

Institutsmitteilung 2024



IMW
TU Clausthal

Institutsmitteilung 2024 (Nr. 49)



Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 49
(Dezember 2024)

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

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Die TU Clausthal wird 250 Jahre alt – das wird gefeiert!

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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 1

A: Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

Krahl, S.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.
Passverzahnungen mit elliptischer Zahnfußform 5

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.
Klemmrollenfreiläufe im Hochlastbereich 13

Hanse, M.; Lohrengel, A.
Rotordynamikuntersuchung e. abschaltbaren Dämpfungselements 19

Klügel, N. ; Schäfer, G.; Lohrengel, A.
Einfluss von Flankenpassung und Lastverhältnis auf die lokale Beanspruchung von Passverzahnungen 25

Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.
Abschluss der 1. Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ 35

Stök, M.; Lohrengel, A.
Geometrische Überlegungen zu plastikummantelten Drahtseilen 41

B: Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

Ammersdörfer, T.; Meyer, J.; Inkermann, D.
Systems Engineering Method Matrix: Ein Tool zur anwenderspezifischen Prozess- und Methodengestaltung 51

Schumacher, T.; Inkermann, D.
Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering 65

Bauer, R.; Inkermann, D.
Bewertung von Transfer Learning im Kontext der Lebensdauerprognose von Systemen 73

Breidohr, M.; Inkermann, D.
LifeLab - Die Lernfabrik für zirkuläre Produktentstehung am Institut für Maschinenwesen 83

Stephan, R.; Inkermann, D.
Wiederverwendung von SysML Modellen durch die Nutzung von Wissensgraphen 89

C: Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Heinrich, C.; Lohrengel, A.</i> Effizienter, schneller und flexibler Druckkammerprüfstand	95
<i>Schäfer, G.</i> Testapparatur für Passverzahnungsverschleiß	99
<i>Alkountar, E.; Lohrengel, A.</i> Analyse der Dämpfungseigenschaften von metallischen Legierungen: Abhängigkeit von elastischer Dehnung und Frequenz.....	103

D: Hochschule und Kontakte

<i>Isranuri, I.; Alfisyahrin, R. N.; Prasajo, S. M.</i> Untersuchung der Merkmale konvergenter und konvergent-diver- genter Düsenköpfe von Dampfturbinen mit kreisförmigen und qua- dratischen Querschnitten.....	117
<i>Wruck, S.; Dell'Aquila, S.</i> TUConnect: Der Hochschulinformationstag im Oberharz	129

Ausstattung etc.

Das Institut und seine technische Ausrüstung	133
Veröffentlichungen des Institutes seit 2015	137
Erschienene Institutsmittelungen seit 2012.....	151
Autoren	153
Anfahrt	157

Vorwort

Liebe Projektpartner und Freunde:innen des Instituts für Maschinenwesen,

zwei Semester, ein Jahr, wieder einmal Zeit für unsere Institutsmittteilungen. In gewohnter Weise geben wir in diesem kleinen Büchlein Einblicke in unsere Arbeiten in Forschung und Lehre. Natürlich ist es nicht möglich alle Ergebnisse darzustellen. Die kurzen Artikel sollen auch nicht den direkten, persönlichen Austausch ersetzen, sondern vielmehr ein Anstoß für einen weiteren Austausch oder weitere Zusammenarbeiten sein. Sprechen Sie uns also an, wenn Sie Interesse an einem der Themen haben.

Gleichzeitig möchten wir die Gelegenheit für einen kurzen Rückblick nutzen und an dieser Stelle einen Blick auf die Highlights und Herausforderungen im Jahr 2024 werfen.

Wie viele andere Universitäten treibt auch uns die Frage nach der Zukunft der Ingenieurausbildung, speziell im Maschinenbau um. Die Studierendenzahlen sind in den vergangenen Semestern zwar nicht weiter gesunken, sie sind aber weiterhin nicht zufriedenstellend. Dabei erleben wir in der direkten Zusammenarbeit mit Industriepartnern immer wieder den Bedarf an gut ausgebildeten Maschinenbauer:innen. Woran liegt es also, dass das Studium für Schüler:innen nicht attraktiv erscheint? Zu wenig KI, zu wenig Nachhaltigkeit, zu theoretisch? Diese Fragen werden wir in naher Zukunft klären müssen. Einen gewissen Spielraum verschafft uns derzeit der gute Zulauf internationaler Studierender. Gleichzeitig ergeben sich hier neue Herausforderungen nicht nur in der englischsprachigen Lehre, sondern auch bei der Vorbereitung des Berufseinstiegs. Zwar ist dieses Thema für uns als Institut nicht neu, aber die konkreten Herausforderungen wie bspw. geringe Deutschkenntnisse erfordern doch neue Ansätze.

Auch die angespannte wirtschaftliche Lage in der Industrie und Unbeständigkeit in politischen Entscheidungen bekommen wir unmittelbar zu spüren. Fördermittel werden knapper und Industriepartner zurückhaltender in der Beteiligung an größeren Projekten. Umso wichtiger wird damit das Vertrauen, dass wir mit Ihnen und euch in den zurückliegenden Zusammenarbeiten aufbauen konnten. Wir sind weiter davon überzeugt, dass es starke Forschung und eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Universität braucht, um erforderliche Transformationen bspw. hin zu einer Kreislaufwirtschaft, gestalten und umsetzen zu können.

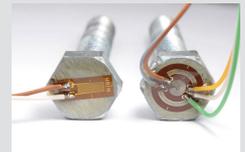
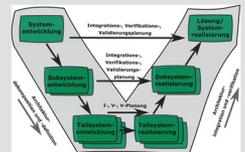
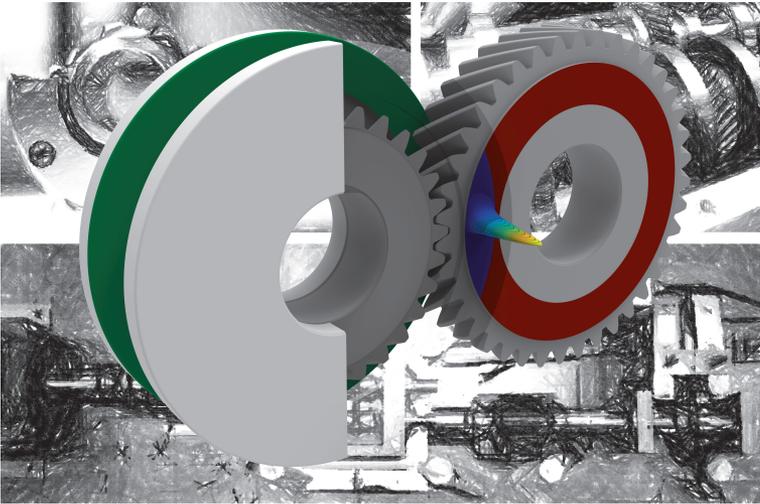
Trotz einiger Herausforderungen blicken wir am Institut durchaus zufrieden auf das Jahr 2024 zurück. Wir konnten unser Team weiter vergrößern. Als neue Kollegen verstärken uns seit diesem Jahr Dr. Apoorv Bhatt, Emil Alkountar, Markus Breidohr und Roman Stephan. Gleichzeitig sind unser Elektrotechniker Andreas Zietz und unser Systemadministrator Hans-Joachim Jach-Reinke aus dem aktiven Dienst ausgeschieden. Neben diesen personellen Veränderungen konnten wir mit unseren

aktuellen Forschungsthemen wichtige Projekte einwerben. Dazu zählen bspw. die Beteiligung am niedersächsischen Zukunftslabor Circular Economy und das Projekt „Voll-kontinuierliches Heißluft/Heißdampfverfahren zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen“ in der Förderlinie Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung in Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen. Auch in der Organisation sowie vielen kleineren administrativen Abläufen konnten wir uns verbessern. Damit sind wir gut aufgestellt für das kommende Jubiläumsjahr unserer dann 250 Jahre jungen TU Clausthal.

Wir als IMW-Team wünschen Ihnen ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes Jahr 2025.

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

A



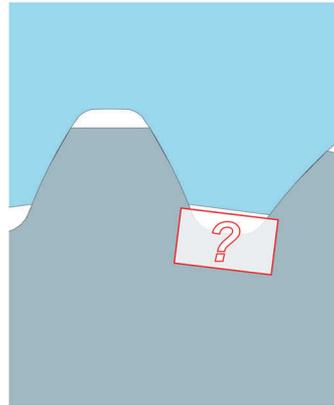
Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen



Passverzahnungen mit elliptischer Zahnfußform

Krahl, S.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.

Die Zahnfußform der Welle hat entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit von Passverzahnungen. Nach gängigen Normen sind zurzeit Fußausrundungen in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens (DIN 5480) oder Mindestfußrundungsradien (ISO 4156) benannt, welche einer kreisförmigen Ausrundung des Fußes angelehnt sind. Mit diesen Formen geht bei größer gewählten Radien zwar eine Beanspruchungsreduzierung einher, es erfolgt aber auch ein signifikanter Verlust des Nettoquerschnitts der Welle. Um hier Abhilfe zu leisten, erscheint die elliptische Fußform als probates Mittel. Der folgende Artikel gibt einen kurzen Überblick zu möglichen Potenzialen durch diese alternative Fußform.



The tooth root shape of the shaft has a decisive influence on the load capacity of splined shaft-hub connections. According to current standards, foot fillets are specified depending on the manufacturing process (DIN 5480) or minimum foot radii (ISO 4156) are given, which are based on a circular rounding of the foot. Although these shapes are associated with a reduction in stress with larger radii, there is also a significant loss of the net cross-section of the shaft. To address this issue, the elliptical foot shape appears to be a viable solution. The following article provides a brief overview of the potential benefits of this alternative foot shape.

Einleitung

Bei den heute im Antriebsstrang geforderten Leistungsdichten kommt es bei genormten Zahnwellen- und Keilwellenverbindungen immer häufiger zum Versagen durch einen Torsionsbruch der Welle. Zumeist geht dieser von der im Zahnfuß vorhandenen Kerbe aus, sodass eine Optimierung des Zahnwellenprofils unter Ausnutzung der in den bisherigen Normen enthaltenen Freiräume, insbesondere im Zahnfuß, erforderlich ist. Zeitgleich sollte die Verbaubarkeit mit genormten Gegenstücken erhalten bleiben, um möglichst schnell einen Einzug optimierter Profilformen in die industrielle Anwendung garantieren zu können.

Status Quo und Vorgehensweise

Zu möglichen Optimierungsansätzen auf Seiten der Passverzahnungen fanden bereits eine Reihe von Untersuchungen statt. Beispielhaft seien hier /1, 2, 3/ genannt. Als O-Ton kann zusammenfassend davon gesprochen werden, dass jeweils Zahnwellenverbindungen mit mittleren Zähnezahlen als vorteilhaft bezüglich der Drehmomentenübertragung identifizierbar sind. Zusätzlich kann durch eine Vergrößerung des Zahnfußrundungsradius auf $\rho_f = 0,48 \cdot m$ eine gesteigerte Drehmomentkapazität realisiert werden. Die Vollausrundung des Zahnfußes führt aufgrund des stärker werdenden Einschnitts in die Welle wiederum zu einer leichten Beanspruchungserhöhung. Diesem Sachverhalt wird in /4, 5/ gegengesteuert, indem alternative Fußformen untersucht werden. Sowohl der elliptischen Fußform als auch dem nach der Methode der Zugkraftdreiecke nach Mattheck /6/ ausgestalteten Zahnfuß können kein Vorteil gegenüber der einfachen (optimierten) Verrundung zugesprochen werden.

Dem Großteil der Untersuchungen ist gemein, dass der Geometrie ein Profil nach DIN 5480 /7/ mit einem Flankenwinkel von $\alpha = 30^\circ$ zu Grunde liegt. Lediglich in /3/ und /8/ werden weitere Flankenwinkel betrachtet. In /3/ werden diese der AFNOR /9/ und der ISO 4156 /10/ entnommen. Aufbauend auf den in /3/ geschilderten Ergebnissen wurden von Warnecke in /11/ unter Anleitung des Autors Profile mit den Flankenwinkeln $\alpha = 20^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ bei einem Modul $m = 1$ mm, einer Zähnezahl $z = 24$ und einem Durchmesser der Vollwelle von 25 mm betrachtet. Die Wellenkonturen wurden mit elliptischen Zahnfußformen versehen und hinsichtlich der Beanspruchung im Zahnfuß untersucht. Die Ergebnisse dieser numerischen Studie bilden die Grundlage für die folgenden Betrachtungen.

Die Ellipse als Zahnfußform

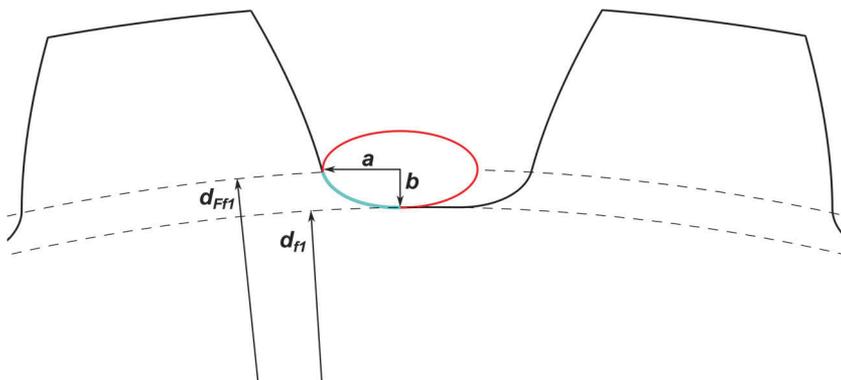


Abbildung 1: Elliptische Fußform und Halbachsen der Ellipse am Beispiel einer evolvierenden Passverzahnung

Die Variation der Fußform wurde in Anlehnung an /4/ so durchgeführt, dass nur unterhalb des Fußformkreisdurchmessers der Welle d_{Ff1} eine Anpassung vorgenommen wird. Damit wird gewährleistet, dass eine Paarbarkeit mit genormten Gegenstücken stets erhalten bleibt. Am Übergang von der Flanke in den Zahnfuß findet ein tangentialer Anschluss statt, wobei die Form der Ellipse über deren Halbachsenparameter a und b gesteuert werden kann, wie in Abbildung 1 zu sehen. Eine Abbildung von sowohl stehenden als auch liegenden Ellipsen wird hierdurch möglich. Durch diese Variationsmöglichkeit geht eine erhöhte Flexibilität hinsichtlich des Fußkreisdurchmesser der Welle d_{f1} einher, welche beim einfachen kreisrunden Fuß nicht vorhanden ist. Über die Form der Ellipse kann somit direkt Einfluss auf den zur Verfügung stehenden Nettoquerschnitt und damit auf das polare Widerstandsmoment der Welle genommen werden. Die Anpassung der Halbachsenparameter wurde dabei zwischen dem nach DIN 5480 für die wälzfräsende Fertigung vorgesehenen Fußrundungsradius von $\rho_{f1} = 0,16 \cdot m$ bis hin zum für den jeweiligen Flankenwinkel als Vollverrundung anzusehenden Fußverrundungsfaktor (bei Betrachtung einer kreisförmigen Fußausrundung) vorgenommen. Aus den so abgeleiteten Geometrien kann der resultierende Fußkreisdurchmesser der Welle bestimmt werden, welcher in Abbildung 2 für die Flankenwinkel $\alpha = 20^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$ bei Variation der Halbachsenparameter aufgetragen ist. Ins Auge sticht sofort das gegensätzliche Verhalten der Flankenwinkel bei Variation der Halbachsen. Während für das steile Profil wie zu erwarten der größte Fußkreisdurchmesser mit dem kleinsten Wert für die vertikale Halbachse und dem größten Wert für die horizontale Halbachse resultiert, ist das Verhalten beim flachen Profil genau gegensätzlich. Als Grund hierfür kann die gewählte Platzierung der Ellipse angesehen werden. Nähere Informationen hierzu finden sich in /11/. Auffällig ist zudem, dass für die steile Flanke mit $\alpha = 20^\circ$ eine deutlich größere Bandbreite an möglichen Fußkreisdurchmessern realisierbar ist. Grund hierfür ist der flache Übergang in den Zahnfuß bei $\alpha = 45^\circ$. Dieser hat auch einen von Haus aus „großen“ Fußkreisdurchmesser für das flache Profil zur Folge.

Nach DIN 743 /12/ berechnet sich das polare Widerstandsmoment, welches für die Bestimmung der statischen Sicherheit benötigt wird, mit dem Bauteildurchmesser im Kerbquerschnitt. Im vorliegenden Fall entspricht dieser dem Fußkreisdurchmesser. Für den Flankenwinkel $\alpha = 20^\circ$ kann im Vergleich zur Vollausrundung bei kreisförmigem Zahnfuß durch günstig gewählten elliptischen Fuß eine Steigerung der Sicherheit gegen bleibende Verformung um ca. 10 % erreicht werden. Beim flacheren Profil mit $\alpha = 45^\circ$ fällt der maximal erreichbare Zugewinn an Sicherheit mit ca. 2,4 % deutlich geringer aus.

Für die beiden nicht betrachteten Flankenwinkel von $\alpha = 30^\circ$ und $\alpha = 37,5^\circ$ nach ISO 4156 ist eine ähnliche Verhaltensweise, bei Einstufung der möglichen Fußkreisdurchmesser und der daraus ableitbaren statischen Sicherheiten zwischen den hier aufgeführten Werten zu erwarten.

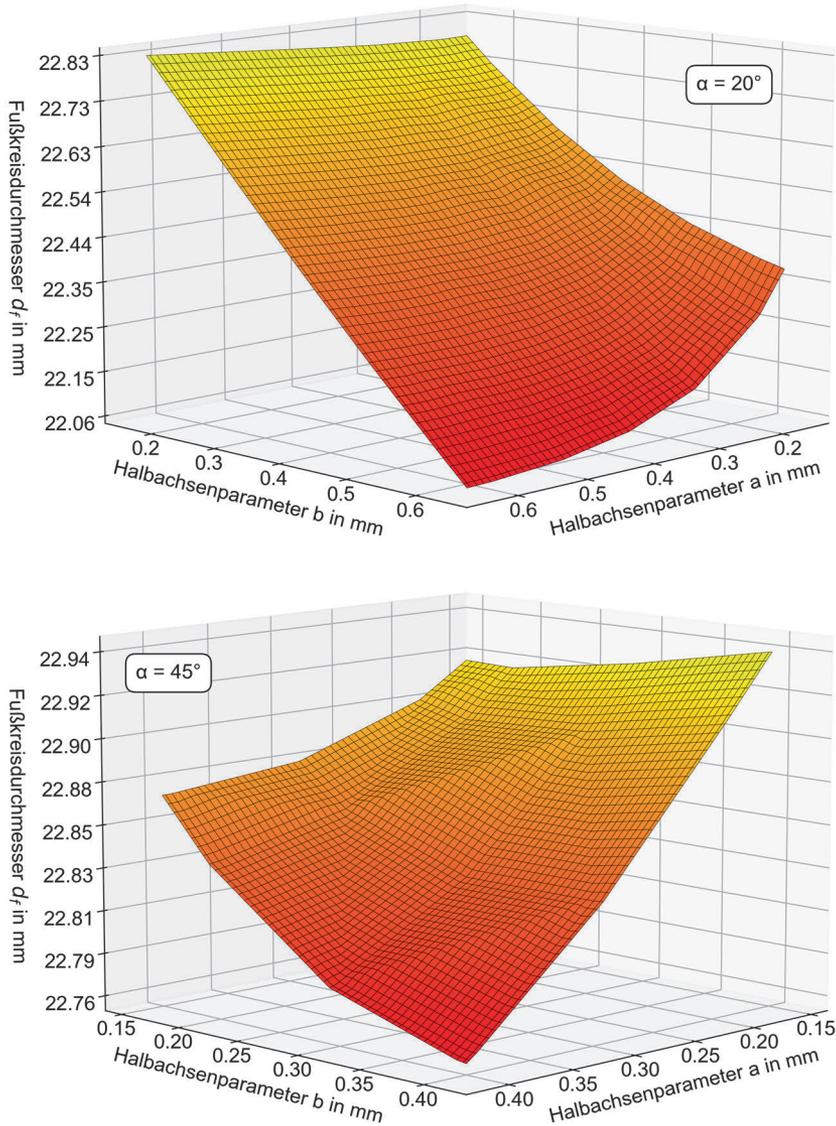


Abbildung 2: Resultierende Fußkreisdurchmesser bei Variation der Halbachsenparameter der Ellipse für Profile mit $\alpha = 20^\circ$ und $\alpha = 45^\circ$

Ergebnisse

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Ergebnisse der numerischen Studie. Es sind die resultierenden maximalen Vergleichsspannungen nach von Mises im zugseitigen Zahnfuß der Welle aufgenommen. Zusätzlich ist jeweils eine Referenz dargestellt, welche die Beanspruchung der Welle bei optimal gewähltem kreisrunden Fuß darstellt. Die Bereiche in denen durch günstige Wahl der Halbachsenparameter eine reduzierte Beanspruchung gegenüber der Referenz vorliegt sind entsättigt dargestellt.

