmedien (Stahlkugeln, Keramikpulver, Nussgranulat u. s. w.). Eine Thermografiekamera TESTO 890 mit hoher Auflösung steht für die zusätzliche Überwachung des Bauprozesses in den AM-Anlagen sowie zur Detektion von Verschleißvorgängen an Maschinenelementen zur Verfügung.

Für die integrierte, modellbasierte Entwicklung komplexer Produkte stehen umfangreich ausgestattete PC-Arbeitsplätze im LifeLab zur Verfügung. Außerdem können Virtual-Reality-Demonstrationen mithilfe von Großbildmonitor und 3D-Shutterbrille inkl. Gestensteuerung durchgeführt werden.

Das Biomechaniklabor beinhaltet ein selbst erstelltes, in allen geometrischen Parametern flexibles Ergometer mit der Möglichkeit zur Ergospierometriemessung. Neben der Anwendung innerhalb der Forschung, steht es für die Durchführung des Biomechanikpraktikums in der Lehre zur Verfügung.





## Veröffentlichungen des Institutes seit 2014

### Veröffentlichungen 2023

Klügel, N.; Masendorf, L.: FVA-874 I, Betriebsfestigkeit von Zahnwellenverbindungen mit gesinterten Naben, Informationstagung, Forschungsreport; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 05./06.12.2023

Schäfer, G.; Lohrengel, A.; Kirchner, E.; Wallmersperger, T.; Stahl, K. et al.: A Review on Sensor-integrating Machine Elements. In: Advanced Sensor Research (2023)

Neumann, M.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.: TurboGetEff: Effizienzsteigerung eines Turboantriebsstrangs unter Einsatz von Druckkammern. In: Reibung, Schmierung und Verschleiß, 64. Tribologie-Fachtagung 2023 (Tagungsband), Gesellschaft für Tribologie, 25.-27.09.2023. Seite 436-446

Maass, B.; Ritzer, K.; Ammersdörfer, T.; Krause, A.; Inkermann, D.; Bursac, N.: Entwicklungssimulator als Validierungsumgebung für Methoden der Blechkonstruktion. Enthalten in: 34. DfX-Symposium 2023, Seiten 85 – 94, Radebeul, Germany, 2023, DOI: 10.35199/dfx2023.09

Gansel, M.; Zwoch, S.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.; Barton, S.: Identification of overloads on splined shafts by means of eddy current testing technology. Papers of the ECNDT 2023, Research and Review Journal of Nondestructive Testing, Bd. 1, 2023, <https://doi.org/10.58286/28069>

Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.; Müller, J.; Mandel, C.; Albers, A.; Tekaas, J.; Schierbaum, A.; Anacker, H.; Bitzer, M.; Kleiner, S.; Herrmann, J.-P.; Krause, P.: Supporting Systems Engineering Activities by artifact-oriented description and selection of methods. In: Proceedings of 24th International Conference on Engineering Design (ICED23), Bordeaux, France, 24-28 July 2023, DOI: <https://doi.org/10.1017/pds.2023.325>

Ammersdörfer, T.; Tartler, D.; Kauffeld, S.; Inkermann, D.: Evaluating reflective behavior in Engineering Design Retrospectives: An initial coding scheme. In: Proceedings of 24th International Conference on Engineering Design (ICED23), Bordeaux, France, 24-28 July 2023, DOI: <https://doi.org/10.1017/pds.2023.169>

Berschik, M.; Schumacher, T.; Laukotka, F.; Krause D.; Inkermann D.: MBSE within the Engineering Design Community – An Exploratory Study. Proceedings of the Design Society, ICED 2023: 24th International Conference on Engineering Design, 24 - 28 July 2023, Bordeaux, France. Seite 2595-2604. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.260>

Schumacher, T.; Inkermann, D.: Model Inconsistencies and Solution Approaches to Maintain Consistency in Model-based Systems Engineering. Proceedings of the ICONS 2023: The eighteenth International Conference on Systems, 24 - 28 April 2023, Venice, Italy. Seite 23-28

## Veröffentlichungen 2022

Klügel, N.: FVA-704 II, Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Informationstagung, Forschungsreport; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 06./07.12.2022

Schäfer, G.; Lohrengel, A.: Einfluss des Fertigungsverfahrens auf die Festigkeit von Passverzahnungen. In: Tagungsband zur 9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2022, 23./24.11.2022. Seite 91-102, ISBN 978-3-18-092408-3

Heinrich, C.; Gansel, R.; Lohrengel, A.; Maier, H.J.: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff. In: Tagungsband zur 9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2022, 23./24.11.2022. Seite 267-272, ISBN 978-3-18-092408-3

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Kinematiksimulation von Evolventenverzahnungen. In: Tagungsband zur 9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2022, 23./24.11.2022. Seite 279-284, ISBN 978-3-18-092408-3

Springorum, J.F.; Schäfer, G.; Brandt, R.; Lohrengel, A.: Steigerung der Bruchfestigkeit von Zahnwellen durch Schmierung. In: Tagungsband zur 9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2022, 23./24.11.2022. Seite 289-295, ISBN 978-3-18-092408-3