Für beide Flankenwinkel zeigt sich, dass hinsichtlich der Zahnfußspannung nur eine sehr geringe Reduzierung der Beanspruchung, im unteren einstelligen Prozentbereich, erreicht werden kann. Eine signifikante Tragfähigkeitssteigerung kann gerade vor dem Hintergrund der numerischen Genauigkeit also nicht beobachtet werden.

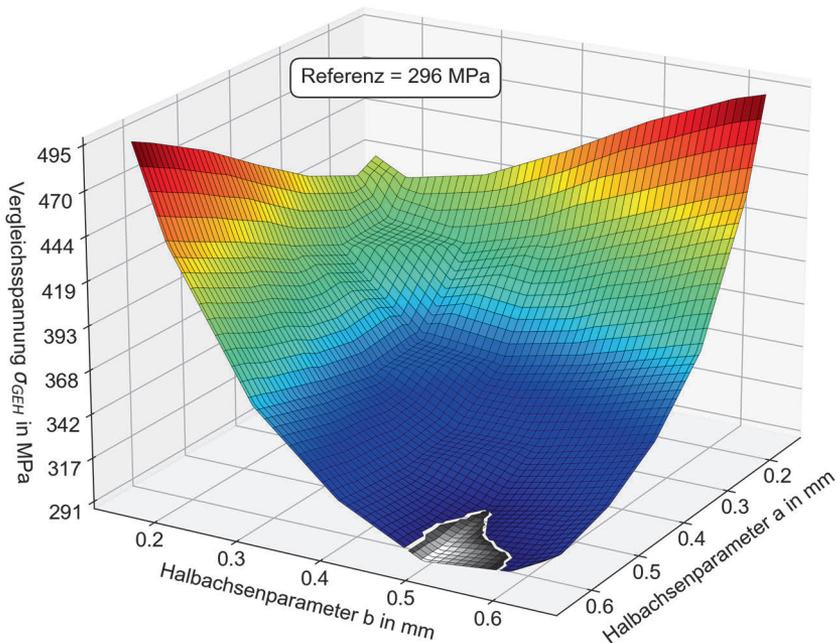


Abbildung 3: Vergleichsspannungen im zugseitigen Zahnfuß der Welle bei elliptischer Fußrundung am Profil mit $\alpha = 20^\circ$ und $m = 1 \text{ mm}$; Fußrundungsradius der Referenz: $\rho_{f1} = a = b = 0,5 \text{ mm}$

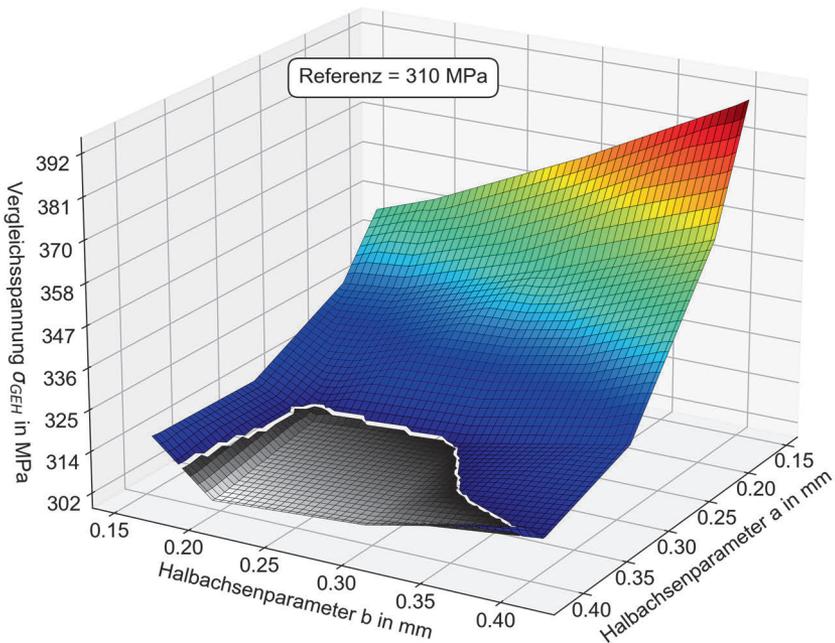


Abbildung 4: Vergleichsspannungen im zugseitigen Zahnfuß der Welle bei elliptischer Fußrundung am Profil mit $\alpha = 45^\circ$ und $m = 1$ mm; Fußrundungsradius der Referenz: $\rho_{f1} = a = b = 0,4$ mm

Bezüglich der statischen Übertragungsfähigkeit und den lokalen Zahnfußspannungen kann bei der hier durchgeführten Profilloptimierung mit elliptischer Zahnfußform ein divergentes Verhalten identifiziert werden. Durch geeignete Anpassung der Halbachsen der Ellipse kann einerseits ein erhöhter Fußkreisdurchmesser und damit eine höhere statische Sicherheit gegenüber der einfachen kreisrunden Fußform erreicht werden. Andererseits zeigen die Ergebnisse zu den lokalen Zahnfußspannungen aber auch, dass für jene Profile mit hohem Fußkreisdurchmesser zumeist durch die hierfür notwendige Wahl der Halbachsenparameter eine relativ scharfe Kerbe resultiert. Diese ruft wiederum eine Spannungsüberhöhung hervor, durch welche es zu einer Reduzierung der dynamischen Tragfähigkeit kommen würde (vgl. z.B. Abbildung 3). Insbesondere beim Profil mit $\alpha = 20^\circ$ kann dadurch mit der elliptischen Fußform keine wirkliche Beanspruchungsreduzierung gegenüber der optimalen kreisrunden Zahnfußform erzielt werden. Beim flachen Profil mit $\alpha = 45^\circ$ hingegen ist mit der Wahl der Halbachsenparameter zu $a = 0,4$ mm und $b = 0,2$ mm eine leichte Beanspruchungsreduzierung zu verzeichnen. Parallel dazu steigt der Fußkreisdurchmesser im Vergleich zum optimalen Profil bei kreisrundem Zahnfuß an, sodass auch eine erhöhte statische Übertragungsfähigkeit für das Profil mit $\alpha = 45^\circ$ zu erwarten ist. Generell kann festgehalten werden, dass sich für den Flankenwinkel $\alpha = 20^\circ$ Kombinationen

anbieten, bei denen die horizontale Halbachse möglichst groß und die vertikale Halbachse etwas darunter gewählt werden, um den elliptischen Zahnfuß möglichst kerbarm zu gestalten. Beim flacheren Profil mit $\alpha = 45^\circ$ ist ebenfalls die horizontale Halbachse möglichst groß zu gestalten, während hier aber der vertikale Halbachsenparameter relativ klein gehalten werden sollte, wie aus Abbildung 4 ersichtlich.

Zusammenfassung und Ausblick

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse für den Flankenwinkel $\alpha = 20^\circ$ erscheint die Nutzung einer elliptischen Zahnfußform zunächst als wenig vorteilhaft. Es kann jedoch festgehalten werden, dass für das hier betrachtete flache Profil mit $\alpha = 45^\circ$ eine Optimierung hinsichtlich der statischen Sicherheit und der lokalen Beanspruchung im Zahnfuß möglich ist. Gegenüber der optimierten kreisrunden Zahnausrundung (kurz vor der Vollausrundung) kann für beide Kriterien jeweils eine leichte Verbesserung prognostiziert werden.

Darüber hinausgehendes und bisher nur wenig betrachtetes Potenzial zur Tragfähigkeitssteigerung bieten Fußformen, welche z.B. der bionischen Optimierung entstammen. Denkbar sind hier vor Allem genetische und topologische Optimierungen des Zahnfußes. Zu bevorzugen sind dabei zunächst die genetischen Optimierungsansätze, welche bereits bei den Stirnradverzahnungen ihre Stärke unter Beweis stellen konnten /13/. Aktuell geplante Untersuchungen sollen daher die damit nutzbaren Tragfähigkeitsreserven bei den Passverzahnungen weitergehend analysieren.

Literatur

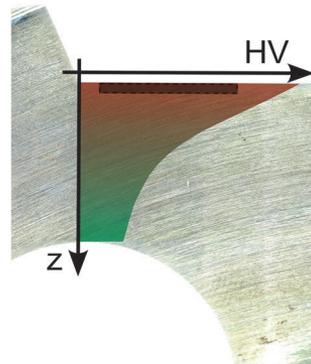
- /1/ Nsenga Biansompa, E.; Schäfer, G.: Zahnwellenberechnung, FVA-Berechnungsrichtlinie für Zahnwellen-Verbindungen, Forschungsvorhaben Nr. 591 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (591-FVA-I), 2015 (FVA-Heft 1139)
- /2/ Mörz, F.; Selzer, M.; Wild, J.: Abschlussbericht Optimierung des Zahnwellenprofils primär zur Drehmomentübertragung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Fertigungsmöglichkeiten. Forschungsvorhaben Nr. 742 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (AiF 18406 BG), Frankfurt/Main, 2018 (FVA-Heft 1316)
- /3/ Krahl, S.; Selzer, M.: Zahnwellen-Optimierung mit spezieller Berücksichtigung fertigungstechnischer und einsatzspezifischer Randbedingungen, nicht veröffentlichter Sachstandsbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 742 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (AiF 22776 BG)“. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 8. November 2023
- /4/ Schäfer, G.: Betrachtungen der Zahnfußausrundung von Passverzahnungen; Institutsmitteilungen Nr. 40, IMW Clausthal, S.23-28, 2015
- /5/ Schäfer, G.: Kerbspannungen von Passverzahnungen auf Hohlwellen; Institutsmitteilungen Nr. 41, IMW Clausthal, S.21-28, 2016
- /6/ Prof. Dr. Claus Mattheck: Verborgene Gestaltungsgesetze der Natur, Verlag Forschungszentrum Karlsruhe, 2006

- /7/ DIN 5480-1:2015-03, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 1: Grundlagen
- /8/ Wild, J.: Optimierung der Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-36961-3>
- /9/ Standard AFNOR NF E22-141, 01/08/1985. Cylindrical involute Splines
- /10/ Norm ISO 4156-1:2009-04: Passverzahnungen mit Evolventenflanken -Metrischer Modul, flankenzentriert — Teil 1: Grundlagen
- /11/ Warnecke, B.: Erstellung eines parametrischen FE-Modells zur Untersuchung optimierter Zahnfußgeometrien an Welle-Nabe-Verbindungen, unveröffentlichte Forschungsarbeit, Clausthal-Zellerfeld, 2024
- /12/ DIN 743-2:2012-12, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Teil 1: Grundlagen
- /13/ Billenstein, D.; Pollaschek, J.: Abschlussbericht FE-Tragfähigkeitsoptimierung Zahnfuß – Fertigungsgerechte, automatisierte FE-Optimierung der Zahnfußtragfähigkeit von Stirnrädern. Forschungsvorhaben Nr. 709 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (IGF 19233 N), Frankfurt/Main, 2021 (FVA-Heft 1423)

Klemmrollenfreiläufe im Hochlastbereich

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

Die Forschung an Klemmrollenfreiläufen mit Hartmetalleinlagen bzw. mit unterschiedlichen Einhärtetiefen soll fortgeführt werden. Ein Folgevorhaben ist geplant, um die offenen Fragen bezüglich der oberflächennahen Materialparameter Einhärtetiefe und E-Modul sowie der auftretenden Ausfallmechanismen Ermüdung und plastische Verformung an Klemmrollenfreiläufen im hochbelasteten Bereich zu klären. Es sollen die Übergänge der jeweiligen Ausfallmechanismen und die Lagen der Wöhlerlinien in hohen Lastbereichen ermittelt und so der Einfluss auf die Lebensdauer analysiert werden. Begleitend werden Simulationen durchgeführt, um Werkstoffbeanspruchungen zu analysieren und Auslegungsparameter für ein Berechnungsmodell ableiten zu können.



Research into roller clutches with carbide inserts and different hardening depths is to be continued. A follow-up project is planned to clarify the open questions regarding the near-surface material parameters of hardening depth and modulus of elasticity as well as the failure mechanisms of fatigue and plastic deformation that occur on roller clutches in the highly loaded area. The transitions of the respective failure mechanisms and the positions of the S-N-curves in high load ranges are to be determined and thus the influence on the lifetime analysed. Simulations will also be carried out in order to analyse material stresses and derive design parameters for a calculation model.

Einleitung und Problemstellung

Selbsttätig schaltende Freilaufkupplungen lassen sich in den Betriebszuständen „Sperrern“ und „Leerlauf“ betreiben. Während in Leerlaufrichtung ein reibungsarmer Betrieb angestrebt wird, ist in Last- bzw. Sperrichtung eine drehmomentabhängige Lebensdauerabschätzung gefordert. Freiläufe mit Hartmetalleinlagen im Wälzbereich der Innenringe und Freiläufe mit erhöhter Einhärtetiefe sind speziell für hohe Lastbereiche konzipiert, ohne dass im Vergleich zu konventionellen Rollenfreiläufen die Baugröße erhöht werden muss. Die höhere Leistungsdichte und damit einhergehenden sehr hohen ertragbaren Hertzschen Pressungen werden durch höhere Widerstandsfähigkeit der Innenringe erzielt. Ein anwendbares Lebensdauermodell für Freiläufe im Hochlastbereich existiert bisher nicht, sodass Hersteller weiterhin auf Erfahrungswissen und die damit oft einhergehende Überdimensionierung angewiesen sind.

Im Schaltbetrieb sind in Abhängigkeit der Betriebslast die Ausfallmechanismen Gewaltbruch infolge von Überlast, die klassische Werkstoffermüdung und der Wälzverschleiß bekannt, wie in /1, 2, 3, 4/ beschrieben. Im Vorgängervorhaben FVA 776 I /5/ konnte erstmals ein Ausfall durch plastische Verformung bei Rollenfreiläufen im Hochlastbereich nachgewiesen werden, wie in Abbildung 1 die Konturmessung einer Klemmrolle in Kombination mit der zugehörigen Wälzfläche eines Freillaufes mit Hartmetalleinlagen zeigt. Die Einordnung und die genauen Übergänge zwischen den unterschiedlichen Ausfallmechanismen sind nicht genau bekannt, eine Berechnungsgrundlage steht nicht zur Verfügung. Durch die ersten Untersuchungen im Vorgängervorhaben konnte die bisher unbekannte neue Ausfallursache „Plastizität“ erstmals bei Freiläufen analysiert werden.

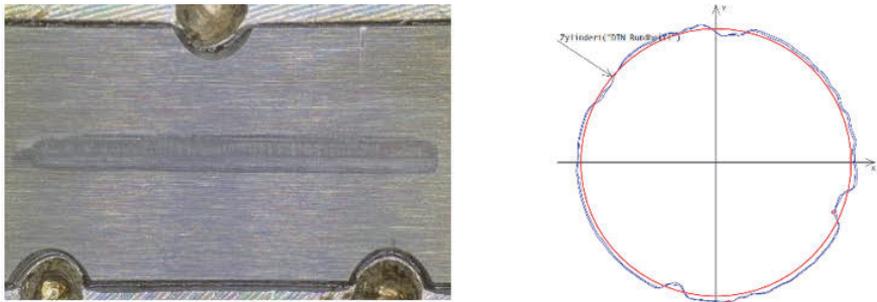


Abbildung 1: Schadensbild einer Klemmfläche und Rollenkontur von einem Freilauf mit Hartmetalleinsatz nach Versuchsende aus /5/

Ziel des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel ist die Ableitung einer Berechnungsgrundlage für die Freilauflebensdauer im Hochlastbereich unter Berücksichtigung der betrachteten oberflächennahen Parameter Einhärte tiefe und E-Modul (Hartmetall). Als Basis soll an die vorhandene und viel verwendete Berechnung der Ermüdungslebensdauer nach Welter /7/, Deppenkemper /8, 9/ und Lohregel /10, 11/ angeknüpft werden. Der bisherige Stand der Technik bezüglich Ausfallmechanismen bei Freiläufen zeigt Abbildung 2 links. Durch die Verwendung der Rollenfreiläufe im Hochlastbereich unter Ausnutzung der oberflächennahen Parameter treten höhere Belastungen bzw. Hertzische Pressungen im Freilaufkontakt auf, als es bei Standardfreiläufen der Fall ist. Hierbei zeigt sich der Ausfall der Klemmrollen durch plastische Verformung, sodass das bekannte Schaubild angepasst und erweitert werden muss, wie in Abbildung 2 rechts angedeutet. Zur Erreichung der Ziele wird an das Vorgängervorhaben angeknüpft und die bereits gewonnenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Simulationsrechnungen und Versuchen verwendet.

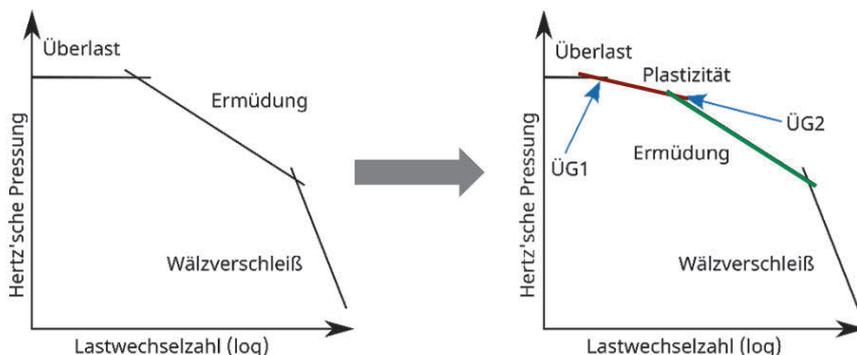


Abbildung 2: li.: Ausfallmechanismen von Standard-Freiläufen nach Stand der Technik; re.: Verlauf der Ausfallmechanismen im Hochlastbereich

Auf Basis der Vorarbeiten sind weiterführende umfangreiche experimentelle Untersuchungen und Simulationen geplant, welche sich durch folgende Teilziele definieren lassen:

- Ermittlung der Übergangsgrenzen zwischen den Ausfallmechanismen Gewaltbruch und Plastizität (ÜG1) sowie zwischen Plastizität und Ermüdung (ÜG2) bei Klemmrollenfreiläufen gemäß Abbildung 2 rechts.
- Identifizierung der Einflüsse auf die Lebensdauer (Lage der farbigen Linien in Abbildung 2 rechts) von Einhärtetiefe und E-Modul (Hartmetall), differenziert nach den jeweiligen Ausfallmechanismen
- Erweiterung des Ermüdungs-Lebensdauermodells zu einem Ermüdungs-Plastizitäts-Lebensdauermodell unter Berücksichtigung der beiden oberflächennahen Einflussparameter

Die Versuche im Vorgängervorhaben zeigten große Streuungen, sodass statistische Absicherungen durch weitere Versuche und bei anderen Einhärtetiefen notwendig sind. Zusätzlich wurde im Vorgängervorhaben die Rauheit variiert und untersucht, welches im geplanten Vorhaben zurückgestellt wird, sodass zunächst eindeutige Erkenntnisse hinsichtlich Einhärtetiefe und E-Modul (Hartmetalleinlagen) abgeleitet werden können. Primär soll der Ausfallmechanismus der Plastizität genau quantifiziert und eingegrenzt werden, damit eine adäquate Berücksichtigung in einem Lebensdauermodell gelingt.

Versuch und Simulation

Basis des Vorhabens ist die Vielzahl der geplanten experimentellen Untersuchungen, wobei jeweils Versuchsreihen an Freiläufen mit Hartmetalleinlagen und an Freiläufen mit unterschiedlichen Einhärtetiefen durchgeführt werden. Untersucht wird der Einfluss der oberflächennahen Parameter durch Vergleich mit

Standardfreiläufen sowie die lastabhängige Ausfallursache. Konkret sollen Versuche zum Einsatz von Hartmetalleinlagen und mit drei unterschiedlichen Einhärtetiefen (0 mm/ 0,6 mm/ 1,2 mm) in Anlehnung und Ergänzung zu den Versuchen des Vorgängervorhabens in /5/ durchgeführt werden. Verwendet wird der in Abbildung 3 dargestellte Versuchsaufbau.

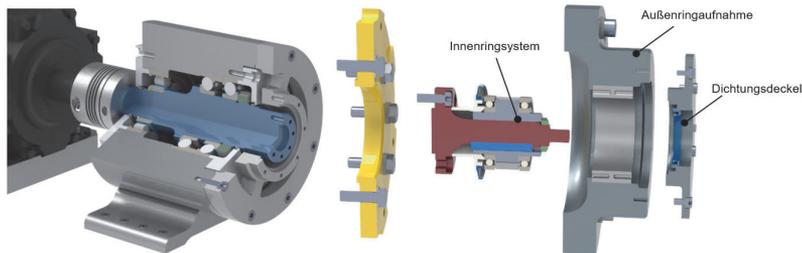


Abbildung 3: Detailansicht des Prüfaufbaus aus /5/

Nach Ermittlung der Übergangsgrenzen kann der Einflussbereich der Ausfallmechanismen durch geeignete Kombinationen aus Perlenschnur- und Horizontenverfahren in Form von Wöhlerlinien eingeordnet werden. Anhand der Untersuchungen mit den unterschiedlichen Einhärtetiefen von 0 mm bis 1,2 mm kann abgeschätzt werden, ob es eine minimal und maximal nutzbare Einhärtetiefe bezüglich der ertragbaren Lebensdauer gibt. Durch den Vergleich zu herkömmlichen Klemmrollenfreiläufen kann der Einfluss durch die genannten oberflächennahen Parameter definiert werden und in ein entsprechendes Berechnungsmodell einfließen.

Den zweiten großen Baustein des Projektes bilden die versuchsbegleitend durchgeführten Simulationen. Hieran können die Werkstoffbeanspruchungen in den Freilaufkontakten betrachtet werden. Durch die Betrachtung umfangreicher Parametervariationen in Abgleich zu den experimentellen Erkenntnissen wird ein allgemeingültiges Lebensdauermodell abgeleitet. Umgesetzt wird dieses Vorgehen durch Weiterentwicklung der beiden im Vorgängervorhaben verwendeten Simulationsmodelle, wo sowohl ein Mikrokontaktmodell als auch ein FE-Modell aufgebaut wurden. Das Mikrokontaktmodell dient der Bestimmung der Materialbeanspruchung im Mikrokontakt unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Hartmetalls und der real vorliegenden Oberflächenrauheit. Mit dem FE-Modell, skizziert in Abbildung 4, kann der Beanspruchungszustand im Allgemeinen unter Berücksichtigung mehrerer Abrollvorgänge nachgebildet werden, indem die Verformungen der Kontaktbereiche betrachtet werden. Durch die Erweiterung und Ausarbeitung der bestehenden Modelle zu vollwertigen elastisch-plastischen Simulationsmodellen können die Einflüsse auf die Ausfallmechanismen Ermüdung und Plastizität simulativ über mehrere Abrollvorgänge abgebildet werden. Eine Verknüpfung der Ergebnisse von Mikro-Kontaktmodell und Makro-FE-Modell ermöglicht zudem eine hochpräzise Ergebnisbetrachtung. Hierfür werden die im Mikrokontakt ermittelten, von den oberflächennahen Materialparametern

abhängigen Belastungen im FE-Modell implementiert, sodass der Abrollvorgang detailgetreu abgebildet werden kann. Die Simulationsmodelle stärken das Verständnis der Vorgänge beim Schaltvorgang im Hochlastbereich unter Einfluss der oberflächennahen Parameter.

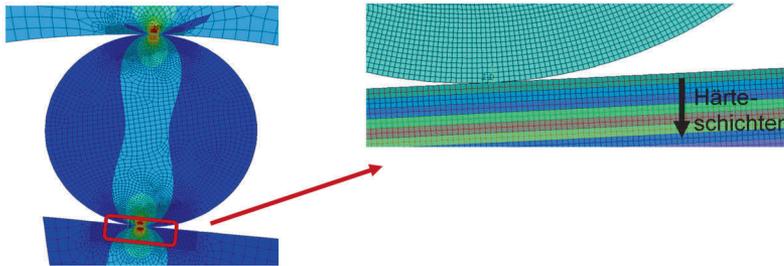


Abbildung 4: Ausschnitt des FE-Modells mit unterschiedlich definierten Härteschichten aus /5/

Anhand der Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen und den Simulationen wird ein erweitertes, auf bekanntem Vorgehen basierendes, Lebensdauermodell abgeleitet. In Abhängigkeit der in diesem Vorhaben ermittelten Versagensmechanismen werden Parameteranpassungen und -erweiterungen vorgenommen, sodass ein spezifisch anwendbares, bimodulares Ermüdungs-Plastizitäts-Lebensdauermodell für Klemmrollenfreiläufe in Form eines eigenständigen Methodenträgers zur Verfügung steht.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses geförderten FVA-Vorhabens zum Einfluss der oberflächennahen Parameter an Klemmrollenfreiläufen ist die Erstellung eines erweiterten Lebensdauermodells, welches die Ausfallmechanismen, speziell im Hochlastbereich, berücksichtigt. Nach bisherigem Stand können Lebensdauern für Standard-Freiläufe bei Versagen durch reine Ermüdung treffsicher abgeschätzt werden. Ein Ausfall durch plastische Verformung konnte erstmals im Vorgängervorhaben erkannt werden. Diese Ausfallursache gilt es im weiteren Vorhaben systematisch zu analysieren und in ein Lebensdauermodell zu überführen. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen und aufwendige Simulationen werden hierfür angestrebt.

Nach erfolgreicher Umsetzung des Vorhabens bezüglich der Ausfallmechanismen Ermüdung und Plastizität bei Klemmrollenfreiläufen im Hochlastbereich, besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich des noch verbleibenden oberflächennahen Parameters Rauheit. Erste Erkenntnisse weisen darauf hin, dass eine erhöhte Rauheit sich positiv auf die Freilauflebensdauer auswirken könnte. Ein Folgevorhaben hierzu wird ebenfalls angestrebt.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der beteiligten Forschungsstelle (MSE der RWTH Aachen) für die bisherige und zukünftige Zusammenarbeit sowie bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie beim Projektträger DLR für die finanzielle Unterstützung des Projekts „HaerteprofilFreilauf“ (FVA 776 II).

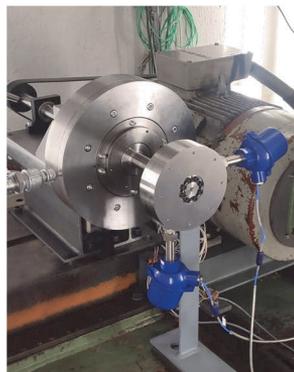
Literatur

- /1/ Jorden, W.: Gebrauchsdauer von Klemmfreilaufkupplungen. Konstruktion 24 (1972), S. 485–491
- /2/ Jorden, W., Dittrich, O. u. Schumann, R. (Hrsg.): Freilaufkupplungen, Anwendungen der Antriebstechnik. Band II; Krauskopf-Verlag 1974
- /3/ Ringspann GmbH: Freiläufe- Rücklaufsperrn, Überholfreiläufe, Vorschubfreiläufe. Katalog, Bad Homburg 2022
- /4/ Schlattmann, J. u. Jorden W.: Lebensdauerberechnung von Klemmrollenfreiläufen auf Grund von Werkstoff-verformung, -ermüdung und Wälzverschleiß. Abschlussbericht 66 I, FVA-Heft 218. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 1985
- /5/ Sous, C.; Lohrengel, A.; Guzman, G.; Martinewski, V.; Dreiseidler, S.: Abschlussbericht zum FVA-Projekt 776 I Freilauf Härteprofil; RWTH Aachen, Technische Universität Clausthal; 2022
- /6/ Duchâteau, F.; Lohrengel, A.; Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal Nr. 47; 2022
- /7/ Welter, R., Peeken, H.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Abschlussbericht 137 I, FVA Heft 319. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 1990
- /8/ Deppenkemper, P., Peeken, H., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Abschlussbericht 137 II, FVA-Heft 383. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 1993
- /9/ Deppenkemper, P., Lohrengel, A., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Abschlussbericht 137 III, FVA-Heft 551. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 1999
- /10/ Lohrengel, A., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im dynamischen Schaltbetrieb. Abschlussbericht 137 IV, FVA-Heft 552. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 1999
- /11/ Lohrengel, A., Gold, P.W.: Freilauflebensdauer-Klemmrollen. Abschlussbericht 287, FVA-Heft 614. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 2000
- /12/ Lohrengel, A.: Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Klemmrollenfreiläufen. Dissertation. 2001

Rotordynamikuntersuchung eines abschaltbaren Dämpfungselements

Hanse, M.; Lohrengel, A.

Im Rahmen des Verbundprojektes „TurboGetEff“ mit der PILLER Blowers & Compressors GmbH wurden Rotordynamikversuche an einem neu entwickelten Dämpfungselement durchgeführt. Das neue Element ermöglicht ein sicheres Durchfahren der Eigenfrequenz eines Versuchsrotors, welcher dieselbe Eigenfrequenz aufweist, wie die vom Industriepartner konstruierten Ausgangswellen eines Turboverdichters. So ist eine realitätsnahe Prüfung der Baugruppe möglich. Das Besondere des Dämpfungselements ist die Möglichkeit, es oberhalb der Eigenfrequenz abzuschalten und so die Effizienz im stationären Betrieb von Turboverdichtern signifikant zu steigern.



As part of the project “TurboGetEff” with PILLER Blowers & Compressors GmbH, rotor dynamic tests were performed on a newly developed damping element. The new element enables a reliable machine runup through the resonance frequency of a test rotor, which has the same resonance frequency as the output shafts of a turbocompressor designed by the industrial partner. This allows the assembly to be tested under realistic conditions. The special benefit of the damping element is that it can be switched off above the resonance frequency in order to significantly increase efficiency in the stationary operation of turbocompressors.

Motivation

Ziel des Forschungsvorhabens „TurboGetEff“ ist es, die Effizienz von Turboverdichtern zu erhöhen, ohne die rotordynamische Sicherheit zu reduzieren, oder die Lautstärke zu erhöhen. Dazu wird ein Konzept verfolgt, welches die Verwendung von Druckkammern und eine Optimierung der Verzahnung, der Wälzlagerungen und der Laufradlagerung vorsieht.

In Abbildung 1 ist links der Antriebsstrang eines serienmäßig eingesetzten Turboverdichters zu sehen, dessen Laufrad mit quetschöldämpften Wälzlagern gelagert ist. Die Verlustleistung des Systems kann deutlich reduziert werden, wenn diese beiden schnell laufenden Wälzlager eingespart werden können, die nur für die Quetschöldämpfung benötigt werden. In der rechten Hälfte ist aus diesem Grund der Quetschöldämpfer durch ein abschaltbares Dämpfungselement ersetzt. Durch dieses Element kann sowohl eine sichere Resonanzdurchfahrt gewährleistet werden, als auch im Betrieb (oberhalb der Eigenfrequenz; Dämpfungselement ist abgeschaltet) die Verlustleistung des Antriebsstrangs reduziert werden.

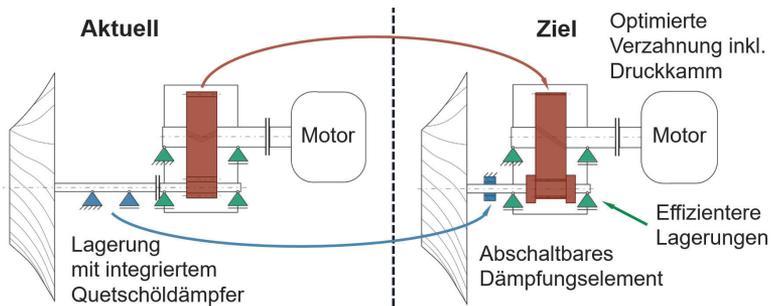


Abbildung 1: Projektziel von „TurboGetEff“ /1/

Zur Überprüfung der rotordynamischen Sicherheit des Dämpfungselements wurden Rotordynamiksimulationen durchgeführt. Anschließend wurde ein Miniaturrotor (geringere Rotormasse bei gleicher Eigenfrequenz und gleichen Umfangsgeschwindigkeiten am Dämpfungselement gegenüber der Originalgeometrie) experimentell untersucht.

Rotordynamiksimulation

Die Rotordynamiksimulation wurde von der Firma Piller Blowers & Compressors GmbH mit der Simulationssoftware ANSYS durchgeführt. In Abbildung 2 ist der Miniaturrotor bestehend aus 2 Stehlagern, der Riemenscheibe, dem abschaltbaren Dämpfungselement und der Rotormasse dargestellt. Der gekennzeichnete Auswertepunkt stimmt mit der Messung im Experiment überein.

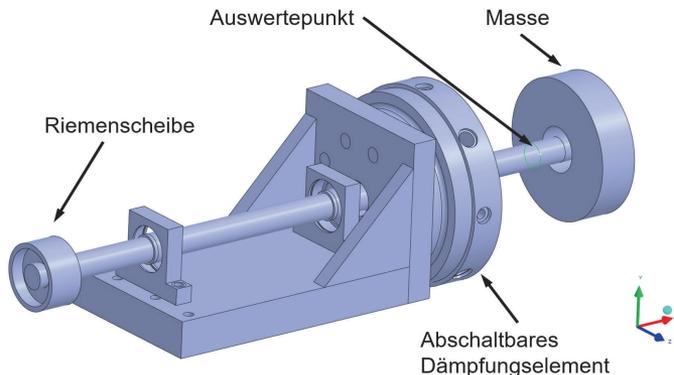


Abbildung 2: Geometrie Miniaturrotor und ausgewertete Stelle vor Masse

Zunächst wurde eine Modalanalyse zur Abstimmung der Eigenfrequenz des Miniaturrotors analog zur späteren Verdichtergeometrie durchgeführt und die Wellenlänge und der Durchmesser entsprechend angepasst. Anschließend wurde

eine harmonische Analyse durchgeführt, um diese den experimentellen Ergebnissen gegenüber zu stellen. Hierbei wurde der gewuchtete Miniaturrotor mit und ohne zusätzliche Unwuchtmasse sowie mit und ohne Dämpfungselement untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Durch das Dämpfungselement soll eine Reduktion der Schwingamplitude um den Faktor 3,5 erreicht werden. Zudem wird die Eigenfrequenz des Systems zu höheren Drehzahlen verschoben. Die Drehzahl wird auf die gemessene Eigenfrequenz des Rotors ohne Dämpfungselement und zusätzliche Unwucht bezogen. Die Schwingamplitude wird auf die im Experiment maximal zulässige Schwingamplitude des Rotors am Auswertepunkt bezogen.

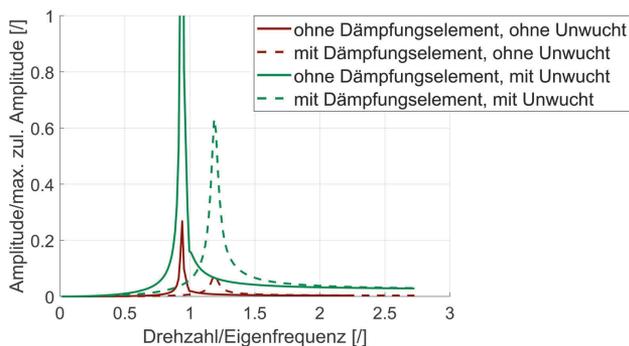


Abbildung 3: Simulationsergebnisse, Schwingamplitude in vertikaler Richtung

Rotordynamikversuche

Aufgrund der neuartigen Funktionsweise des abschaltbaren Dämpfungselements wurden die Versuche auf dem Rotordynamikprüfstand am Institut für Maschineningenieurwesen durchgeführt, wobei der Prüfstand in einem speziell gesicherten Raum aufgebaut ist. Der vorhandene Antriebsmotor hat eine Antriebsleistung von 22 kW bei einer maximalen Drehzahl von 2940 1/min. Beim Einsatz einer Übersetzung von 4,125 von der Riemenscheibe am Motor auf den Rotor können Drehzahlen bis 12000 1/min am Rotor erreicht werden. Andere maximale Drehzahlen sind durch Austausch der Riemenscheiben möglich. Zudem kann der Anlauf sowie Auslauf des Rotors gesteuert werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Links ist der komplette Aufbau zu sehen, rechts eine Draufsicht auf die beiden Stehlager der Rotorwelle.

Zur Untersuchung der Wirksamkeit des abschaltbaren Dämpfungselements wurden die Schwingungsamplituden am Auswertepunkt berührungslos gemessen. Zur Überwachung der Sicherheit des Dämpfungselements wurden an 4 Stellen im Dämpfer sowie an den Stehlagern Temperatursensoren eingebracht. Zudem wurde an den Stehlagern des Rotors die Beschleunigung in horizontaler und vertikaler Richtung am vorderen Lager sowie die Temperaturen beider Lager gemessen. Außerdem wurde die Temperatur in der Ölversorgung erfasst.

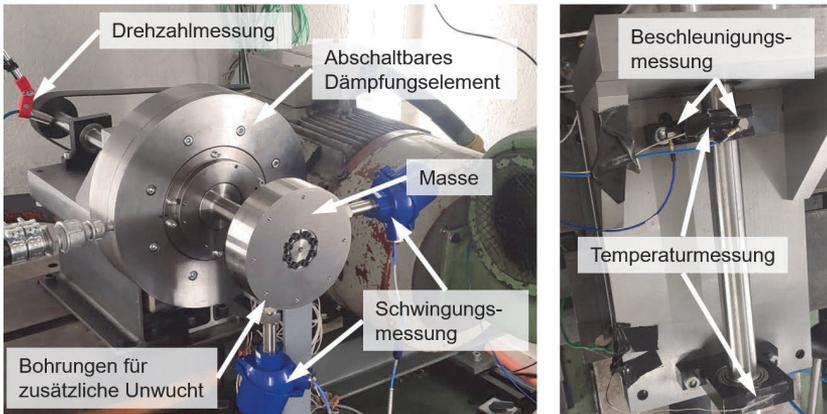


Abbildung 4: Aufbau Rotordynamikversuch am Miniaturrotor

Zu Beginn wurde überprüft, ob das Dämpfungselement unterhalb der kritischen Drehzahl sicher zu- und abgeschaltet werden kann. Anschließend wurde das System in einen thermisch stationären Zustand unterhalb der Eigenfrequenz gebracht, um die sich einstellende maximale Temperatur im Dämpfer zu erfassen. Nach diesen Voruntersuchungen wurden die Experimente zur Durchfahrt der Eigenfrequenz unternommen. Hierbei wurde zunächst durch die Eigenfrequenz zügig hochgefahren und dann langsam kontinuierlich heruntergefahren. Letzteres wurde aufgezeichnet, die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Es wurden folgende Untersuchungen (analog zur Simulation) durchgeführt:

- **ohne** zusätzliche Unwucht Masse und **ohne** Dämpfungselement
- **ohne** zusätzliche Unwucht Masse und **mit** Dämpfungselement
- **mit** zusätzliche Unwucht Masse und **ohne** Dämpfungselement
- **mit** zusätzliche Unwucht Masse und **mit** Dämpfungselement

Zudem wurde mehrfaches Schalten oberhalb der Eigenfrequenz untersucht. Hierbei wurden die Temperaturverläufe und die Schwingamplituden ausgewertet, die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

Ergebnisse

Beim Durchfahren der Eigenfrequenz (Abbildung 5) sind Unterschiede in der Eigenfrequenz sowie der Amplitude vorhanden. Gründe könnten hier eine Unsicherheit in der Steifigkeit des gesamten Aufbaus, teilweise schwer zu quantifizierenden Einflüssen der einzelnen Bauteile des abschaltbaren Dämpfungselements auf die Gesamtdämpfung der Baugruppe¹ oder eine unbekannte

¹ Die dämpfenden Eigenschaften einzelner Bauteile der Baugruppe wurden vorab durch Fußpunktanregung der Bauteile und Messung der Dämpfung untersucht.