Klügel, N.; Lohrengel, A.: Berechnung von stirnseitigen Mehrschraubenverbindungen am Beispiel eines dynamisch beanspruchten Freilaufs. In: Tagungsband zur 7. VDI-Fachtagung Schraubenverbindungen 2022, 08./09.11.2022. Seite 209-222, ISBN 978-3-18-092403-8

Schumacher, T.; Kaczmarek, D.; Inkermann, D.; Lohrengel, A.: Fostering Model Consistency in Interdisciplinary Engineering by linking SysML and CAD-Models. Proceedings of 8<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Wien, Österreich, 2022

Mörz, F.; Schäfer, G.: FVA-658 II, Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Abschlussbericht Nr. 1511, IGF-Vorhaben Nr. 20172 N/1, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt/M., 30.9.2022

Wallat, P.: Kreislaufgerechte Konstruktion mit Berücksichtigung spezifischer Faktoren in Unternehmen. Tagungsband 20. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 28./29.09.2022 in Clausthal, Seite 12-14

Stök, M.; Recknagel, T.; Wächter, M.; Lohrengel, A.; Schmidt, T.: Lifetime and suitability for multi-layer spooling of running wire ropes with plastic coating. Proceedings of the OIPEEC Conference 2022, Pengzhu Wang, Stuttgart, ISBN 978-1-7336004-1-5

Schumacher, T.; Ammersdörfer T.; Inkermann D.: Development and Application of Simulation Games to introduce Model-Based Systems Engineering. Proceedings of 50<sup>th</sup> Annual Conference of the European Society for Engineering Education (SEFI), Barcelona, Spanien, 2022

Ammersdörfer, T.; Müller, J.; Heimicke, J.; Reichardt, H.; Rapp, S.; Inkermann, D. und Albers, A.: Access Logics for Situation-Appropriate Selection and Introduction of Methods in Engineering Design. Proceedings of NordDesign 2022, Copenhagen, Denmark, 16th -18th August 2022, DOI: <https://doi.org/10.35199/NORDDDESIGN2022.26>

Ammersdörfer, T.; Tartler, D.; Kauffeld, S.; Inkermann, D.: Reflection Canvas – An Approach to Structure Reflection Activities in Engineering Design. Proceedings of NordDesign 2022, Copenhagen, Denmark, 16th -18th August 2022, DOI: <https://doi.org/10.35199/NORDDDESIGN2022.29>

Stök, M.; Recknagel, T.; Lohrengel, A.; Schmidt, T.: Lebensdauer laufender Drahtseile mit Kunststoffummantelung und deren Eignung für die Mehrlagenwicklung. In: Katterfeld et al.: 30. Internationale Kranfachtagung (Tagungsband), Magdeburg: Universitätsverlag, 2022; ISBN 978-3-948749-11-8; S. 93-106

Heinrich, C.; Lohrengel, A.: Improvements to gearbox acoustics via thrust collars. In: Forschung im Ingenieurwesen 86, Seite 161–172. <https://doi.org/10.1007/s10010-022-00580-4>

Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.: A Process Modelling Morphology to Support Process Analysis and Development in Change Processes. Proceedings of the Design Society, Volume 2: DESIGN2022, DOI: <https://doi.org/10.1017/pds.2022.10>

Schumacher, T.; Inkermann, D.: Heterogeneous Models to Support Interdisciplinary Engineering – Mapping Model Elements of SysML and CAD. Proceedings of 32<sup>nd</sup> CIRP Design Conference, Paris, Frankreich, 2022, DOI: [10.1016/j.procir.2022.05.309](https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.309)

Tartler, D.; Strahler, A.; Ammersdörfer, T.; Zorn, V.; Inkermann, D.; Kauffeld, S.: ReflectING. Auswirkungen eines Reflexionsworkshops auf die Zusammenarbeit von Teams in Meetings. In: Frühjahreskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften (GfA), Magdeburg (2022)

Stromberg, H., Mayer-Eichberger, V., Lohrengel, A.: Combinatorial Local Mesh Generation. Research note presented at the International Meshing Roundtable 2022, 22-25.2.2022

## Veröffentlichungen 2021

Zorn, V.; Baschin, J.; Reining, N.; Inkermann, D.; Vietor, T.; Kauffeld, S. (2021) Team- und Projektarbeit in der digitalisierten Produktentwicklung. In: Mütze-Niewöhner S. et al. (eds) Projekt- und Teamarbeit in der digitalisierten Arbeitswelt. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-62231-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62231-5_8)

Inkermann, D. (2021): Shaping Method Ecosystems – Structured Implementation of Systems Engineering in Industrial Practice. Proceedings of the Design Society, 1, pp. 2641-2650. doi:10.1017/pds.2021.525

Inkermann, D. (2021): What Happened to Roth's Design Catalogues? – A Review of Usage and Future Research. Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 2021, doi: 10.1115/DETC2021-71746

Nagler, N.; Lohrengel, A.: Improved design criterion for frictionally engaged contacts in overrunning clutches, Forschung im Ingenieurwesen 85, 1053–1063 (2021), <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00496-5>

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.: Hybride Simulationstechnik – Prototypenerkenntnisse in den Entwicklungsprozess einbinden, Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2021, Dresden, Seiten 123-136, <https://doi.org/10.25368/2021.16>, ISBN 978-3-95908-450-5

Stromberg, H.; Ehlers, R.; Lohrengel, A.; Hamje, J.; Wesling, V.: Anforderungen an Bahnplanungsalgorithmen für WAAM-Prozesse, Enthalten in: Tagungsband 4. Symposium Materialtechnik, Seite 101-114, ISBN 978-3-8440-8021-6

Schumacher, T.; Inkermann, D.: Heterogene Modellierung – Verknüpfung und Integration von Systemmodellen der SysML mit CAD-Modellen, 32. DfX-Symposium 2021, München, DOI: <https://doi.org/10.35199/dfx2021.20>

Rehmet, R.; Lohrengel, A.: Verkürzung der Entwicklungszeiten von Schallabsorbermaterialien durch Nutzung eines Simulationsmodells, enthalten in: Tagungsband zur DAGA 2021, Seiten 1167-1170, ISBN 978-3-939296-18-8

Lawrenz, S.; Nippraschk, M.; Wallat, P.; Rausch, A.; Goldmann, D.; Lohrengel, A.: Is it all about Information? The Role of the Information Gap between Stakeholders in the Context of the Circular Economy, Enthalten in: Procedia CIRP, Volume 98, Seiten: 364-369, ISSN: 2212-8271

Wallat, P.; Lohrengel, A.; Der Einfluss der Füge-technik auf die Konstruktion von Produkten für das Kreislaufwirtschaftssystem; Enthalten in: 32nd Symposium Design for X, <https://doi.org/10.35199/dfx2021.22>

Wallat, P.; Lohrengel, A.; Erstellung einer Materialdatenbank zur digitalen Systematisierung im Konstruktionsprozess für kreislaufgerechte Produkte; Enthalten in: Tagungsband 4. Symposium Materialtechnik, Seiten: 526-536,

Mörz, F.; Torsionsbelastete Rändelpressverbindungen - Gestaltung, Ausführung und Auslegung, Dissertation 2021, Papierflieger (Verlag), ISBN 978-3-86948-815-8

## Veröffentlichungen 2020

Schumacher, T.; Inkermann, D.: Herausforderungen und Anforderungen bei der durchgängigen Architekturmodellierung mechatronischer Systeme. 31. DfX-Symposium 2020, Erlangen, Seite 51 – 60. <http://dx.doi.org/10.35199/dfx2020.6>

Mörz, F.; Schäfer, G.: Nennspannungsermittlung für gerändelte Bauteile, In: Tagungsband zum 18. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2020, 01./02.10.2020 in Duisburg, Seite 55 – 66. <https://doi.org/10.17185/dupublico/73094>; ISBN: 978-3-940402-43-1

Stromberg, H.; Martinewski, V.: Potential ungenutzter Rechenleistung Mikrocluster für Forschungsinstitute, In: Tagungsband zum 18. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2020, 01./02.10.2020 in Duisburg, Seite 113 – 124. <https://doi.org/10.17185/dupublico/73094>; ISBN: 978-3-940402-43-1

Rehmet, R.; Lohrengel, A.; Freundt, F.; Kharazipour, A.: Akustische Qualifizierung von neuartigen Verbundwerkstoffen auf Basis von stärkehaltigen Granulaten, In: Tagungsband zum 18. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2020, 01./02.10.2020 in Duisburg, Seite 271 – 281. <https://doi.org/10.17185/dupublico/73094>; ISBN: 978-3-940402-43-1

Wallat, P.; Lohrengel, A.: Wirtschaftliche Einflussfaktoren auf eine kreislaufgerechte Produktentwicklung, Im Tagungsband zum Forschungsfeldkolloquium 2020: Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz, S.69-79, ISBN: 978-3-86948-767-0

Wallat, P.; Lohrengel, A.: Die Einbettung kreislaufgerechter Konstruktionsansätze in den Produktentstehungsprozess, In: Tagungsband zum 18. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2020, 01./02.10.2020 in Duisburg, Seite 163 – 174. <https://doi.org/10.17185/dupublico/73094>; ISBN: 978-3-940402-43-1

Martinewski, V.; Dreiseidler, S.: FVA-776, Rollenfreilauf Härteprofil, Informationstagung, Forschungsreport; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 30.11-04.12.2020

Mörz, F.: FVA-658, Fertigungseinfluss Rändelpressverbindung, Informationstagung, Forschungsreport; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 30.11-04.12.2020

## Veröffentlichungen 2019

Stromberg, H.; Lohrengel, A.; Wesling, V.: Abschätzen kritischer Kerben mit neuronalen Netzen. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 1. und 2. Oktober 2019 in Aachen, Seite 112 – 123. <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2019-08781>

Heinrich, C.: Druckkammsimulation unter Berücksichtigung der Platten- und Wellensteifigkeit. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 1. und 2. Oktober 2019 in Aachen, Seite 126 – 137. <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2019-08782>

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.: Automatisierte Baugruppenoptimierung hinsichtlich Produktanforderungen am Beispiel eines Drehschieberverdichters. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 1. und 2. Oktober 2019 in Aachen, Seite 162 – 173. <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2019-08785>

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M.: Finite element analysis of wire rope stiffness; Exploring Opportunities – Synthetic/Steel; Proceedings of the OIPEEC Conference 2019, M. A. R. Dohm, The Hague, The Netherlands, ISBN-13: 978-1-7336004-0-8

Schulze, M.; Lohrengel, A.; Wächter, M.: Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln, Technische Textilien Euroseil 62 (4), S. 243–250.