Restunwucht des Rotors sein. Deutlich wird, dass durch das abschaltbare Dämpfungselement eine signifikante Reduktion (Faktor 4,7) der maximal auftretenden Schwingamplitude erzielt werden kann. Mit zusätzlicher Unwucht kann die Eigenfrequenz ohne Dämpfungselement nicht sicher durchfahren werden (deshalb Abbruch des Versuchs beim Hochfahren, als die maximale Schwingamplitude erreicht wurde). Mit Dämpfungselement kann die Eigenfrequenz sicher durchfahren werden. Das Dämpfungselement erzielt die erhoffte Wirkung und kann somit zur Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs signifikant beitragen.

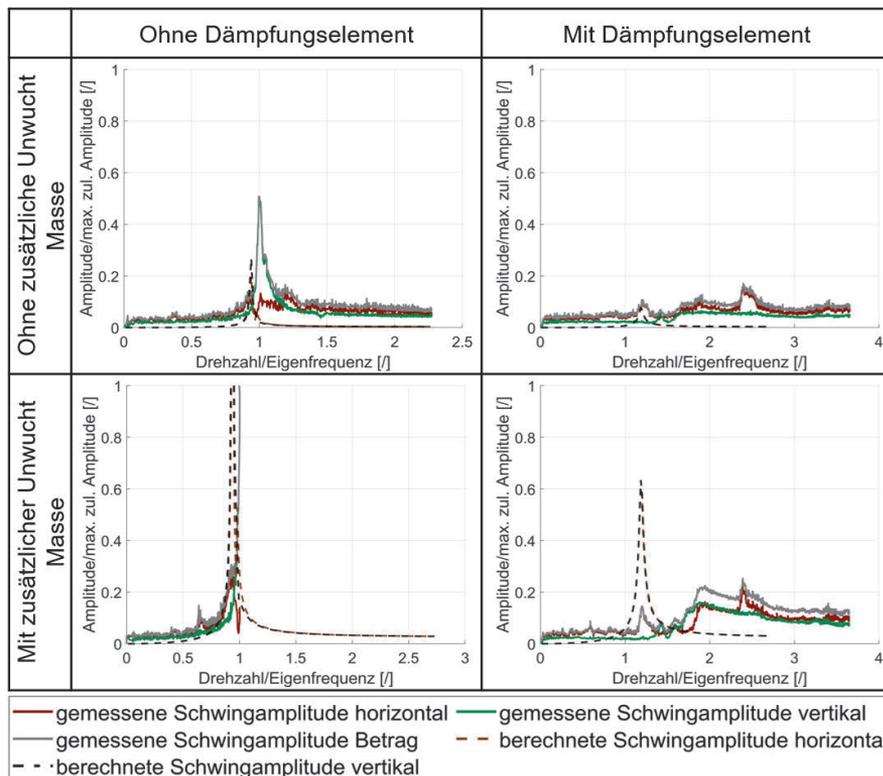


Abbildung 5: Schwingungsamplitude über Drehzahl

In Abbildung 6 sind die Temperaturverläufe sowie die Schwingamplituden über der Zeit beim Schalten des Dämpfungselements oberhalb der Eigenfrequenz dargestellt. In den Temperaturverläufen ist ersichtlich, dass an allen 4 Messstellen ein nahezu identischer Temperaturverlauf vorliegt und die Maximaltemperatur drehzahlabhängig ist. Die maximal zulässige Temperatur (90°C) wird jedoch nicht erreicht. Zudem fällt die Temperatur im Dämpfungselement zügig nach Abschaltung wieder ab. Beim Ein- und Ausschalten des Dämpfungselements wird das System

angeregt. Dies ist in der rechten Abbildung deutlich zu erkennen. Die Schwingungsamplituden übersteigen dabei nicht die zulässige maximale Schwingung. Das Schalten kann somit als zuverlässig und betriebssicher bewertet werden. Da die Schwingungsamplitude kurzzeitig beim Schalten hoch ist, wird in Zukunft der Schaltvorgang optimiert und beispielsweise ein langsames Schalten geprüft.

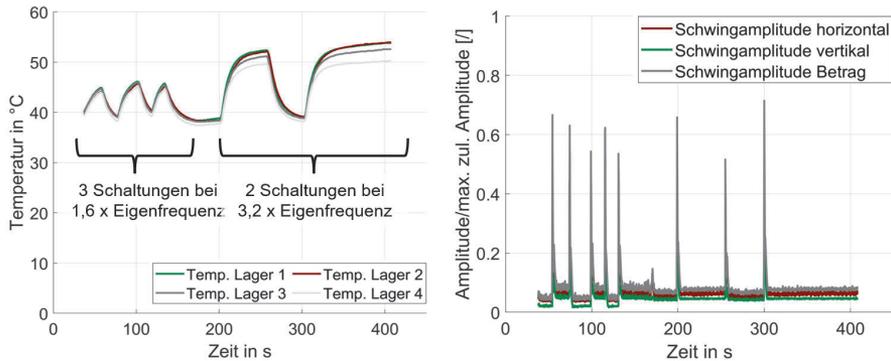


Abbildung 6: Mehrfaches Schalten des Dämpfers oberhalb der Eigenfrequenz

Zusammenfassung

Auf dem Rotordynamikprüfstand des IMWs konnten erfolgreich Rotordynamikversuche bis 8000 1/min zur Prüfung eines abschaltbaren Dämpfungselements durchgeführt werden. Das Dämpfungselement ist sowohl thermisch im stationären Zustand unterhalb der maximal zulässigen Temperatur betreibbar als auch oberhalb der Eigenfrequenz sicher schaltbar. So kann im stationären Zustand oberhalb der Eigenfrequenz gegenüber der herkömmlichen Bauweise (nicht abschaltbare, quetschölgedämpfte Laufradlagerung) signifikant Verlustleistung eingespart werden. Beim Durchfahren kann durch das Dämpfungselement die Schwingamplitude des Rotors um Faktor den 4,7 gesenkt werden, wodurch ein sicheres Durchfahren der Eigenfrequenz möglich ist.

Danksagung

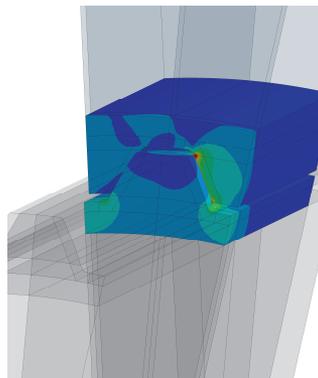
Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens TurboGetEff (FKZ:03EN4037A-B) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Die Autoren danken der PILLER Blowers & Compressors GmbH für die bisherige und zukünftige Zusammenarbeit sowie dem BMWK für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- /1/ Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Piller Blower & Compressors GmbH: Vorhabenbeschreibung „TurboGetEff“. (unveröffentlicht), 2022.

Einfluss von Flankenpassung und Lastverhältnis auf die lokale Beanspruchung von Passverzahnungen

Klügel, N; Schäfer, G.; Lohrengel, A.



Die Festigkeitsbewertung im Zahnfuß von Passverzahnungs-Verbindungen erfolgt meist auf Basis von Finite-Elemente (FE) Berechnungen. Dabei liegt der Fokus üblicherweise auf der Ermittlung der Formzahl von Verbindungen mit Spielsitz bei schwelender Torsionsbelastung. In diesem Artikel werden die lokalen Spannungskomponenten ermittelt, wie sie für eine Festigkeitsbewertung nach dem örtlichen Konzept benötigt werden. Zudem erfolgt eine Erweiterung der Betrachtung auf wechselnde Torsionsbelastungen sowie Verbindungen mit Presssitz auf den Zahnflanken.

The fatigue strength in the tooth root of splined shaft-hub connections is usually determined on the basis of finite element calculations. Most studies are focused on the determination of the stress concentration factor of connections with clearance fit under pulsating torsional load. In this article, the local stress components are determined, which are required for a fatigue life analysis according to the local approach. In addition, the study includes alternating torsional loads and connections with interference fit on the tooth flanks.

Einleitung und Stand der Technik

Passverzahnungen sind als Welle-Nabe-Verbindung in der Antriebstechnik weit verbreitet. Die Gründe hierfür sind ein hohes übertragbares Drehmoment sowie eine einfache Montage. Die Geometrie und das Passungssystem sind zudem genormt, wodurch die Austauschbarkeit der einzelnen Komponenten sichergestellt wird. Zu nennen sind hierbei im deutschsprachigen Raum die DIN 5480 /1/ und die ISO 4156 /2/, sowie die amerikanische ANSI B92.2 M /3/. Allen Verzahnungsnormen gemein ist eine Profildefinition über einen metrischen Modul m^1 .

Ein Ausfall von Passverzahnungen wird meist durch Verschleiß auf den Zahnflanken oder Ermüdung im Zahnfuß verursacht. Verschleiß ist bei Passverzahnungen dominierend, die neben dem Torsionsmoment einer hohen Biegebelastung unterworfen sind. Daraus resultieren hohe Relativbewegungen zwischen den

¹ In Ergänzung hierzu existiert noch die ältere ANSI B92.1 /4/, in welcher die Profilgeometrie über den *diametral pitch* (in inch) definiert ist.

Zahnflanken von Außen- und Innenverzahnung. Dem gegenüber ist bei überwiegend torsionsbeanspruchten Passverzahnungen die Ermüdung im Zahnfuß maßgebend. In diesem Fall kann ein Festigkeitsnachweis nach gängigen Regelwerken wie der DIN 743 /5/ oder der FKM-Richtlinie /6/ geführt werden. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen dem Nennspannungskonzept, welches nach beiden Regelwerken möglich ist und dem örtlichen Konzept, welches nach der FKM-Richtlinie möglich ist. Der lokale Spannungszustand geht im örtlichen Konzept direkt in die Berechnung ein und wird meist mithilfe einer FE-Simulation mit linear-elastischem Materialmodell bestimmt. Dagegen benötigt das Nennspannungskonzept die Definition einer Nennspannung und einer Formzahl α , welche die lokale Spannungsüberhöhung gegenüber der Nennspannung erfasst.

Für die Auslegung von Passverzahnungen bietet sich aufgrund der Vielzahl an geometrischen Einflussfaktoren der örtliche Ansatz kombiniert mit einer FE-Simulation an. Alternativ hierzu existiert mit der DIN 5466 /7/ ein analytischer Ansatz auf Basis von Formfaktoren, um die auftretende lokale Beanspruchung zu bestimmen. Die maximale Vergleichsspannung einer torsionsbelasteten Zahnwelle tritt in der Zahnfußverrundung, dem Übergang von der Zahnflanke in den Zahnfuß, auf. Aufgrund der Lastübertragung in Form der Pressung auf den Zahnflanken erfahren die einzelnen Zähne von Welle und Nabe eine Biegebelastung /8/. Hieraus resultiert eine Zugspannungskomponente in der Zahnfußausrundung auf der belasteten Seite des Zahns, weshalb diese Seite als Zugseite bezeichnet wird. Auf der unbelasteten Druckseite führt die Zahnbiegung entsprechend zu einer Druckspannungskomponente. Die auftretenden Torsionsbelastungen im Antriebsstrang sind üblicherweise schwellend, weshalb ein Wechsel von Zug- und Druckseite nur selten vorkommt. Einzelne Wechsellastkomponenten entstehen durch die Umkehr des Leistungsflusses. Ein Beispiel hierfür sind elektrische Fahrzeug-Antriebsstränge, bei denen der häufige Wechsel zwischen Antriebs- und Rekuperationsbetrieb mit einer Umkehrung des Drehmomentenflusses einhergeht.

Eine zusätzliche Beanspruchung kann durch die Flankenpassung der Verzahnung entstehen. Am häufigsten wird eine Spielpassung verwendet, die Wellenzahndicke s ist hierbei kleiner als die Lückenweite e der Nabe. Vorteil der Spielpassung ist eine einfache Montage und die Möglichkeit der Verwendung der Passverzahnung als Längenausgleich. Nachteilig ist die größere Relativbewegung und damit Gefahr von Verschleiß auf den Zahnflanken, z. B. bei wechselndem Torsionsmoment oder bei einer kombinierten Belastung aus Torsionsmoment und Biegemoment. Durch die Verwendung eines Presssitzes kann die Bewegung auf den Zahnflanken minimiert werden. Nachteilig ist, dass der Presssitz eine überlagerte Zugmittelspannung im Zahnfuß bewirkt, die es im Festigkeitsnachweis zusätzlich zu berücksichtigen gilt. Für den analytischen Ansatz der DIN 5466 existiert der Berechnungsvorschlag von Burgtorf /9/. Hiernach werden die lastabhängigen Spannungen für einen Schiebepass nach DIN 5466 mit den aus dem Presssitz resultierenden Spannungen superpositioniert.

Die bisherigen Betrachtungen zielen auf die Ermittlung der maximalen Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH). Unklar ist die

Auswirkungen eines Wechsels von Zug- und Druckflanke auf die einzelnen Komponenten der Spannungsamplitude sowie der Anwendungsfall einer abweichenden Festigkeitshypothese. Hierfür ist eine Bestimmung der einzelnen Spannungskomponenten in Form der Mittelspannung und Amplitude erforderlich, was im Folgenden an einer Beispielgeometrie erfolgen soll.

Modellaufbau und untersuchte Geometrie

Für die Untersuchung wird ein Profil der Geometrie DIN 5480x25x1x24 gewählt. Es handelt sich um eine Verzahnung mit 24 Zähnen, einem Bezugsdiameter d_B von 25 mm und einem Modul m von 1 mm. Der Kopfkreisdiameter der Welle d_{a1} beträgt 24,8 mm, der der Nabe d_{a2} 23,0 mm. Der Fußrundungsradius wird mit $r_f = 0,16 \cdot m$ entsprechend der veralteten Empfehlung für eine spanende Herstellung nach /1/ gewählt. Die Zahnfußgeometrie wird ausgehend von einer Verbindung mit minimalem Formübermaß c_f von 28 μm konstruiert, sodass sich der Zahnfußkreisdiameter in Abhängigkeit des Verrundungsradius r_f ergibt. Für den gewählten Rundungsradius von 0,16 mm ergeben sich Fußkreisdiameter von 22,76 mm für die Welle und 25,0 mm für die Nabe. Verwendet wird für die Modellierung und die Durchführung der Simulation die Software Ansys Workbench 2023R2.

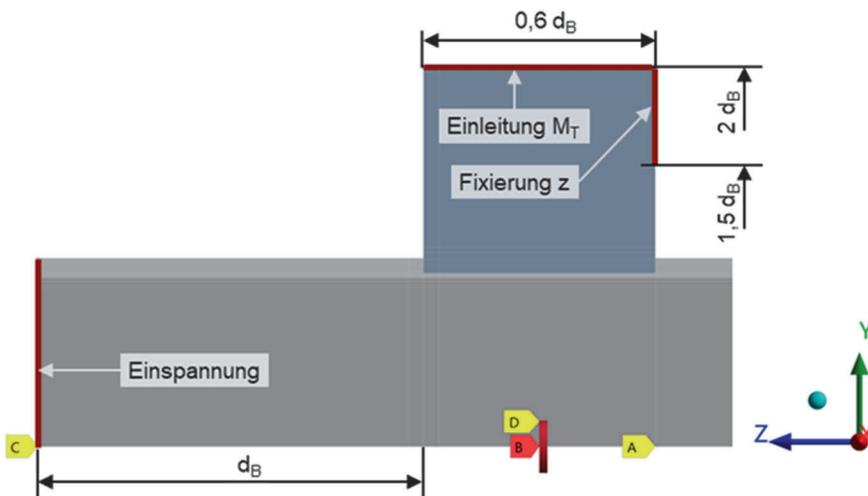


Abbildung 1: Sektormodell mit aufgebrachten Randbedingungen

Die Untersuchung beschränkt sich auf eine Idealverzahnung unter reiner Torsionsbelastung, weshalb zur Reduktion der Rechenzeit ein Sektormodell genutzt wird. Abbildung 1 zeigt das Modell mit den aufgebrachten Randbedingungen. Das Torsionsmoment wird über den Außendiameter der Nabe eingeleitet und über die Einspannung an der Stirnseite der Welle ausgeleitet. Da die Nabenbewegung in

axiale Richtung nur über die Kontaktreibung verhindert wird, ist die der Einspannung gegenüberliegende Seite ebenfalls in axiale Richtung gesperrt. Alle Randbedingungen sind über, auf der Rotationsachse liegende, *Remote-Points* aufgebracht. Um einen Einfluss der Nabenwandstärke auf die Spannungen im Zahnfuß der Nabe zu vermeiden, wird eine dickwandige Nabe mit einem Außendurchmesser $d_{e2} = 2 d_B$ genutzt. Das Durchmesserverhältnis ist damit größer als die bestimmten Grenzen von $1,5 d_B / 8/$ bzw. $1,3 d_B / 10/$. Die Nabenbreite wird mit $b = 0,6 d_B$ gewählt, da für breitere Naben weitere keine Verringerung der Kerbspannung erwartet wird /8/.

Im Verbindungsbereich wird ein strukturiertes Netz aus Hexaedern mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet, welches zu Verbindungsbeginn zusätzlich in axiale Richtung verfeinert wird. Außerhalb des Kontaktbereichs wird eine freie Vernetzung verwendet, sodass sich eine Modellgröße von ca. 1,65 Mio. Knoten ergibt. Der vernetzte Querschnitt in der Verzahnung ist in Abbildung 2 zu sehen.

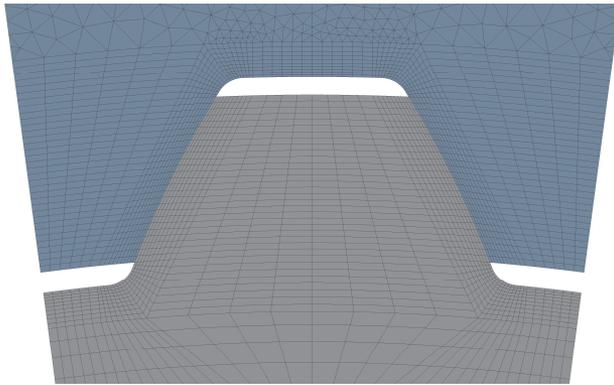


Abbildung 2: Vernetzung im Querschnitt

Der Kontakt auf der Flanke zwischen Welle und Nabe ist reibungsbehaftet mit einem Reibwert $\mu = 0,15$ modelliert. Als Kontaktalgorithmus wird das *Augmented-Lagrange-Verfahren* genutzt, für die Detektionsmethode wird der kombinierte Ansatz aus Detektion an den Gaußpunkten, den Knoten und der Projektionsmethode verwendet /11/. Die geometrische Modellierung des Profils erfolgt mit der Nennzahndicke ohne Betrachtung der Flankenpassung nach DIN 5480. Die Passung auf den Zahnflanken wird über die Kontaktoptionen aufgebracht. Hierbei ist zu beachten, dass das Übermaß u normal auf der Zahnflanke definiert ist und damit nicht den Abmaßdefinition nach /1/ entspricht, welche auf der Differenz aus Zahndicke s und Zahnlückenweite e auf dem Teilkreis basiert. In guter Näherung kann der Zusammenhang entsprechend Formel (1) verwendet werden.

$$s - e = \cos(\alpha) \cdot 2u \quad (1)$$

Um den prinzipiellen Einfluss des Übermaßes bzw. Spiels auf das Übertragungsverhalten der Verbindung zu untersuchen, werden Übermaße u von 10, 5, 0 und - 10 μm untersucht, was bezogen auf die Zahndicken am Teilkreis einer Passung zwischen 17,3 μm Spiel bzw. Übermaß entspricht. Im Vergleich zum Toleranzsystem nach DIN 5480 handelt es sich damit um ein geringes Spiel-, bzw. Übermaß.