Prumbohm, M.; Lohrengel, A.: Zerlegen als Aufgabe eines Pre-Shred-Prozesses. In: 5. Symposium Rohstoffinnovationen und Rohstoffeffizienz, 9. Mai 2019, Fraunhofer ICT, Pfinztal, S. 99-107

Müller, L.; Friedland, J.; Lohrengel, A.: Gestaltung und Implementierung von Anrechnungsverfahren. In: Umkämpfte Anerkennung, Außerhochschulisch erworbene Kompetenzen im akademischen Raum, Hrsg. Nico Sturm, Seite 201 – 217, Springer VS 2019, ISBN: 978-3-658-26535-9

Lohrengel, A.; Müller, L. Wallat, P.: Chancen und Herausforderungen einer offenen Hochschule. In: lernen und lehren, Heft 134 – Jahrgang 2/2019 ISSN: 0940-7340

Hofmann, Sebastian. Eine Theorie der behinderten radialen Aufweitung am stirnseitig befestigten Freilauf. Diss. 2019.

Rehmet R., Lohrengel A., Schäfer G.: Einfluss von Wälz- und Gleitlagerungen auf das dynamische Systemverhalten von Maschinen unter wiederkehrender Stoßanregung, 60. Tribologie-Fachtagung (GFT), Göttingen 2019

### Veröffentlichungen 2018

Schäfer, G.: Fräsen versus Erodieren. In: Tagungsband zur Werkstoffprüfung 2018 05./06.12.2018, Seite 149 – 154, ISBN 978-3-941269-99-6

Schäfer, G.; Mänz, T.: Auslegung von Rändelpressverbindungen. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 85 – 94, ISBN 978-3-18-092337-6

Wild, J.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Optimierung der Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen in erweiterter Form. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 155 – 164, ISBN 978-3-18-092337-6

Mörz, F.; Schäfer, G., Selzer, M.; Ziaei, M.: Optimierung des Zahnwellenprofils primär zur Drehmomentübertragung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Fertigungsverfahren. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 165 – 176, ISBN 978-3-18-092337-6

Mörz, F.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Beitrag zur Verbesserung der Anwendung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 239 – 243, ISBN 978-3-18-092337-6

Wild, J.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Optimierung der Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen durch normative Erweiterung. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 283 – 290, ISBN 978-3-18-092337-6

Jakob, M.; Leichtbau und Tragfähigkeitssteigerung bei Zahnwellenverbindungen - Methodisches Vorgehen zur Auslegung umformend hergestellter und auf Torsion belasteter dünnwandiger Leichtbau-Profilwellen. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 291 – 295, ISBN 978-3-18-092337-6

Mörz, F.; Schäfer, G., Wild, J.; Selzer, M.; Ziaei, M.: FVA-742 I, Optimierung des Zahnwellenprofils primär zur Drehmomentübertragung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Fertigungsmöglichkeiten, Abschlussbericht, IGF-Vorhaben Nr. 18406 BG, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2018

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M.: Multi-layer drum winches within subsea hoisting cranes. Lifting & Rigging Seminar, 27th September 2018, Amsterdam

Jakob, M.; Auslegung und Optimierung von Bauteilgeometrien mittels FEM und DoE am Beispiel dünnwandiger Profilwellen. In: Tagungsband zum 16. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, 11./12.10.2018, Seite 132 – 143, ISBN 988-3-00-059609-4

Mörz, F.; Lohrengel, A.: Beitrag zur Verbesserung der praktischen Realisierung der geometrischen Gestalt von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, In: Tagungsband zum 16. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, 11./12.10.2018, Seite 260 – 271, ISBN 978-3-00-059609-4

Schäfer, G.; Korte, T.: Längsstifte als kerbbarme Welle-Nabe-Verbindung. In: Tagungsband zum 16. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, 11./12.10.2018, Seite 306 – 317, ISBN 978-3-00-059609-4

Schulze, M.; Lohrengel, A.; Wächter, M.: Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln. Auf CD zum 8. Fachkolloquium InnoZug, 6. und 7. September 2018, ISBN 978-3-945479-10-0

Schäfer, G.; Rolshofen, W.; Thoden, D.: Determination of Acoustic Behavior of Locally Modified Structures by Scanning LDV, in: Tomasini, E.P., 13. Conference on Vibration Measurements 20. – 22. June 2018, Ancona

Schulze, M.; Lohrengel, A.; Recknagel, T.; Schmidt, T.: Lebensdauer und Wickelverhalten kunststoffummantelter Drahtseile. In: Tagungsband zur 26. Kranfachtagung, 8. März 2018, Seite 101 – 115, ISBN 978-3-86780-560-5

### Veröffentlichungen 2017

Martinewski, V.; Lohrengel, A.; Rienäcker, A.; Ochse, G.; Qian, B.: Simulationsfreie Auslegung von Freiläufen. In: Tagungsband zum 15. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2017, 05./06.10.2017, Seite 337 – 346, ISBN 978-3-940402-15-8