Da die Vergleichsspannungen auf Zug- und Druckseite unterschiedlich ausfallen können sind für den Fall der Wechsellast zwei Lastschritte erforderlich, in denen die Extremwerte des Torsionsmoments ($\pm M_T$) aufgebracht werden. Im Falle eines schwellenden Torsionsmoments ohne Wechsel der belasten Flanke ist aufgrund der lastproportionalen Beanspruchung im Zahnfuß ein Lastschritt ausreichend. Die Untersuchung des Einflusses eines Presssitzes auf den Zahnflanken bedingt einen zusätzlichen Lastschritt, in dem das Übermaß auf den Zahnflanken aufgebracht wird.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Vergleichsspannung in der Zahnfußausrundung in der Welle für die deckungsgleiche ($s = e$) Variante. Die beiden oberen Bilder zeigen die gleiche Stelle jeweils bei entgegengesetzter Belastung ($\pm 120 \text{ Nm}$). Im oberen Bild ist die Zugseite abgebildet, bei der die Lastübertragung über die abgebildete Zahnflanke erfolgt. Bei der Spannungserhöhung am Übergang von Flanke zu Fußausrundung handelt es sich um eine Singularität aufgrund des Steifigkeitssprungs durch den beginnenden Kontakt mit der eingezeichneten Nabe. Betrachtet wird daher die Vergleichsspannung in der Fußverrundung. Das mittlere Bild zeigt die Druckseite mit einer Lastübertragung auf der gegenüberliegenden Zahnflanke. Es ist deutlich ein Unterschied sowohl in der Höhe der maximalen Vergleichsspannung als auch im Ort ihres Auftretens zu beobachten. Dieser Unterschied in der Spannungsverteilung erschwert es, den für einen örtlichen Festigkeitsnachweis relevanten Knoten mit der höchsten Auslastung (bzw. der geringsten Lebensdauer) zu finden. Hierfür ist eine Trennung der einzelnen Spannungskomponenten nach Mittelspannung und Spannungsamplitude erforderlich. Dies bedingt eine Betrachtung des gesamten Spannungstensors $\underline{\underline{S}}$ zu den Zeitpunkten der beiden Umkehrpunkte der anliegenden Last (hier $M_T = +M_T$ und $-M_T$). Der Spannungstensor der Amplituden $\underline{\underline{S}}_a$ sowie der Mittelspannungen $\underline{\underline{S}}_m$ kann entsprechend Gleichung (2) und (3) ermittelt werden.

$$\underline{\underline{S}}_a = \frac{\underline{\underline{S}}(+M_t) - \underline{\underline{S}}(-M_t)}{2} \quad (2)$$

$$\underline{\underline{S}}_m = \frac{\underline{\underline{S}}(+M_t) + \underline{\underline{S}}(-M_t)}{2} \quad (3)$$

Mithilfe der gewählten Festigkeitshypothese kann anschließend die Mittelspannung und Amplitude der Vergleichsspannung bestimmt werden. Eine Absolutwertbildung

der einzelnen Spannungskomponenten des Tensors der Amplitude erfolgt in diesem Fall nicht, da die Komponenten mit ihrem Vorzeichen in die verwendete Festigkeitshypothese eingehen. Zur Ermittlung der Komponenten der Mittelspannung und Spannungsamplitude sowie zum Plotten der örtlichen Spannungsverteilungen wird ein Python-Skript zusammen mit der Schnittstelle Ansys Data Processing Framework [12/ verwendet.

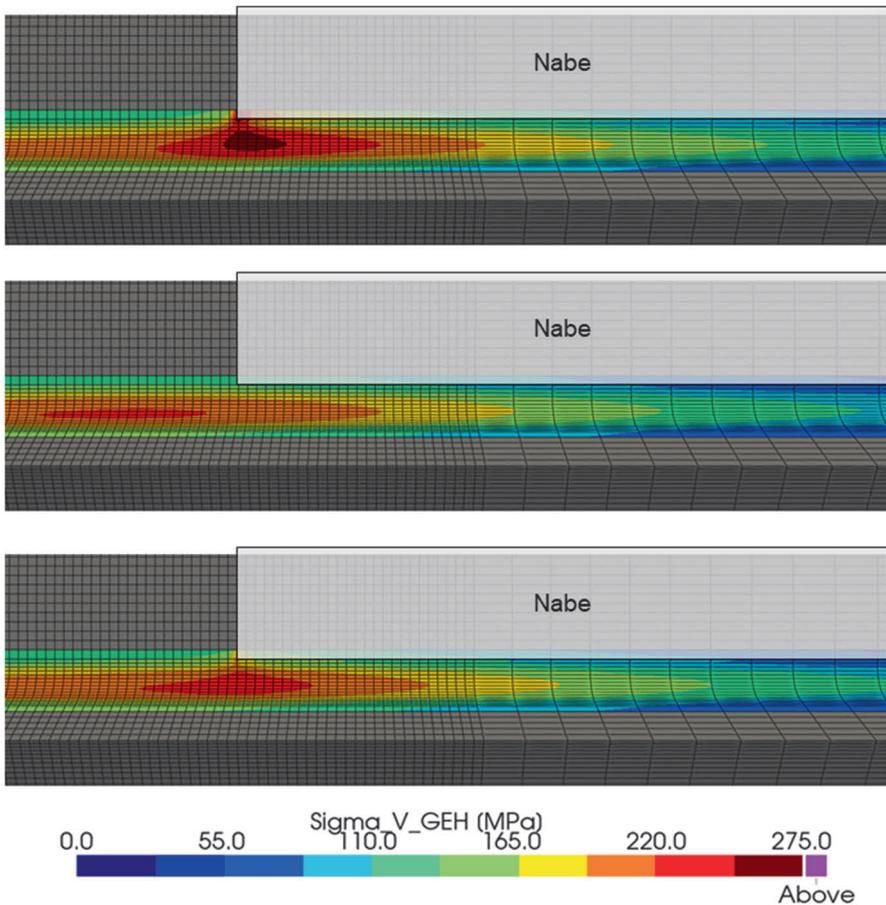


Abbildung 3: Maximale Vergleichsspannung in der Zahnfußverrundung der Welle bei einem Torsionsmoment von 120 Nm (Übermaß 0 μm). Oben: Zugseite; Mitte: Druckseite; Unten: resultierende Amplitude der Vergleichsspannung.

Die nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) resultierende Vergleichsspannungsamplitude ist im unteren Bild der Abbildung 3 zu sehen. Es zeigt sich,

dass der Ort der maximalen Vergleichsspannungsamplitude vorwiegend durch die maximale Spannung auf der Zugseite bestimmt wird. Die resultierende Spannungsamplitude ist geringer als bei alleiniger Betrachtung der Zugseite erwartet.

Liegt ein synchroner Spannungszustand vor, etwa aufgrund der überlagerten lastunabhängigen Beanspruchung durch den Presssitz, muss die konstante Mittelspannung von den Spannungsverläufen der einzelnen Komponenten subtrahiert werden /6/. Hierfür wird in einem ersten Lastschritt lediglich das Übermaß aufgegeben und der Spannungstensor $\underline{\underline{S}}(Pressitz)$ in Gleichung (2) und (3) von den Tensoren $\underline{\underline{S}}(+M_T)$ und $\underline{\underline{S}}(-M_T)$ subtrahiert. Auf diese Weise kann das Vorzeichen der einzelnen Komponenten der Spannungsamplitude korrekt ermittelt werden und für den Festigkeitsnachweis eine Trennung zwischen konstanten und lastabhängigen Mittelspannungen erfolgen.

Abbildung 4 zeigt am Ort der maximalen Vergleichsspannungsamplitude die ermittelte Amplitude und Mittelspannung der Vergleichsspannung nach GEH in Abhängigkeit des auf den Zahnflanken aufgebrachten Übermaßes u . Im linken Bild sind die Beanspruchungen im Zahnfuß von Welle und Nabe für eine wechselnde Belastung mit einem Lastverhältnis von $R = -1$, im rechten Bild für eine schwellende Belastung mit einem Lastverhältnis von $R = 0$ dargestellt. Die Amplitude des Torsionsmoments ist mit jeweils 120 Nm konstant gehalten. Bei der dargestellten Mittelspannung handelt es sich um die aus der Belastung und dem Presssitz Resultierenden. Entsprechend zeigt sich für ein Übermaß ($u > 0$) ein starker Anstieg der Mittelspannung.

Es zeigt sich insbesondere an der Nabe bei Wechsellast, der Einfluss des unterschiedlichen Übertragungsverhaltens auf der Zug- und Druckseite. Es resultiert trotz Spielsitz durch die Verschiebung eine Mittelspannung im Zahnfuß. Der Presssitz sorgt für eine Vergleichmäßigung des Übertragungsverhaltens. Die Mittelspannung resultiert bei wechselnder Last fast vollständig aus der lastunabhängigen Beanspruchung des Presssitzes. Zudem zeigt sich durch den Presssitz eine geringfügige Erhöhung der Vergleichsspannungsamplitude bei Wechsellast sowie eine Verringerung bei schwellender Last. Hierbei sei angemerkt, dass bei schwellendem Torsionsmoment lediglich die Zugseite ausgewertet wurde, sich aber auf der Druckseite eine Spannungsamplitude in ähnlicher Höhe ausbildet. In einem Festigkeitsnachweis muss diese Stelle ebenfalls überprüft werden.

Zudem zeigt sich zwischen der spielbehafteten und der spielfreien Variante ein Unterschied in den lokalen Spannungen. Als mögliche Ursache kommt eine andere Pressungsverteilung in der Flanke in Frage. Im Gegensatz zur spielbehafteten Variante löst sich der Kontakt auf der Rückflanke bei der Variante mit Nullspiel nicht vollständig. Generell zeigt sich jedoch das erwartete Verhalten, dass der wesentliche Einfluss des Presssitzes die überlagerte Mittelspannung ist. Diese fällt trotz des geringen Übermaßes insbesondere an der Nabe sehr hoch aus, weshalb im Tragfähigkeitsnachweis eine deutliche Abnahme der Dauerfestigkeit zu erwarten ist.

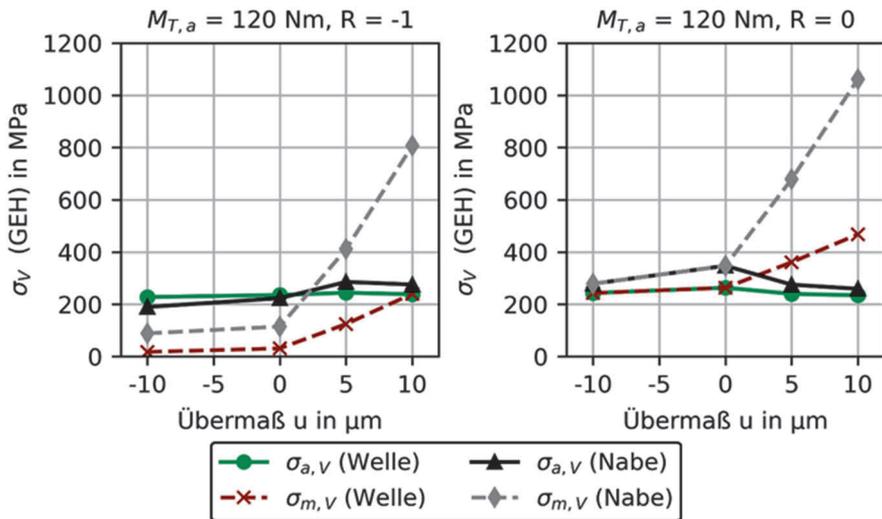


Abbildung 4: Vergleichsspannungsamplitude und Vergleichsmittelspannung im Zahnfuß von Welle und Nabe in Abhängigkeit vom Übermaß

Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe des genutzten FE-Modells sollte der Einfluss von Wechsellasten auf die lokale Beanspruchung im Zahnfuß von Passverzahnungs-Verbindungen untersucht werden. Verglichen wurde an der untersuchten Geometrie DIN 5480x25x1x24 eine schwelende und eine wechselnde Last. Zudem wurde das Übermaß auf den Zahnflanken variiert. Es zeigt sich, dass die maximale Vergleichsspannung auf der Zug- und der Druckseite an unterschiedlichen Orten auftritt, was die lokalen Spannungsamplituden und Mittelspannungen beeinflusst.

Für die Durchführung eines Tragfähigkeitsnachweises nach der FKM-Richtlinie /6/ ist zusätzlich die Berücksichtigung der auftretenden Mittelspannungen erforderlich. Insbesondere die Spannungsverteilung aufgrund eines Presssitzes weicht deutlich von der belastungsabhängigen Beanspruchung ab, vgl. Abbildung 5. Möglich ist eine Umrechnung der ermittelten Amplituden mithilfe der Mittelspannungsempfindlichkeit in eine schädigungsgleiche Wechsellastspannungsamplitude entsprechend des Äquivalentspannungsnachweises nach /6/.

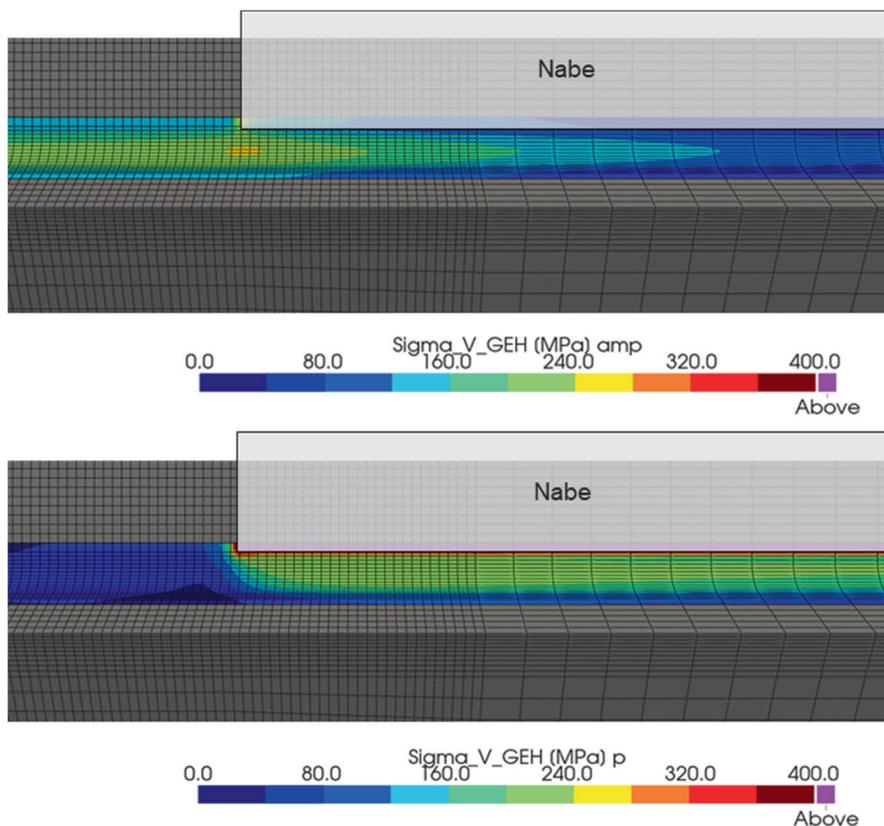


Abbildung 5: Oben: Vergleichsspannungsamplitude der Variante mit einem Übermaß von $5\ \mu\text{m}$ auf den Zahnflanken bei einem wechselnden Torsionsmoment von $120\ \text{Nm}$. Unten: Durch den Presssitz hervorgerufene Mittelspannung

Für eine Verallgemeinerung der Aussagen sind weitere Verzahnungsgeometrien zu untersuchen. Zudem ist zu prüfen, inwiefern ein vergrößerter Fußrundungsradius die Mittelspannungen des Presssitzes verringert. Ebenso ist der Einsatz eines elastisch-plastischen Materialmodells möglich. Der Einsatz von Verbindungen mit Presssitz ist durchaus gebräuchlich. Die Simulationsergebnisse mit elastischem Materialmodell deuten jedoch auf eine deutliche Reduzierung der Dauerfestigkeit hin, weshalb der Abbau der Mittelspannungen aus dem Presssitz durch plastische Verformungen betrachtet werden sollte. So hat ein auf der FKM-Richtlinie basierender und auf gesinterte Werkstoffe angepasster Nachweis die Dauerfestigkeit von Profilnaben mit Presssitz gegenüber den experimentellen Ergebnissen unterschätzt /13/, was die Notwendigkeit einer genaueren Betrachtung des Presssitzes verdeutlicht. Des Weiteren gilt es den Einfluss von kombinierten Lasten

and von Fertigungsabweichungen auf die lokalen Spannungsamplituden und Mittelspannungen zu untersuchen.

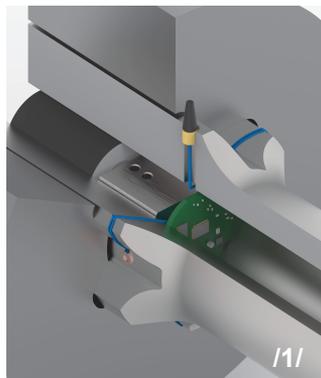
Literatur

- /1/ DIN 5480-1:2015-03, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 1: Grundlagen, 2015
- /2/ ISO 4156-1:2021-02, Straight cylindrical involute splines. Metric module, side fit. Generalities, 2021
- /3/ ANSI B92.2M: Metric Module Involute Splines, Society of Automotive Engineers, Inc.; American Society of Mechanical Engineers, Warrendale, 1989
- /4/ ANSI B92.1: Involute Splines and Inspection, Society of Automotive Engineers, Inc.; American Society of Mechanical Engineers, Warrendale, 1970
- /5/ DIN 743-2:2012-12: Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Teil 1: Grundlagen
- /6/ 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
- /7/ DIN 5466-1:2000-10, Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen – Teil 1: Grundlagen, 2000
- /8/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal, 1997
- /9/ Burgtorf, U.: Montage und Betriebseigenschaften von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Dissertation, TU-Clausthal, 1998
- /10/ Biansompa, E.; Schäfer, G.: Zahnwellenberechnung: FVA-Berechnungsrichtlinie für Zahnwellen-Verbindungen. Forschungsvorhaben Nr. 591 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt/Main 2015 (FVA-Heft 1139)
- /11/ ANSYS, Inc.: Mechanical APDL 2023 R2 documentation, 2023
- /12/ ANSYS, Inc: PyDPF-Core documentation 0.13,<https://dpf.docs.pyansys.com/version/stable/> , abgerufen 13.12.2024
- /13/ Masendorf, L.; Klügel, N.: Betriebsfestigkeit von Zahnwellenverbindungen mit gesinterten Naben. Forschungsvorhaben FVA 874 I (IGF Nr. 20321) der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main (erscheint demnächst)

Abschluss der 1. Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“

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

Zum Jahresende 2024 wird die 1. Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ des DFG Schwerpunktprogramms 2305 abgeschlossen. Der Artikel gibt einen Überblick über die erzielten Forschungsergebnisse und einen Ausblick auf die zweite Förderphase.



The first funding period of the project "Load sensitive spline shaft with sensory material" of the DFG Priority Programme 2305 will be completed at the end of 2024. The article gives an overview of the research results and an outlook on the second funding period.

Einleitung

Zum Jahresende 2024 wird das Projekt „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ abgeschlossen, das ein Teilprojekt des DFG Schwerpunktprogramms 2305 „Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung“ ist [2]. Ziel des auf eine Gesamtdauer von sechs Jahren ausgelegten Schwerpunktprogramms (SPP) ist die Sensorintegration in standardisierte Maschinenelemente. Das genannte Teilprojekt wird vom Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal in Kooperation mit dem Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Im Fokus steht dabei die Zahnwelle als sensorintegrierendes Maschinenelement (SiME).

Zahnwellen gehören zu den höchstbelasteten Bauteilen im Antriebsstrang und verursachen bei Versagen kostenintensive Stillstandszeiten. Zur Überwachung bieten sich Sensoren an, die ein Versagen frühzeitig vorhersagen können. Marktübliche Sensoren, wie Dehnungsmessstreifen, müssen kontinuierlich ausgelesen werden, um Veränderungen im Betriebszustand erkennen zu können. Dazu muss die Stromversorgung der Sensoren inklusive Datenübertragung sichergestellt werden, was häufig über externe Strom- und Datenkabel geschieht. Bei rotierenden Antriebselementen werden dazu Schleifringe eingesetzt, die funktionsbedingt verschleißanfällig sind. Im Forschungsprojekt wird daher eine sensorintegrierende Zahnwelle entwickelt, die die genannten Probleme löst. Dabei kommen Werkstoffsensoren zum Einsatz, die bei Überschreitung von Grenzlasten eine Gefügeumwandlung durchlaufen. Diese Gefügeumwandlung von paramagnetischem Austenit zu ferromagnetischem Martensit wird mittels

Wirbelstromprüftechnik erfasst und erlaubt Rückschlüsse auf den Ermüdungszustand der Zahnwelle. Durch die auftretende Gefügeumwandlung ist kein kontinuierliches Auslesen der Sensoren erforderlich. Die Messwerte werden durch eine in die Zahnwelle integrierte Auswerteelektronik erfasst und verarbeitet. Zur Vermeidung der Verwendung von Schleifringen erfolgt die Datenübertragung drahtlos mittels der Funktechnologie LoRaWAN. Die notwendige Energie wird dabei durch Energy Harvesting zur Verfügung gestellt.

Ziele und Ergebnisse der 1. Förderphase

Die 1. Förderphase des Teilprojekts hatte zum Ziel, einen Werkstoffsensoren in eine Zahnwelle zu integrieren, der bei Belastung oberhalb einer mechanischen Grenzlast durch Gefügeumwandlungen Informationen zur Belastungshistorie speichert. Die Gefügeänderung von paramagnetischem Austenit zu ferromagnetischem Martensit ist als Sensorprinzip nutzbar und kann durch eine Wirbelstromprüfung detektiert werden. Im Projekt wurden dazu Werkstoffsensoren verschiedener Geometrie simultan und experimentell untersucht. /3/

Ein Teilziel war unter anderem die Bauraumneutralität, um konventionelle durch sensorintegrierende Maschinenelemente ersetzen zu können. Dazu wurden in /4/ mögliche Positionen im Maschinenelement für die Auswerteeinheit vorgestellt. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde die Positionierung in der Hohlwelle favorisiert.



Abbildung 1: Zahnwelle mit eingebrachten Werkstoffsensoren für die Durchführung der Prüfstandsversuche /1/

Die Positionierung des Werkstoffsensors in der Zahnwelle hat einen Einfluss auf die im Werkstoffsensoren auftretenden Spannungen. Eine Positionierung im Spannungsmaximum ist zwar für die Sensorfunktion vorteilhaft, jedoch stellt der Werkstoffsensoren einen lokalen Festigkeitsunterschied im Gegensatz zum umgebenden Material dar, der im dynamischen Lastfall potenziell zu einer Schwächung des Bauteils führt /4/. In /5/ wurde deshalb ein Modell vorgestellt, wie zwischen der maximalen Spannung der Zahnwelle und der Spannung im Werkstoffsensoren umgerechnet werden kann. Um die Sensorfunktion in der Zahnwelle validieren zu können, wurden Prüfstandsversuche an Zahnwellen mit integriertem Werkstoffsensoren durchgeführt. Die verwendete Probe mit mehreren axial verteilten Sensoren ist in Abbildung 1 zu

sehen. Erste Ergebnisse der Versuche mit statischer Belastung sind in /1/ dargestellt. Weiterhin wurden dynamische Wechsellastversuche an unterschiedlichen Zahnwellengeometrien bei unterschiedlicher Belastung durchgeführt. In den durchgeführten Wechsellastversuchen reagiert der Werkstoffsensor innerhalb weniger Zyklen sensitiv auf mechanische Überbelastung. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass ab einer gewissen Sensorsättigung davon ausgegangen werden kann, dass ein kritischer Zustand der Zahnwelle vorliegt und eine weitere Belastung zum Versagen führen wird. Dabei ist es möglich, den Ausfall der Zahnwelle rechtzeitig vorherzusagen, ohne den Werkstoffsensor im Spannungsmaximum positionieren zu müssen.

Die Stromversorgung muss für eine Energieautarkie des SiME mittels Energy Harvesting sichergestellt werden. Energy Harvesting steht für die Nutzung von Umgebungenergie und die entsprechende Umwandlung in elektrische Energie. In /6/ wurden die im Antriebsstrang nutzbaren Energiequellen diskutiert und gezeigt, wie mittels DC-Maschinen im Generatorbetrieb die Rotationsenergie des Antriebsstrangs genutzt werden kann, um elektrische Energie für den Betrieb des Wirbelstromprüfsystems und der weiteren elektronischen Komponenten zur Verfügung zu stellen.



Abbildung 2: Platine mit Auswerteelektronik und Modul zur Datenübertragung

Zur Verwendung der Messdaten ist es notwendig, Daten aus dem SiME zu übertragen. Dazu wird eine drahtlose Datenübertragung benötigt. Im Projekt wurde die Funktechnologie LoRaWAN eingesetzt, da sich diese durch ihre große Reichweite und hohe Energieeffizienz auszeichnet. Weiterhin wurde die Wirbelstromprüfeinheit im Vergleich zu industriell erhältlichen Systemen miniaturisiert. Der finale Prototyp der Auswerteelektronik und der Datenübertragung ist eine Platine, die in die Zahnwelle integriert werden kann. Diese ist in Abbildung 2 dargestellt.

Zusammenfassung der Ergebnisse der 1. Förderperiode

Es wurde der Nachweis erbracht, dass Werkstoffsensoren zur Überlastdetektion von Zahnwellen verwendet werden können, obwohl sie nicht im Spannungsmaximum positioniert sind (vgl. /1/). Für erste Validierungstests des SiME wurde ein Demonstrator entwickelt, der in Abbildung 3 dargestellt ist. Im Demonstrator ist das Energy

Harvesting System integriert. Die Platine mit der Auswerteelektronik und dem Modul zur Datenübertragung ist ebenfalls in der Hohlwelle untergebracht.



Abbildung 3: Demonstrator der lastsensitiven, sensorintegrierenden Zahnwelle mit drahtloser Datenübertragung (LoRaWAN)

Ausblick auf die beantragte 2. Förderphase

In der beantragten zweiten Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ liegt der Fokus auf der Robustheit des Gesamtsystems. Dies schließt eine über die Lebensdauer der Zahnwelle autonome Energieversorgung und Datenübertragung ein. Die Updatefähigkeit der Software des Mikrocontrollers bzw. des Auswertalgorithmus muss sichergestellt werden, um auf zukünftige, eventuell veränderte Anforderungen reagieren zu können. Die geplante Laufzeit der 2. Förderphase beträgt ebenfalls 36 Monate.

Energieversorgung

Die Energieautarkie der sensorintegrierenden Zahnwelle soll durch eine DC-Maschine im Generatorbetrieb in Kombination mit Pufferspeichern sichergestellt werden. In der ersten Förderphase stand der konstante Betriebszustand bzw. konstante Drehzahlen im Vordergrund. Um die Energieversorgung auf realitätsnahe Bedingungen anzupassen, wird das Energy Harvesting System weiterentwickelt, um auch beim Startvorgang oder bei häufigen Lastrichtungsänderungen ausreichend Energie zur Verfügung stellen zu können. Dies kann beispielsweise durch die Nutzung des thermoelektrischen oder piezoelektrischen Effekts geschehen. Mit Hilfe der Optimierung der Auswerteeinheit soll der Energiebedarf zudem gesenkt werden, sodass die Messung auch bei wechselnden Betriebszuständen gewährleistet ist. Durch die zuverlässigere Versorgung mit elektrischer Energie können

beispielsweise auch weitere Sensoren verwendet werden, die häufiger ausgelesen werden müssen.

Datenübertragung

Zur drahtlosen Datenübertragung wird wie in der 1. Förderphase die Funktechnologie LoRaWAN eingesetzt. Forschungsschwerpunkt der 2. Förderphase ist die Frage, wie die Verbindung mittels Over-The-Air-Update genutzt werden kann, um die Software des Mikrocontrollers anpassen zu können. Die sichere Übertragung der Daten wird dabei durch eine Verschlüsselung gewährleistet.

Funktionszuverlässigkeit und Langzeitstabilität

Die Robustheit der Einzelkomponenten unter typischen Umgebungsbedingungen, wie Temperatur- und Öleinfluss, Vibrationen, aber auch die elektromagnetische Verträglichkeit und das Verhalten unter den wirkenden Fliehkräften stehen im Fokus. Dazu werden Prüfstandsversuche der Einzelkomponenten, aber auch des Gesamtsystems durchgeführt, um eine Funktion unter realitätsnahen Bedingungen über die Lebensdauer zu prüfen und schließlich zu gewährleisten. Insbesondere wird untersucht, ob eine temperaturbedingte Degradation der elektronischen Komponenten über die Lebensdauer der Zahnwelle auftritt. Außerdem wird die Funktionsweise des Werkstoffsensorsystems unter widrigen Umgebungsbedingungen getestet.

Funktionserweiterungen

Für die korrekte Interpretation der Sensorinformationen werden Sensoren zur Temperatur- und Drehzahlmessung integriert. Zur Klassifizierung von Lastkollektiven werden beispielsweise die Temperaturdaten und die Messwerte des Werkstoffsensors kombiniert. Die so erzielte Temperaturkompensation erhöht die Datenqualität. Zudem wird der Funktionsumfang energieabhängig angepasst, sodass Sensoren bei Bedarf zu- oder abgeschaltet werden können.

Methodik

Auf Grundlage der durchgeführten Simulationen und Prüfstandsversuche wird eine Methodik zur Gestaltung und Simulation von SiME entwickelt. Dieses Rahmenwerk enthält sowohl die konstruktiven Merkmale der Zahnwelle, als auch Ergebnisse der durchgeführten Simulationen aus der 1. Förderperiode. Zusätzlich werden Informationen zur Integration des SiMEs in lokale Kommunikationsnetzwerke, zur Fertigung von prototypischen sensorintegrierten Zahnwellen, sowie zur Herstellung des Werkstoffsensors integriert. Die Module zur Datenerfassung und -auswertung und zur Energieversorgung sind ebenfalls in der Methodik enthalten.

Zusammenfassung

In der 1. Förderphase wurden bereits umfangreiche Versuche zur Integration des Werkstoffsensorsystems in Zahnwellen durchgeführt. Es wurde ein Konzept zur Energieversorgung getestet. Weiterhin wurde das Wirbelstromprüfsystem miniaturisiert und eine drahtlose Datenübertragung implementiert. Die 2. Förderphase hat zum Ziel, die sensorintegrierende Zahnwelle unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen, d. h. unter Temperatur- und Öleinfluss, weiterzuentwickeln. Dazu sollen umfangreiche Prüfstandsversuche der Teilkomponenten und des Gesamtsystems durchgeführt werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Projektnummer 466760574 - Projekttitle "Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff". Das Projekt ist Teil des Schwerpunktprogramms 2305 mit der Projektnummer 441853410. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- /1/ Quanz, M.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; Barton, S.: Zahnwelle mit konditionierbarem Lastsensor und integriertem Energy Harvesting, in *10. VDI-Fachtagung Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen 2024 - Dimensionierung, Fertigung, Anwendungen und Trends*, in VDI-Berichte, Nr. 2443. , Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2024, S. 193–200.
- /2/ DFG - GEPRIS - SPP 2305: Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/441853410?language=de>
- /3/ Gansel, R.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.; Barton, S.: „Development of Material Sensors Made of Metastable Austenitic Stainless Steel for Load Monitoring“, *J. of Materi Eng and Perform*, Sep. 2024, DOI: 10.1007/s11665-024-09910-9.
- /4/ Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; Maier, H. J.: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff, in *9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2022 Dimensionierung – Fertigung – Anwendungen und Trends*, Bd. 2408, in VDI-Berichte, vol. 2408. , Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart: VDI Verlag GmbH, 2022, S. 267–271.
- /5/ Quanz, M.; Schäfer, G.; Gansel, R.; Barton, S.; Maier, H. J.; Lohrengel, A.: Auswirkung der Variation des Fußrundungsradius und des Bohrungsdurchmessers in einer sensorintegrierenden Zahn-Hohlwelle auf die Kerbspannungen im Zahnfuß, in *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2024*, Göttingen: sierke VERLAG - Sierke WWS GmbH, Mai 2024, S. 145–160.
- /6/ Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.: Energy Harvesting in rotierenden Maschinenelementen, *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal*, Bd. 48, S. 89, Okt. 2024, DOI: 10.21268/20241023-10.

Geometrische Überlegungen zu plastikummantelten Drahtseilen

Stök, M.; Lohrengel, A.

Bei der mehrlagigen Bewicklung mit außen kunststoffummantelten Drahtseilen verformt sich die Ummantlung unter den im Wickelpaket wirkenden Lasten stark und nimmt je nach Rillungsbereich der Seiltrommel eine quadratische oder sechseckige Form an. Wenn der Kunststoffmantel zu dünn ist, führt dieses Phänomen zu einer vollständigen Verdrängung des Kunststoffs aus dem Kontaktbereich zwischen zwei Seilen. Die Bestimmung der Mindestmanteldicke basiert auf den geometrischen Einschränkungen, die durch die Trommel- und Seilgeometrie vorgegeben sind.



In the case of multi-layer spooling with externally plastic-coated wire ropes, the plastic coating deforms considerably under the loads that occur in the spooling package, resulting in a square or hexagonal shape depending on the groove area of the rope drum. If the plastic coating is insufficiently thick, this phenomenon results in the complete displacement of the plastic from the contact between the two ropes. The determination of the minimum coating thickness is based on the geometric restrictions imposed by the drum and rope geometry.

Einleitung

Seile sind als unverzichtbares Maschinenelement seit Jahrhunderten ein fester Bestandteil technischer Anwendungen und Industrien. Im Gegensatz zu vielen anderen Maschinenelementen weisen sie jedoch Verschleiß auf und besitzen eine begrenzte Lebensdauer, sie sind nicht dauerfest /1/. Aufgrund der fortschreitenden Sensibilisierung für Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit ist die Maximierung der Lebensdauer von großer Bedeutung. Ein Drahtseil muss abgelegt werden, sobald eine kritische Anzahl an äußeren Drahtbrüchen auftritt. Diese sind das Resultat der hohen mechanischen Belastung der Drähte, die beim Lauf über Scheiben und in der Mehrlagenwicklung auf Seiltrommeln auftreten.

Um die Lebensdauer von Drahtseilen zu erhöhen wird eine Ummantelung der Drahtseile mit Kunststoff untersucht. Diese soll die Last in Kontaktbereichen über eine größere Fläche verteilen und somit die Beanspruchung der einzelnen Außendrähte reduzieren, was zu einer verlängerten Lebensdauer des Seils führt. Zudem bietet der Kunststoffmantel zusätzliche Vorteile wie verbesserte Treibfähigkeit und Schutz vor eindringenden Schmutzpartikeln.

Darüber hinaus führt die Mehrlagenwicklung von kunststoffummantelten Drahtseilen auf Seiltrommeln zu speziellen Herausforderungen. Bei Trommeln mit einer Systemrillung ist der Trommelmantel in den Parallel- und den Kreuzungsbereich unterteilt. In den beiden Bereichen sind die Seilwindungen jeweils unterschiedlich gestapelt. Während in der Mitte des Kreuzungsbereichs die Seile in einer Säule übereinandergestapelt sind, weisen sie im Parallelbereich eine pyramidale Stapelung auf. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Aus den unterschiedlichen Stapelanordnungen ergeben sich unterschiedliche Packungsdichten und Deformationen der Seile. Im Parallelbereich wird der ursprünglich runde Kunststoffmantel zu einem Sechseck verformt, der Kunststoff wird in den Wickelversuchen lange Zeit jedoch nicht beschädigt. Im Kreuzungsbereich, in dem der Kunststoffmantel zu einem Rechteck umgeformt wird, kriecht der Kunststoff in Wickelversuchen komplett aus dem Seil-Seil-Kontakt heraus. Dieses Verhalten ist für Faserseile /2/ bereits dokumentiert und konnte für kunststoffummantelte Drahtseile bereits in /3/ gezeigt werden.

In diesem Beitrag wird die mögliche Deformation des Kunststoffmantels aufgrund der geometrischen Randbedingungen beschrieben. Dabei wird die minimale Dicke bestimmt, die der Kunststoffmantel für jeden der beiden Trommelbereiche haben muss, damit die Stahlseile selbst bei einer Deformation des Kunststoffmantels nicht miteinander in Kontakt kommen, sondern Kunststoff im Kontakt verbleibt und seine Schutzaufgabe wahrnehmen kann.

Geometrische Randbedingungen

Der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit von Kunststoff sind geringer als der Querelastizitätsmodul von Drahtseilen. Die Verformung des Drahtseildurchmessers d_r wird deshalb bei den nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt. Des Weiteren wird bei Kunststoffen von Inkompressibilität ausgegangen.

In der Mehrlagenwicklung erfahren die unteren Wickellagen einen Druck durch die darüberliegenden. Der Kunststoff wird somit in die Hohlräume des Wickelpaketes verdrängt, bis diese komplett gefüllt sind. Dies ist in Abbildung 1 oben für den Parallelbereich und unten für den Kreuzungsbereich dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich im Parallelbereich ein sehr unregelmäßiges Sechseck bildet, welches in Gelb dargestellt ist. Im Kreuzungsbereich entsteht ein Rechteck. Die Größe der zu bestimmenden deformierten Kunststofffläche wird in eine Richtung jeweils von dem Windungsabstand e begrenzt. Der Windungsabstand e ist wiederum von dem unbekanntem Außendurchmesser der Kunststoffummantelung d_p abhängig und wird mit dem Faktor y je nach Anwendung festgelegt

$$e = y \cdot d_p. \quad (1)$$

Aufgrund der Nichtberücksichtigung der Deformation des Drahtseildurchmessers ist die Querschnittsfläche des Drahtseils konstant und wird nicht weiter berücksichtigt.

Die Querschnittsfläche des undeformierten kunststoffummantelten Seils ergibt sich aus der Kreisfläche mit dem Außendurchmesser des Kunststoffmantels d_p

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 \quad (2)$$

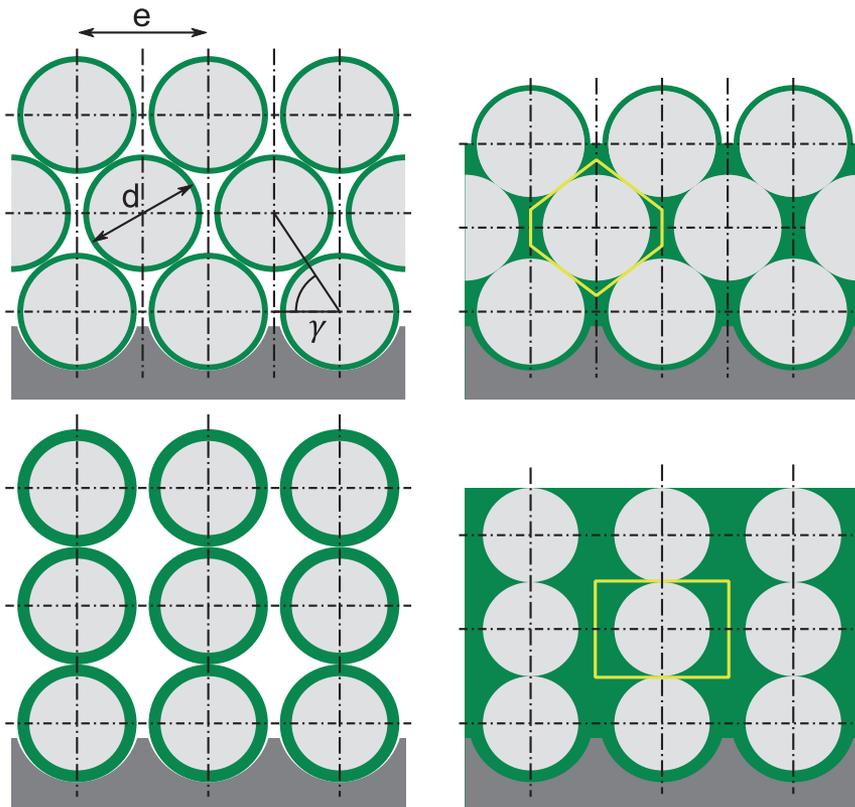


Abbildung 1: Die unterschiedlichen Seilanordnungen einer Seiltrommel mit Systemrillung. In Gelb ist jeweils die theoretische Fläche des Kunststoffmantels dargestellt.