Prumbohm, M.; Chorzewski, D.; Lohrengel, A.: FEM-Modell der grundlegenden Vorgänge einer Anlage zum Zerlegen metallisch umhüllter Bauteile. In: Tagungsband zum 15. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2017, 05./06.10.2017, Seite 77 – 87, ISBN 978-3-940402-15-8

Hofmann, S.: Berücksichtigung radial aufweitender Lasten am stirnseitig befestigten Freilauf. In: Tagungsband zum 15. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2017, 05./06.10.2017, Seite 39 – 48, ISBN 978-3-940402-15-8

Prumbohm, M.: Neuartiges Verfahren zur Zerlegung blechumhüllter Elektroteile. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaften "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" sowie „Werkstoffe, Konstruktion, Lebensdauer“ 2017, 20.11.2017, Würzburg

Schäfer, G.; Schmelter, R.: Reibung im Längenausgleich von Kreuzgelenkwellen. In: Tagungsband zur VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2017, 17./18.05.2017, Seite 273 – 276, VDI-Berichte 2309, ISBN 978-3-18-092309-3

Martinewski, V.; Lohrengel, A.; Rienäcker, A.; Ochse, G.; Qian, B.: Erweitertes Lebensdauermodell für Freilaufkupplungen. In: Tagungsband zur VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2017, 17./18.05.2017, Seite 277 – 280, VDI-Berichte 2309, ISBN 978-3-18-092309-3

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Erlendsson, H; Magnusson, J. A.; Smeets, P; Tacken, B.: The influence of high performance fibre rope designs on drum load and spooling performance in multi-layer drum equipment; Rope- Present and Future; Proceedings of the OIPEEC Conference 2017, M. A. R. Dohm, La Rochelle Vieux Port, France, ISBN 978-0-9552500-4-0

Hess, M.; Ergebnis experimenteller Untersuchungen für Druckkammlager im Mischreibungsgebiet. <http://dx.doi.org/10.21268/20170718-120141>. Version: Juli 2017

Hess, M.; An Laufflächen von Prüflingen zur Bestimmung des Übergangsverhaltens von Druckkammlagern aus der Mischreibung in die Vollschrimerung aufgenommene Rauheitsschriebe. <http://dx.doi.org/10.21268/20170623-152310>. Version: Juli 2017

Hess, M.; Lohrengel, A.; Thrust cone bearings provide increased efficiency for helical gear units at moderate speed levels: Indications for possible energy saving potential in an expanded field of application. In: Forschung im Ingenieurwesen, Nr. 81 (2017), Sep, Nr. 2, S. 135–143. DOI 10.1007/s10010–017–0229–x. – ISSN 1434–0860

Hess, M.; Lohrengel, A.; Thrust cone bearings provide increased efficiency for helical gear units at moderate speed levels: Indications for possible energy saving potential in an expanded field of application. In: International Conference on Gears 2017, 13.-15.09.2017, Seite 231 – 242, VDI-Berichte 2294.1, ISBN 978-3-18-092294-2

Lohrengel, A.; Hess, M.: Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von Schrägverzahnten Getrieben. In: 58. Tribologie-Fachtagung 2017: Reibung, Schmierung und Verschleiß; Forschung und praktische Anwendungen; Sonderband; Abschlusskolloquium „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ SPP 1551 der DFG; Göttingen, 25. bis 27. September 2017. Gesellschaft für Tribologie e.V., GfT, Aachen, S. 83-93. ISBN/ISSN: 978-3-9817451-2-2

Hess, M.: Auswirkungen von Laufflächenbombierungen auf den Schmierfilmaufbau in Druckkammern. In: 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 5. und 6. Oktober in Duisburg: Interdisziplinäre Produktentwicklung. Essen: Universität Duisburg-Essen, Universitätsbibliothek, 2017. – ISBN 978–3–940402–15–8, S. 59–68

Kasüschke, L.; Schulze, M.; Lohrengel, A.: Dehnungsänderung in Seilen bei der Umschlingung von Treibscheiben; Technical Report Fakultät für Mathematik/ Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal; Mai 2017, ISSN 1869-8018

### Veröffentlichungen 2016

Schäfer, G.: Passverzahnungen nach DIN 5480 kompatibel optimiert. In: Tagungsband zur 7. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2016), 09./10.11.2016, Seite 153 – 164, VDI-Berichte 2287, ISBN 978-3-18-092287-4

Hilgermann, J.L.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Slip Measurement in a Frictional Connection by Torsional LDV, in: Tomasini, E.P., 12. Conference on Vibration Measurements 2016, AIP Conf. Proc. 1740, Ancona, ISBN 978-0-7354-1397-9

Schulze, M.; Lohrengel, A.; Stahr, K.: Auswirkungen von Faserseilen auf die Bewicklung der Seiltrommel, 7. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau, 20. und 21. Januar 2016, Clausthal-Zellerfeld, ISBN 978-3-86948-481-5

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Stahr, K.: Auswirkungen von Faserseilen auf die Bewicklung der Seiltrommel; Bergbau 8/2016, ISSN 0342-5681