Minimaler Kunststoffmantel in Kreuzungsbereich

Für den Kreuzungsbereich ergibt sich die deformierte Querschnittsfläche A_{kb} aus dem Windungsabstand e und dem Drahtseildurchmesser d_r

$$A_{kb} = e \cdot d_r. \quad (3)$$

Aufgrund der Inkompressibilität des Kunststoffes gilt Flächenkonstanz zwischen dem undeformierten und dem deformierten Kunststoffquerschnitt, es gilt unter Verwendung der Gleichungen (1) bis (3)

$$\begin{aligned} A_p = A_{kb} &\rightarrow \frac{\pi}{4} \cdot d_{p,kb}^2 = e \cdot d_r \rightarrow \frac{\pi}{4} \cdot d_{p,kb}^2 = y \cdot d_{p,bk} \cdot d_r \\ &\rightarrow d_{p,kb}^2 - \frac{4}{\pi} \cdot y \cdot d_r \cdot d_{p,kb} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Da 0 kein sinnvolles Ergebnis der quadratischen Gleichung ist, ergibt sich der minimale Außendurchmesser für ein kunststoffummanteltes Seil im Kreuzungsbereich $d_{p,kb}$ zu

$$d_{p,cs} = \frac{4 \cdot y}{\pi} \cdot d_r \approx 1.35 d_r. \quad (5)$$

Minimaler Kunststoffmantel im Parallelbereich

Zur Berechnung des Sechsecks im Parallelbereich kann dieses als Raute betrachtet werden, von dem zwei Dreiecke abgezogen werden. Dies ist inklusive aller verwendeten Längenbezeichnungen in Abbildung 2 dargestellt. Die Fläche einer Raute berechnet sich aus den noch unbekanntenen Längen der beiden Diagonalen wie folgt

$$A_{Raute} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot f. \quad (6)$$

Für den Winkel γ gelten folgende trigonometrische Beziehungen, vgl. Abbildung 1

$$\cos(\gamma) = \frac{\frac{e}{2}}{d_r} = \frac{d_r}{g}; \quad \sin(\gamma) = \frac{d_r}{f} = \frac{\sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}}{d_r} \quad (7)$$

$$\rightarrow g = \frac{2 \cdot d_r^2}{e}; \quad f = \frac{d_r^2}{\sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}} \quad (8)$$

Damit ergibt sich die Fläche der Raute zu

$$A_{Raute} = \frac{d_r^2}{e} \cdot \frac{d_r^2}{\sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}} = \frac{d_r^4}{e \cdot \sqrt{d_r^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2}} \quad (9)$$

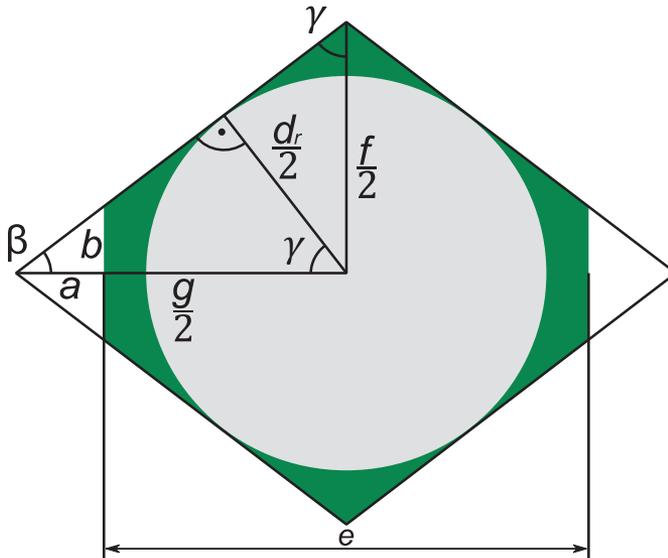


Abbildung 2: Die grüne Fläche entspricht dem Kunststoff, der graue Kreis dem Drahtseil und die beiden weißen Dreiecke sind von der Raute abzuziehen.

Von der Rautenfläche müssen jedoch noch zwei kleinere Dreiecke abgezogen werden. Hierzu wird die Höhe des Dreiecks a bestimmt. Diese ergibt sich als die halbe Differenz der Seite g und dem Rillenabstand e

$$a = \frac{g - e}{2} = \frac{d_r^2}{e} - \frac{e}{2}. \quad (10)$$

Die Kantenlänge b kann beschrieben werden in Abhängigkeit von a

$$\tan(\beta) = \frac{b}{a} \rightarrow b = \tan(\beta) \cdot a. \quad (11)$$

Da das betrachtete Dreieck rechtwinklig ist, gelten folgende Beziehungen

$$90^\circ = \gamma + \beta \rightarrow \beta = 90^\circ - \gamma \quad (12)$$

$$\sin(90^\circ - \gamma) = \cos(\gamma) \quad (13)$$

$$\cos(90^\circ - \gamma) = \sin(\gamma) \quad (14)$$

Mit den Gleichungen (7) und (11) bis (14) kann der $\tan(\beta)$ auch folgendermaßen dargestellt werden

$$\tan(\beta) = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} = \frac{\sin(90^\circ - \gamma)}{\cos(90^\circ - \gamma)} = \frac{\cos(\gamma)}{\sin(\gamma)}$$

$$\tan(\beta) = \frac{\frac{e}{2}}{d_r} = \frac{e}{2 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} \quad (15)$$

Die Fläche des kleinen abzuziehenden Dreiecks A_D berechnet sich damit zu

$$A_D = a \cdot b = a \cdot \tan(\beta) \cdot a = a^2 \cdot \tan(\beta)$$

$$= \left(\frac{d_r^2}{e} - \frac{e}{2} \right) \cdot \frac{e}{2 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} \quad (16)$$

$$= \frac{d_r^4}{2 \cdot e \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} - \frac{d_r^2 \cdot e}{2 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} + \frac{e^3}{8 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}}$$

Die Fläche des unregelmäßigen Sechsecks aus Kunststoff A_{pb} berechnet sich aus den Gleichungen (9) und (16) zu

$$A_{pb} = A_{Raute} - 2 \cdot A_D$$

$$= \frac{d_r^2 \cdot e}{\sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} - \frac{e^3}{4 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} \quad (17)$$

Für die Fläche des unregelmäßigen Sechsecks gilt, wie bereits im Kreuzungsbe-
reich, Flächenkonstanz aufgrund der Inkompressibilität des Kunststoffes. Daher
folgt aus den Gleichungen (1), (2) und (17):

$$A_{pb} = A_p \rightarrow \frac{d_r^2 \cdot e}{\sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} - \frac{e^3}{4 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{e^2}{4}}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2$$

$$\frac{d_r^2 \cdot y \cdot d_p}{\sqrt{d_r^2 - \frac{y^2 \cdot d_p^2}{4}}} - \frac{y^3 \cdot d_p^3}{4 \cdot \sqrt{d_r^2 - \frac{y^2 \cdot d_p^2}{4}}} - \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 = 0 \quad (18)$$

Die Lösung der Gleichung nach dem Außendurchmesser $d_{p,pb}$ führt zu der einzigen physikalisch sinnvollen Lösung von

$$d_{p,pb} = \frac{4 \cdot y}{\sqrt{4 \cdot y^4 + \pi^2}} \cdot d_r \approx 1.094 \cdot d_r. \quad (19)$$

Wenn das Seil mit einem dickeren Kunststoffmantel ummantelt wird, verbleibt selbst bei vollständiger Verformung des Mantels noch Kunststoff im Kontakt zwischen den beiden Seilen. Dazu wird in Gleichung (18) der Seildurchmesser durch einen Durchmesser mit Faktor ersetzt und das ganze nach dem Faktor aufgelöst. Mit dem Drahtseildurchmesser und dem Faktor kann so die Stärke des im Kontakt verbleibenden Kunststoffmantels berechnet werden:

$$\Delta r = \frac{\frac{\sqrt{4 \cdot y^4 + \pi^2} \cdot d_p}{4 \cdot y} - d_r}{2}. \quad (20)$$

Resultierende Prüfgeometrie

Die Querelastizität von Seilen wird auf dem institutseigenen Prüfstand ermittelt. Um eine realistische Quersteifigkeit für den Parallelbereich zu bestimmen soll die Deformation zum Sechseck berücksichtigt werden. Es wird vermutet, dass die Steifigkeit nach der vollständigen Umformung des Kunststoffes aufgrund der Inkompressibilität zunimmt. Im aktuellen Forschungsprojekt werden Drahtseile mit einem Durchmesser $d_r = 12 \text{ mm}$ mit Kunststoff auf einen Außendurchmesser $d_p = 14 \text{ mm}$ ummantelt. Der Windungsabstand ist $e = 14,7 \text{ mm}$.

Zuerst wird der im Kontakt verbleibende Kunststoff mit Gleichung (20) berechnet.

$$\Delta r = \frac{\frac{\sqrt{4 \cdot y^4 + \pi^2} \cdot d_p}{4 \cdot y} - d_r}{2} = \frac{\frac{\sqrt{4 \cdot \frac{14,7\text{mm}^4}{14\text{mm}} + \pi^2 \cdot 14\text{mm}}}{4 \cdot \frac{14,7\text{mm}}{14\text{mm}}} - 12\text{mm}}{2} \quad (21)$$

$$\Delta r = 0,397 \text{ mm}.$$

Der für den Keilwinkel γ relevante Durchmesser d beträgt damit

$$d = d_r + 2 \cdot \Delta r = 12\text{mm} + 2 \cdot 0,397 \text{ mm} = 12,794\text{mm} \quad (22)$$

Der Winkel 2γ beschreibt die in den Prüfbacken einzubringenden Winkel und kann aus Umstellung von Gleichung (7) berechnet werden.

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{e}{d} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{7,85 \text{ mm}}{12,794 \text{ mm}} \right) = 54,936^\circ \quad (23)$$

Für die Prüfbacken ist deshalb ein Winkel von 110° vorgesehen.

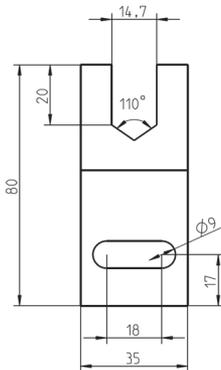


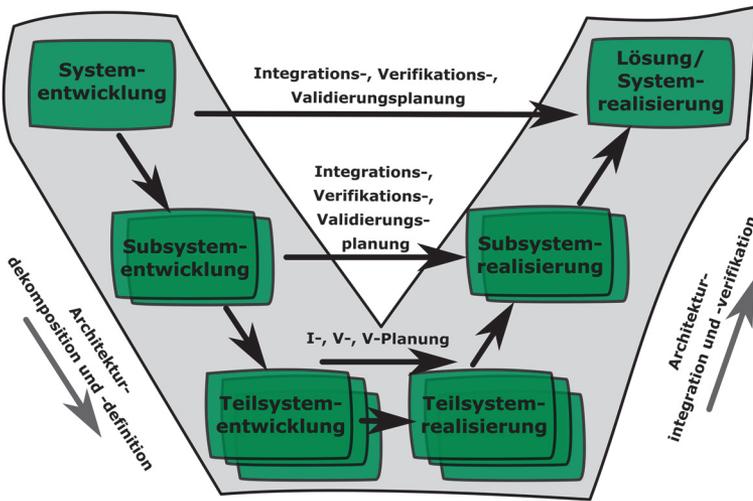
Abbildung 3: Technische Zeichnung und reale Ausführung der Querprüfbacken

Zusammenfassung

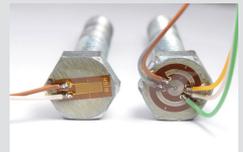
Da Seile lediglich über eine Zeitfestigkeit verfügen, wird zur Ressourcenschonung an der Verlängerung Ihrer Lebensdauer geforscht. Derzeit wird die Ummantelung von Drahtseilen mit Kunststoff für die Mehrlagenwicklung untersucht. In der Mehrlagenwicklung wird der Kunststoff jedoch aus den Kontakten der Seile im Wickelpaket herausgedrückt. Es wurde daher die minimale Dicke des Kunststoffmantels im Kreuzungs- und Parallelbereich berechnet, sowie die Stärke des verbleibenden Kunststoffs bei einer großzügigeren Ummantelung.

Literatur

- /1/ Wehking, K.; Hecht, S.; Moll, D.; Novak, G.; Verreet, R.: Laufende Seile - Bemessung und Überwachung. 5. Renningen: Expert Verlag, 2018. – ISBN 978–3–8385–5191–3
- /2/ Ernst, B.; Mupende, Y.: Hochfestes Faserseil als Hubseil in Kranen mit Mehrlagenwicklung. In: Wehking, Karl-Heinz (Hrsg.): 6. Stuttgarter Seiltrage: Material, Anwendung & Prüfung, 2018. – ISBN 978–3–00–059115–0, S. 1–12
- /3/ Stök, M.; Recknagel, T.; Wächter, M.; Lohregel, A.; Schmidt, T.: Lifetime and suitability for multi-layer spooling of running wire ropes with plastic coating. Stuttgart, Germany: Proceedings of the OIPEEC Conference, Pengzhu Wang, 2022. – ISBN 978–1–7336004–1–5



Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systems Engineering Method Matrix: Ein Tool zur anwenderspezifischen Prozess- und Methodengestaltung

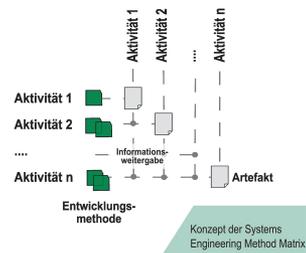
Ammersdörfer, T.; Meyer, J.; Inkermann, D.

Die Systems Engineering Methoden Matrix (SEMM) unterstützt Entwickler:innen in der Planung von Entwicklungsaktivitäten, bietet Hilfestellung bei der Informationsgenerierung und -weitergabe im Produktentwicklungsprozess und ermöglicht eine Artefakt-orientierte Auswahl kontextbezogener Entwicklungsmethoden. Durch die Aufbereitung und Bereitstellung strukturierter Methodensteckbriefe können die Entwickler:innen neues Methodenwissen erlernen, und Entwicklungsaktivitäten zielgerichtet ausführen.

The Systems Engineering Methods Matrix (SEMM) supports engineers in planning engineering design activities, provides assistance in generating and passing on information in the engineering design process, and enables an artifact-oriented selection of context-related engineering design methods. By preparing and providing structured method profiles, engineers can learn new method knowledge and carry out engineering design activities in a targeted manner.

Einführung und Problemstellung

Systems Engineering (SE) umfasst verschiedene Entwicklungsaktivitäten wie zum Beispiel das Erfassen von Anforderungen, das Entwickeln von Systemarchitekturen oder die Bewertung von Entwicklungsrisiken [1, 2]. Diese Entwicklungsaktivitäten sind in Prozessen organisiert und aus ihnen gehen verschiedene Informationen zur Beschreibung von Produkten hervor. Abbildung 1 zeigt dazu eine Übersicht, welche die Logik und die Hilfsmittel für die Informationsgenerierung und -weitergabe im Entwicklungsprozess aufzeigt. Für Entwicklungsprojekte werden in Unternehmen häufig weitgehend standardisierte Prozesse genutzt, ohne dass diese vollständig dokumentiert sind. Entwicklungsergebnisse und Informationen sind meist in verschiedenen Dokumenten verteilt und damit teilweise schwer nachvollziehbar. In Abbildung 2 werden exemplarisch unterschiedliche Dokumente wie zum Beispiel die Anforderungsliste oder die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse dargestellt, die als Informationsspeicher im Entwicklungsprozess dienen können.



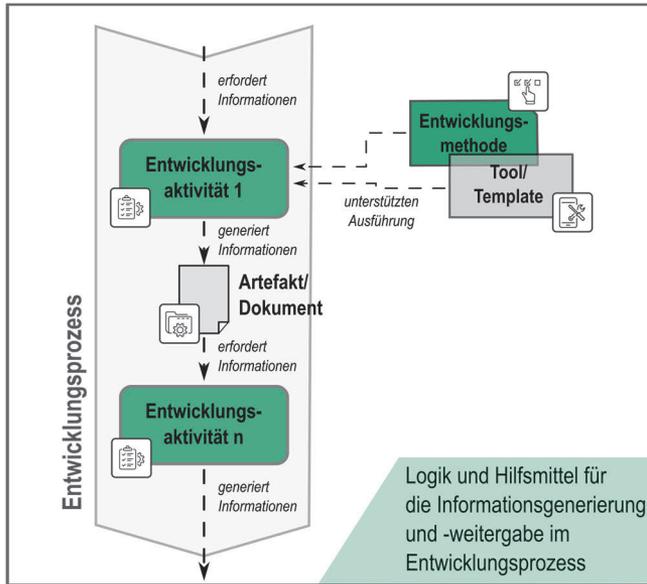


Abbildung 1: Übersicht zu Logik und Hilfsmitteln für die Informationsgenerierung und -weitergabe im Entwicklungsprozess

System/Produkt/Prozess	Art	Folgen	Ursachen	Kontrollmaßnahmen	empfohlene Abstellmaßnahmen	Verantwortlichkeit	Kontrollmaßnahmen	Verbessertes Zustand
Paketlieferung	Lieferung verspätet	Kundenunzufriedenheit	Probleme mit der Strecke ab Stau	Kontrollmaßnahmen: Adressieren, Anfrufen, Anrufen	empfohlene Abstellmaßnahmen: -	Verantwortlichkeit: -	Kontrollmaßnahmen: -	Verbessertes Zustand: -
Produkt aus Lager holen	Paket beschädigt	Schlechte Online-Bewertungen	schlechtes Verpackungsmaterial	Kontrollmaßnahmen: -	empfohlene Abstellmaßnahmen: -	Verantwortlichkeit: -	Kontrollmaßnahmen: -	Verbessertes Zustand: -
Paket einladen	Hohe Zahl an Rücksendungen	Schlechte Sicherung	Fehler beim Verpacken	Kontrollmaßnahmen: -	empfohlene Abstellmaßnahmen: -	Verantwortlichkeit: -	Kontrollmaßnahmen: -	Verbessertes Zustand: -

Unterschiedliche Dokumente als Informationsspeicher im Entwicklungsprozess

Abbildung 2: Exemplarische Dokumente als Informationsspeicher im Entwicklungsprozess

Mit der Veränderung von Produkten besteht die Notwendigkeit, dass Unternehmen ihre Prozesse, aber auch ihre Entwicklungsmethoden anpassen und teilweise erneuern. Daher zielt dieser Betrag darauf ab Entwickler:innen im Umgang mit Veränderungen und den damit einhergehenden Prozess- sowie Entwicklungsmethodenanpassungen zu unterstützen, um den Entwicklungsprozess effektiver und effizienter zu gestalten. Dafür wird in diesem Beitrag, der im Rahmen des Verbundprojektes RePASE (Reflexive Prozessentwicklung und -adaption im Advanced Systems Engineering) entwickelte Systems Engineering Method Matrix (SRMM) - Tool Prototyp vorgestellt.