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M.; Stahr, K.: Seiltrommeln mit Faserseilen; DRAHT 6/ Dezember 2015, ISSN 0012-5911; [http://www.drahtmagazin.de/draht-fachartikel/seiltrommeln-mit-faserseilen\\_32114\\_de](http://www.drahtmagazin.de/draht-fachartikel/seiltrommeln-mit-faserseilen_32114_de)

Martinewski, V.; Ochse, G.: FVA-694, Freilauf kombinierte Lasten, Abschlussbericht, Forschungsreport 2016, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2016

Selzer, M.; Wild, J.: FVA 742 I, Optimierung des Zahnwellenprofils primär zur Drehmomentübertragung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Fertigungsmöglichkeiten, Zwischenbericht, Forschungsreport 2016, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., (AiF 18406 BG), 29./30.11.2016

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Wild, J.: Einfluss von Sicherungsringnuten auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen. In: Tagungsband zur 7. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2016), 09./10.11.2016, Seite 271 – 277, VDI-Berichte 2287, ISBN 978-3-18-092287-4

Wendler, J.; Schlecht, B.; Wild, J.: Numerische und experimentelle Analyse der Gestaltfestigkeit von Zahnwellenverbindungen bei Umlaufbiegung. In: Tagungsband zur 7. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2016), 09./10.11.2016, Seite 139 – 152, VDI-Berichte 2287, ISBN 978-3-18-092287-4

Hofmann, S.: FVA-704, Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Abschlussbericht; Forschungsreport 2016; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2016; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2016

Wendler, J.; Wild, J.: Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen: Tragfähigkeit von Profilverbindungen (Zahnwellenverbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen. Forschungsvorhaben Nr. 467 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., (AiF 16661 BG)

Schmelter, R.: FVA-505 II, Reibwert- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich, Abschlussbericht, Forschungsreport 2016; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2016; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2016

### Veröffentlichungen 2015

Herre, M.; Schäfer, G.; Wild, J.: Splined Shaft-Hub Connection with optimized Foot Geometry, Proceedings of the IN-TECH Conference 2015; Page 260 - 263, Dubrovnik, ISSN 1849-0662

Schäfer, G.; Schlecht, B.; Senf, M.; Wendler, J.: Biege- und Torsionsformzahlen von Zahnwellen-Verbindungen zur Anwendung im Tragfähigkeitsnachweis nach DIN 743, Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2015, 8. und 9. Dezember 2015, Dresden, ISBN 978-3-95908-030-9

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Stahr, K.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Challenging rope applications; Proceedings of the OIPEEC Conference 2015, Dr. I.M.L. Ridge, Stuttgart, Germany, ISBN 978-0-9552500-5-7.

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Stahr, K.: Auswirkungen von Faserseilen auf die Bewicklung der Seiltrommel; 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2015, Clausthal-Zellerfeld

Lohrengel, A.; Leistner, C.; Traxl, R.; Hauböck, H.: Influences on winch drums arising from variations of the transverse compressive stiffness of wire ropes in correlation to their service life, 20th North Sea Offshore Crane and Lifting Conference

Lohrengel, A.; Prumbohm, M.; Schäfer, G.: Presentation of a novel approach to recycle metal coated products; MTM-Congress in Varna, 17. - 18. September 2015; Sofia: MTM – International Journal Issue 12/2015; Scientific Technical union of mechanical engineering, Sofia; ISSN 1313-0226

Langenbach, J.; Wächter, M.; Lohrengel, A.; Müller, N.: Teaching Engineering Drawing in a Technology Changing Environment; The 17th International Conference on Engineering & Product Design Education, 3. und 4. September 2015 in Loughborough, ISBN 978-1-904670-62-9

Langenbach, J.; Müller, N.: Einbindung von Normen in die frühen Phasen in der Produktentwicklung; 39. Konferenz Normenpraxis, 1. und 2. Oktober 2015 in Ingolstadt

Langenbach, J.; Nagler, N.; Müller, N.; Lohrengel, A.: Herausforderungen und Nutzen des systematischen Testens numerischer Berechnungswerkzeuge; Konstruktion; Juni 2015, ISSN 0720-5953

Martinewski, V.; Qian, B.: FVA-694, Freilauf kombinierte Lasten, Zwischenbericht, Forschungsreport 2015, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2./3.12.2015

Hofmann, S.: FVA-704, Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Zwischenbericht; Forschungsreport 2015; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2015; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2015

Schmelter, R.: FVA-505 II, Reibwert- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich, Zwischenbericht, Forschungsreport 2015, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2./3.12.2015

Selzer, M.; Wild, J.: FVA-742 I, Optimierung des Zahnwellenprofils primär zur Drehmomentübertragung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Fertigungsmöglichkeiten, Zwischenbericht, Forschungsreport 2015, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2./3.12.2015

Menze, P.; Wild, J.: Grundpraktikum Gelenkwellen. Skript zum Praktikumsversuch V05. In: Grundpraktikum Maschinenlabor, Versuch des Instituts für Maschinenwesen (V05)

Lohrengel, A.; Heß, M.; Schäfer, G.: Druckkamlagerungen – Gesteigerte Effizienz für schrägverzahnte Getriebe; In: Gleit- und Wälzlagerungen 2015: Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung; Schweinfurt, 06. und 07. Mai 2015. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2015 (VDI-Berichte, 2257). ISBN 978-3-18-092202-7, S. 221-234

### Veröffentlichungen 2014

Martinewski, V.; Qian, B.: FVA-694, Freilauf kombinierte Lasten, Zwischenbericht, Forschungsreport 2014, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2./3.12.2014

Hofmann, S.: FVA-704, Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Zwischenbericht; Forschungsreport 2014; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2014; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2014

Mänz, T.: FVA-658 I, Untersuchungen von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Abschlussbericht, Forschungsreport 2014, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2014

Schmelter, R.: FVA-505 II, Reibwert- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich, Zwischenbericht, Forschungsreport 2014, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2./3.12.2014

Wendler, J.; Wild, J.: FVA-467 II, Tragfähigkeit von Profilverbindungen (Zahnwellen-Verbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen, Abschlussbericht, Forschungsreport 2014, CD-ROM; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2./3.12.2014

Amorim, F.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Production of EDM Electrodes by Layer Manufacturing; 6th BRAGECRIM Annual Meeting, 26. /27.11.2014, Darmstadt

Hilgermann, J.L.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen; 6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2014, 5./6.11.2014, VDI-Berichte 2238, S. 213-223, ISBN 978-3-18-092238-6

Lohrengel, A.; Mänz, T.; Schäfer, G.: Untersuchungen an Pressverbindungen mit gerändelter Welle; 6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2014, 5./6.11.2014, VDI-Berichte 2238, S. 119-130, ISBN 978-3-18-092238-6

Schäfer, G.: Auslegung von Passverzahnungen – In Kombination mit dem örtlichen Konzept der FKM-Richtlinie; 6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2014, 5./6.11.2014, VDI-Berichte 2238, S. 53-64, ISBN 978-3-18-092238-6

Lohrengel, A.; Heß, M.: Druckkamm Lagerungen zum Einsatz in effizienten schrägverzahnten Getrieben; Technical Report Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal; Januar 2014, ISSN 1869-8018

Schulze, M.; Lohrengel, A.; Stahr, K.: Auswirkungen von Faserseilen auf die Bewicklung von Seiltrommeln; 6. Fachkolloquium InnoZug, Innovative Anwendungen für Hochleistungsfasern in der Fördertechnik 23. und 24. September in Chemnitz, ISBN 978-3-945479-00-1

Lohrengel, A.; Wächter, M.; Stahr, K.; Schulze, M.: Longitudinal and transversal stiffness of wire hybrid and fibre ropes and their effects on the strain scenario of multilayer wound rope drums; IMCA Wire Rope Workshop 2014, Amsterdam 18th March 2014

Müller, N.; Langenbach, J.: Digitale Modelle senken Kosten und steigern Qualität; Technologie-Informationen, 1/2014

Langenbach, J.; Deiters, A.; Hortop, A.; Lachmayer, R.; Lohrengel, A.; Vietor, T.: Improving Engineering Education Through Distributed Development Projects; The 16th International Conference on Engineering & Product Design Education, 4. und 5. September 2014 in Enschede, ISBN 978-1-904670-55-1

Langenbach, J.; Nagler, N.; Müller, N.; Lohrengel, A.: Systematisches Testen von numerischen Berechnungswerkzeugen; 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 16. und 17. Oktober 2014 in Bayreuth, ISBN: 978-3-00-046544-4

## Erschienenene Institutsmitteilungen seit 2011

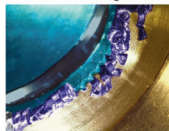
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2011



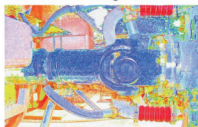
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2012



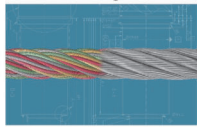
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2013



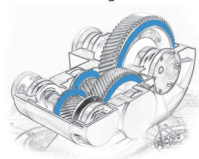
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2014



 TU Clausthal

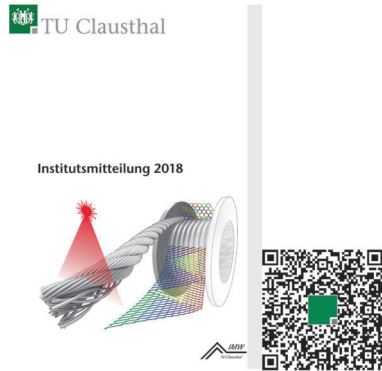
Institutsmitteilung 2015



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2016





Die jeweiligen Institutsmitteilungen finden Sie ebenso auf unserer Webseite.

## Autorinnen und Autoren

**Ammersdörfer, Theresa:** Jahrgang 1992, studierte Technische Betriebswirtschaftslehre an der TU Clausthal, seit 04/2021 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.

ammersdoerfer@imw.tu-clausthal.de

**Barton, Sebastian:** Jahrgang 1988, studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover (LUH), von 05/2014 bis 11/2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde, LUH, Promotion 05/2022 zum Thema „Zerstörungsfreie Bewertung des Randzonenzustands und Schädigungsgrads in Nickelbasislegierungen infolge von Hochtemperaturkorrosion“, seit 11/2021 Bereichsleiter Zerstörungsfreie Prüfverfahren an der LUH.

barton@iw.uni-hannover.de

**Bauer, Robin:** Jahrgang 1995, studierte Maschinenbau an der Universität Kassel, seit 04/2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

bauer@imw.tu-clausthal.de

**Dreßler, Nick:** Jahrgang 1992, Student des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Clausthal, seit 11/2022 Hilfswissenschaftler am IMW.

nick.frederik.dressler@tu-clausthal.de

**Duchâteau, Florian:** Jahrgang 1994, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 04/2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

duchateau@imw.tu-clausthal.de

**Gansel, René:** Jahrgang 1994, studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover, seit 06/2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde, LUH.

gansel@iw.uni-hannover.de

**Heinrich, Christian:** Jahrgang 1995, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 10/2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

heinrich@imw.tu-clausthal.de

**Inkermann, David:** Jahrgang 1983, studierte Maschinenbau an der TU Braunschweig, bis 09/2019 akademischer Rat und Abteilungsleiter am Institut für Konstruktionstechnik der TU Braunschweig, Promotionsthema: Anwendung adaptiver Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Systeme, ab 10/2019 Verwalter des Lehrstuhls Rechnerintegrierte Produktentwicklung am IMW, seit 09/2021 Übernahme der Professur für den Lehrstuhl Integrierte Produktentwicklung am IMW.

inkermann@imw.tu-clausthal.de

**Klügel, Niklas:** Jahrgang 1994, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 02/2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

kluegel@imw.tu-clausthal.de

**Krahl, Sören:** Jahrgang 1992, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 06/2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

krahl@imw.tu-clausthal.de



**Küster, Danny:** Jahrgang 1986, Feinwerkmechaniker, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, 10-11/2023 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

**Kuper, Stefan:** Jahrgang 1990, Agile Coach & Consultant, studierte Technologiemanagement an der TU Braunschweig.  
mail@stefankuper.de

**Lohrengel, Armin:** Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau/ Konstruktionstechnik an der TU Clausthal und RWTH Aachen, bis 09/1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und -gestaltung der RWTH Aachen, Promotionsthema: Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Freiläufen, bis 01/2007 Leiter Maschinenentwicklung Paul Hartmann AG Heidenheim, seit 02/2007 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW, Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Konstruktionslehre  
lohrengel@imw.tu-clausthal.de

**Losch, Miriam:** Jahrgang 1988, studierte Wirtschaftsingenieurwesen und Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 10/2018 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.  
losch@imw.tu-clausthal.de

**Meyer, Johannes:** Jahrgang 1996, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 12/2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
meyer@imw.tu-clausthal.de

**Neumann, Merle:** Jahrgang 1997, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 02/2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.  
neumann@imw.tu-clausthal.de

**Quanz, Markus:** Jahrgang 1997, studierte Maschinenbau an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, seit 01/2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
quanz@imw.tu-clausthal.de

**Schäfer, Günter:** Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 11/1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion 11/1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen, seit 2002 akademischer Oberrat.  
schaefer@imw.tu-clausthal.de

**Schumacher, Thomas:** Jahrgang 1989, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der HAWK Göttingen und der TU Clausthal, seit 05/2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
schumacher@imw.tu-clausthal.de

**Stök, Max:** Jahrgang 1991, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 10/2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
stoeck@imw.tu-clausthal.de

**Wächter, Martina:** Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 04/1985 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.  
waechter@imw.tu-clausthal.de

## So finden Sie das IMW

### Anschrift

Institut für Maschinenwesen  
Robert-Koch-Straße 32  
38678 Clausthal-Zellerfeld



Routenplan



### Aus Richtung Hannover / Hamburg:

A7 bis Ausfahrt Seesen → An der Ampel rechts; nach ca. 1,5 km links auf die vierspurige B243

B243 an der Ausfahrt Clausthal-Zellerfeld, Braunlage verlassen auf die B242

B242 → Richtung Ortsteil Zellerfeld abbiegen

Im Ortsteil Zellerfeld rechts auf die B241 einbiegen → nach lang gezogener Linkskurve in den Kreisverkehr einbiegen → auf rechter Spur dem Verlauf der B241 folgen und den Kreisverkehr verlassen → nach ca. 100 m rechts die Robert-Koch-Straße einbiegen.

Das IMW (Gebäudenummer B2) befindet sich nach ca. 400 m (zwei Querstraßen) auf der rechten Seite.

### Aus Richtung Göttingen/Kassel:

A7 bis Ausfahrt Northeim-Nord → B3 bis Northeim; in Northeim Umgehungsstraße zur B247 → B247 Richtung Katlenburg / Duderstadt

In Katlenburg auf die B241 Richtung Osterode abbiegen.

Am Ortseingang Osterode auf die B243 Richtung Herzberg. Nach ca. 500 m Ausfahrt Goslar / Clausthal-Zellerfeld abfahren → B241 Richtung Clausthal-Zellerfeld

Nach Ortseingang Clausthal-Zellerfeld der Hauptstraße folgend rechts abbiegen → an T-Einmündung (Tankstelle rechterhand) rechts abbiegen und Clausthal verlassen.

Nach 1,5 km links abbiegen Richtung Goslar / Clausthal → Ortsschild Clausthal → in die dritte Straße (Robert-Koch-Straße) links einbiegen.

Das IMW (Gebäudenummer B2) befindet sich nach ca. 250 m auf der linken Seite.