Zielsetzung und Forschungsschwerpunkt

Um die Informationsgenerierung und -weitergabe im Entwicklungsprozess zu fördern, sind neben prozessualen Anpassungen auch Methodenanpassungen im Entwicklungsprozess notwendig. Entwickler:innen stehen unter anderem vor der Herausforderung, neue Entwicklungsmethoden zu erlernen oder bestehende Entwicklungsmethoden an einen veränderten Entwicklungskontext anzupassen. Dafür ist prozessorientiertes Methodenverständnis notwendig. Nach /3/ ist eine Methode ein planmäßiges, regelbasiertes Vorgehen nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. Daher zielt der Beitrag zum einen darauf ab, Entwickler:innen beim Erlernen von neuem Methodenwissen zu unterstützen. Zum anderen soll mit der Bereitstellung einheitlicher Methodenbeschreibungen die Verständlichkeit der Entwicklungsmethoden verbessert und eine schnellere Anpassung und Vermittlung von Entwicklungsmethoden gefördert werden. Dazu wird die SEMM als Hilfsmittel vorgeschlagen, um Entwicklungsprojekte zu planen, Methodenwissen bereitzustellen, Artefakt-orientiert Entwicklungsmethoden auszuwählen und um Entwicklungsdokumente besser zu managen. Dabei werden insbesondere die Entwicklungsaktivitäten fokussiert und deren Wechselwirkungen untereinander verdeutlicht. Die Aktivitäten des Systems Engineering beziehen sich in diesem ersten Entwurf auf die Systemdefinition und -entwurf des Gesamtsystems.

Konzept der Systems Engineering Method Matrix (SEMM)

Der Grundaufbau der SEMM orientiert sich an der Matrix-orientierten Methodenbereitstellung nach /4/ und ist ein Hilfsmittel, um Entwicklungsprojekte zu planen, Methodenwissen bereitzustellen und Entwicklungsdokumente zu organisieren. Das Aktivitäts- und Artefakt-bezogene Vorgehen wird in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

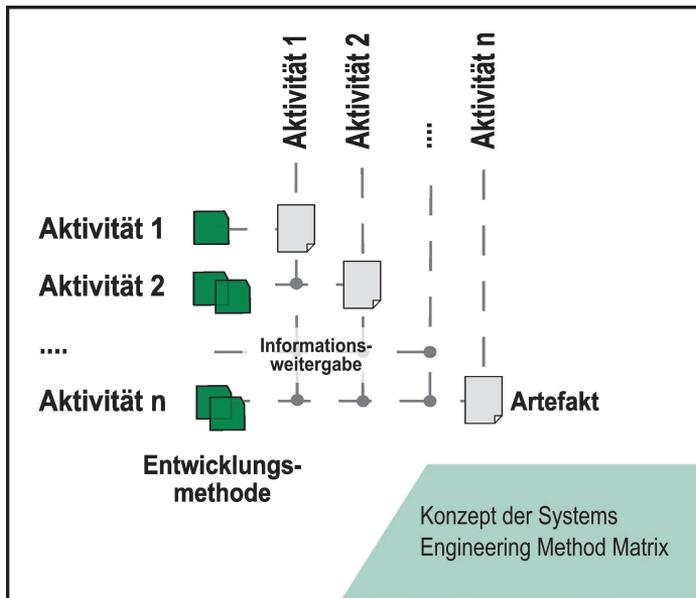


Abbildung 3: Konzept und Aufbau der SEMM

Bei der Planung erforderlicher Entwicklungsaktivitäten mit Hilfe der SEMM, können projektspezifisch die erforderlichen Entwicklungsartefakte (d.h. konkrete Dokumente) definiert und gleichzeitig verschiedene Entwicklungsmethoden zur Unterstützung der Entwicklungsaktivitäten vorgeschlagen werden. Das ist insbesondere für neue Entwickler:innen hilfreich oder bei der Einführung neuer Entwicklungsmethoden relevant.

Bereitstellung von Methodenwissen und Aufbau der Methodensteckbriefe

Um die oben beschriebenen, benötigten Artefakte erstellen zu können, ist es notwendig, zielgerichtet und effizient die entsprechenden Entwicklungsmethoden anzuwenden, um die notwendigen Ergebnisse zu generieren. Damit Entwickler:innen bereits bekannte Methoden rekapitulieren oder das breite und teils divergente Wissen aus der Literatur zielgerichteter anwenden können, wurden Methodensteckbriefe zur Bereitstellung des Methodenwissens in Anlehnung an /5/ entwickelt. Diese Methodensteckbriefe geben einen kurzen, aber ausreichend präzisen Überblick über die einzelnen zu bearbeitenden Entwicklungsmethoden und gehen unter anderem auf den Zweck der Methode, die Entwicklungssituation, das Vorgehen, das Ergebnis, aber auch auf die Werkzeuge zur Anwendung der Methode ein. Exemplarisch ist ein Methodensteckbrief in der Abbildung 4 und der Abbildung 5 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Methode „Use Case Analyse“, welche auch als „Nutzerorientierte Funktionsmodellierung“ bekannt ist.

<i>Methodenname</i>		
Use Case Analyse (Nutzerorientierte Funktionsmodellierung)		
<i>Schlagworte</i>		
Systemdefinition, Funktionen/ Funktionsstruktur entwickeln, Systemgrenze, Stakeholder, Use-Cases		
<i>Zweck/ Ziel (Kernidee)</i>		<i>Entwicklungssituation (Beabsichtigte Nutzung)</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei der Nutzerorientierte Funktionsmodellierung werden Anwendungsfälle ermittelt, in denen das Produkt genutzt wird. Aus den verschiedenen Anwendungsfällen werden erforderliche Funktionen für das zu entwickelnde Produkt und Anforderungen an das Produkt abgeleitet. (Definition aus SYSTEMIC) ▪ Durch das Festlegen von Entwicklungsschwerpunkten und das Abbilden möglicher Anwendungsfälle eines Systems werden das Systemverständnis gefördert und der Umgang mit komplexen Systemen unterstützt. (Zweck aus Lindemann, 2009) 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die nutzerorientierte Funktionsmodellierung findet bezüglich Vorfixierungen auf bereits bekannte Lösungen Anwendung. ▪ Ebenfalls bietet sich diese Methode an, um bei technisch komplexen Problemstellungen einen Überblick über nutzerorientierte Anwendungsfälle zu ermöglichen.
<i>Inputs (erforderlich)</i>	<i>Vorgehen</i>	<i>Outputs (erreichbar)</i>
	<i>Arbeitsschritte der Methode</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systemgrenze ▪ Stakeholder 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ermitteln der Systemgrenze, welche das System vom Umfeld trennt sowie Ermittlung von Stakeholdern, welche im Zusammenhang mit dem System stehen 2. Skizzieren dieser in einem Entwurf 3. Sammeln denkbarer Anwendungsfälle bezogen auf die jeweiligen Stakeholder 4. Zuordnen der Anwendungsfälle auf den jeweiligen Stakeholder 5. Spezifizieren der Anwendungsfälle in Sub-Anwendungsfälle 6. Zuordnen der Sub-Anwendungsfällen zu den Anwendungsfällen 7. Skizzieren des Use-Case-Modells 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Use-Cases
	<i>Ergebnis der Methode</i>	

Abbildung 4: Methodensteckbrief Use Case Analyse (Teil 1)

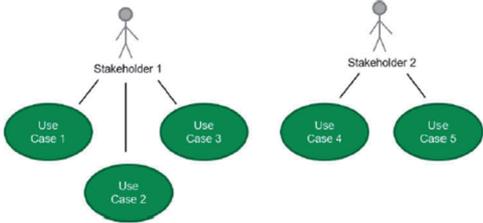
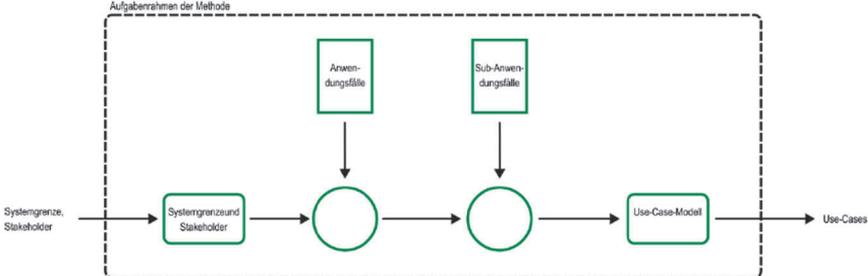
		
Formale Aufgabenbeschreibung		
Die Use Case Analyse umfasst folgende Aufgaben und Eingangs- sowie Ausgangsinformationen:		
		
Methodenkette (Auswahl von vor- und nachgelagerte Methoden)		Werkzeuge/ Tools
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stakeholderanalyse (vorgelagert) ▪ Systemkontextanalyse (vorgelagert) ▪ Einflussmatrix (nachgelagert) ▪ Funktionsdekomposition (nachgelagert) 		Einfache Tools: Whiteboard, Tafel, PowerPoint (Vorlage) MBSE-Werkzeuge: Enterprise Architect (SysML)
Beispiel		Literatur
Die folgende Abbildung zeigt eine Use Case Analyse für einen Staubsaugerroboter: 		Lindemann, 2009 SYSTEMIC Karten

Abbildung 5: Methodensteckbrief Use Case Analyse (Teil 2)

Alle in der SEMM verwendeten Methodensteckbriefe sind strukturell gleich aufgebaut, vergleiche Abbildung 4 und Abbildung 5 für die folgende Erklärung. Jeder Methodensteckbrief beginnt mit einem Namensfeld indem der Titel der Methode festgelegt wird. Das zweite Informationsfeld umfasst Schlagworte, um diese Methode auch hinsichtlich anderer Methoden, Aktivitäten oder Artefakten durchgängig verorten zu können. Ebenfalls ist es möglich Methoden auf diese Weise zu suchen. Ein simples Beispiel ist, wenn der Nutzer eine Systemdefinition durchführen möchte und die Fragestellung erscheint, welche Schritte dafür notwendig sind. Aus Abbildung 4 lässt sich erkennen, dass auch die Use Case Analyse ausgegeben werden würde. Das nächste Feld beinhaltet den Zweck bzw. das Ziel des Methodensteckbriefs. Hier kann der Nutzer prägnant in ein bis zwei Stichpunkten erkennen, ob diese Methode für ihn hilfreich ist. Eine weitere wichtige Frage für einen jeden Nutzer ist, ob dieser Methodensteckbrief zur aktuellen Entwicklungssituation passt. Diese Entwicklungssituation wird ebenfalls auf das Wesentliche reduziert und im nächsten Informationsfeld festgehalten. Anschließend folgt eine neue Tabellenzeile in der im linken Bereich der Abbildung 4 benötigte Inputs, ggf. von vorherigen durchgeführten Methoden festgehalten werden, jene von Nöten sind um die aktuelle Methode des Methodensteckbriefs durchzuführen. Im rechten Bereich werden die Outputs aufgelistet, welche mit dieser Methode erzeugt werden. Zwischen Inputs und Outputs ist das Vorgehen der Methode in Form von aufeinanderfolgenden nummerierten Arbeitsschritten und als exemplarisches verallgemeinertes Ergebnis festgehalten. Ebenfalls wurde für die Grundstruktur der Methodensteckbriefe eine Formale Aufgabenbeschreibung eingeführt. Diese ist in Abbildung 5 zu erkennen. Die Formale Aufgabenbeschreibung kann als eigenständig entwickelte grafische Sprache zur Verdeutlichung und Visualisierung der Aufgaben einer Entwicklungsmethode verstanden werden. Diese ist ebenfalls eine Alternative zum Lesen der oben beschriebenen Arbeitsabfolge zur Ergebniserarbeitung des Methodensteckbriefs.

Die Notation der Formalen Aufgabenbeschreibung hingegen ist in Abbildung 6 zu sichten. Es gibt fünf wesentliche Hauptoperatoren mit denen sich sämtliche Abfolgen des Methodensteckbriefs beschreiben lassen. Diese werden durch ein markantes grafisches Symbol, vergleiche Abbildung 6, beschreiben. Die Symbole sind zum einen der Sketch-Operator, welcher das Erstellen einer Skizze, Abbildung o.ä. erfordert. Ein weiteres Symbol ist der List-Operator, welcher das Auflisten bzw. das Erfassen von Daten erfordert. Weiterhin existiert der Assign-Operator, welche die gesammelten Daten zuordnet. Der Connect-Operator verbindet einzelne Operatoren. Letztlich bleibt der Gate-Operator, welche eine Schleife einleitet. Ebenfalls gibt es zwei weitere benötigte grafische Operatoren, vergleiche unterer Bereich der Abbildung 6. Diese sind zum einen der Aufgabenrahmen der Methode, welcher abstrakt gedacht die Systemgrenze beschreibt. Zum anderen der Verbindungspfeil, welcher die einzelnen Operationen vernetzt und unerlässlich für den Input sowie den Output über die Systemgrenzen ist.

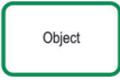
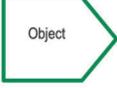
	Sketch	List	Assign	Connect	Gate
Symbol					
Beschreibung	Skizzen-Operation, welche das Erstellen einer Darstellung erfordert.	Listen-Operation, welche das auflisten von Daten initiiert.	Zuordnen-Operation, welche das zuordnen von diversen Daten beschreibt.	Verknüpfen-Operation, welche das verbinden von Operationen umschreibt.	Tor-Operation, welche den Beginn von Schleifen umschreibt.
Object					
Value/Property					
Weiteres	Aufgabenrahmen der Methode 	Beschreibung → 			

Abbildung 6: Notation der Formalen Aufgabenbeschreibung der SEMM

Um den aufgeworfenen Methodensteckbrief in einer Ergebniskette zu verorten bzw. integrieren zu können, existiert ein weiteres Informationsfeld, das der Methodenkette. Hier sind vor- und nachgelagerte Methoden zu sichten. So kann effizient ein Anschluss an die Methode oder einzelne vorgelagerte Methoden identifiziert werden, um einen benötigten Input zu generieren oder den Output weiter zu verarbeiten. Ein weiteres Feld umfasst Werkzeuge bzw. Tools. Hier werden die Bereiche einfache Tools und Spezialwerkzeuge unterschieden. Die einfachen Tools sind meist beim Anwender frei oder günstig verfügbar und liefern bei korrekter Abarbeitung der Methode ein solides verwertbares Ergebnis. Die Spezialwerkzeuge sind eine spezifische, meist monetär anspruchsvolle Alternative, bei der eine stärkere Vernetzung und Koexistenz der Ergebnisse möglich ist. Abschließend wird ein grafisches Beispiel der Ergebnisse des Methodensteckbriefs dargestellt. Dieses Beispiel ist zum Querverständnis aller Methodensteckbriefe durchgängig dasselbe und behandelt die Entwicklung eines Staubsaugroboters. Zur Untermauerung der erarbeiteten Inhalte eines jeden Steckbriefs wird im letzten Informationsfeld eine Auswahl an verwendeter Literatur dargestellt. Diese kann bei tiefergehenden Informationsbedarf ebenfalls helfen.

Funktionsübersicht der SEMM

Für eine langfristig zielgerichtete Umsetzung der methodischen Mechanismen der SEMM in eine digitale Variante, sind einige wesentliche Funktionen von Nöten. Diese lassen sich übersichtlich in die Bereiche technischer Zugriff auf die SEMM, Erstellung und Verwaltung unterschiedlicher Projekte, Erstellung und Änderung der SEMM, Erstellen und Pflegen von Entwicklungsaktivitäten, Erstellen und Pflegen von Methodenbeschreibungen, Erstellen und Pflegen von Entwicklungsartefakten und Unterstützung der Nutzung, unterteilen. Folglich sind die einzelnen Funktionen der Kategorien aufgelistet:

Zugriff auf SEMM:

- Das Frontend der SEMM soll über übliche, aktuelle Browser aufgerufen werden. Vor der Nutzung müssen Nutzernamen und Passwörter überprüft werden. Für den SEMM-Prototyp muss keine Nutzerverwaltung umgesetzt werden.
- Die Anzeige und Nutzung des Frontends muss mit PC und mobilen Endgeräten ohne Einschränkungen der Darstellung und Editierung möglich sein.

Erstellung und Verwaltung unterschiedlicher Projekte:

- Es müssen unterschiedliche SEMM als Projekte verwaltet werden können. Über die GUI müssen unterschiedliche Projekte angelegt und ausgewählt werden können.
- Für ein Projekt muss ein Titel, Ersteller:in und ein Erstellungsdatum angegeben werden.
- Änderungen in einem Projekt müssen mit Zeitangabe und Namen gespeichert werden. Die Änderungshistorie muss einsehbar sein.
- In einem Projekt müssen die bestehenden Methodensteckbriefe und Vorlagen verwendet und verknüpft werden können. Die Verwendung muss in den jeweiligen Steckbriefen und Vorlagen gespeichert werden („wird verwendet in Projekt XY“).

Erstellung und Änderung einer SEMM:

- Für die Erstellung einer neuen SEMM sollen im Anzeigefenster erste Aktivitätsblöcke (links) mit Blindtexten einschließlich Artefakten und Methoden angezeigt werden.
- Für die Vervollständigung und Anpassung einer SEMM müssen bestehende Entwicklungsaktivitäten editiert (Titel, Beschreibung) werden können. Wenn eine neue Entwicklungsaktivität erstellt wird, müssen im Anzeigefenster neue Zeilen und Spalten sowie Blöcke für Methoden und Artefakte ergänzt werden.

- Wenn eine Entwicklungsaktivität geändert wird, muss die/ der Nutzer:in auf die Überprüfung der Input- und Output-Artefakte und Methoden hingewiesen werden.

Erstellen und Pflegen von Entwicklungsaktivitäten:

- Für eine Entwicklungsaktivität müssen immer ein Titel, eine Beschreibung sowie Input- und Output-Artefakte und Methoden angegeben werden.
- Die Erstellung und Pflege muss über eine GUI via Texteingabe und Auswahllisten möglich sein.
- Für jede Entwicklungsaktivität muss mindestens ein Input- und ein Output-Artefakt angegeben werden. Bei Nichterfüllung ist ein Hinweis zu erzeugen.
- Für jede Entwicklungsaktivität muss mindestens eine Methode angegeben werden. Bei Nichterfüllung ist ein Hinweis zu erzeugen.
- Input- und Output-Artefakte sowie Methoden müssen aus einer Liste ausgewählt werden können. Bei der Eingabe soll im Idealfall automatisiert ein Vorschlag zur Vervollständigung erzeugt werden (Wünschanforderung). Wenn neue Artefakte erzeugt werden, sind diese in die bestehende Liste aufzunehmen.
- Bestehende Entwicklungsaktivitäten sollen geändert werden können. Änderungen sollen anhand einer Änderungshistorie (Datum, Nutzer:in) nachvollziehbar sein.

Erstellen und Pflegen von Methodenbeschreibungen:

- Methoden müssen durch Texte und Abbildungen beschrieben werden können. Die Eingabe der Beschreibungen muss über eine GUI via Freitext und Upload von Abbildungen möglich sein.
- Die Methodenbeschreibung umfasst folgende Attribute des oben beschriebenen Methodensteckbriefs, siehe Abbildung 4 und Abbildung 5.
- Alle Methoden müssen in einer Liste (Datenbank) archiviert werden.
- Es muss möglich sein, weitere Attribute für die Methodenbeschreibung zu ergänzen.
- Methodenbeschreibungen sollen als .pdf-Dokument heruntergeladen werden können (Wunschforderung).
- Bestehende Methodenbeschreibungen sollen geändert werden können. Änderungen sollen anhand einer Änderungshistorie (Datum, Nutzer:in) nachvollziehbar sein.

Erstellen und Pflegen von Entwicklungsartefakten:

- Für jedes Entwicklungsartefakt muss ein Titel und eine Kurzbeschreibung angegeben werden. Optional können Dokumente (.pdf, .docx, .doc, .xlsx, .xls) hinterlegt werden. Die Eingabe der

Beschreibungen muss über eine GUI via Freitext und Upload von Dokumenten möglich sein.

- Alle erzeugten Entwicklungsartefakte müssen in einer Liste (Datenbank) gespeichert werden.

Unterstützung der Nutzung:

- Im Hauptfenster sollen z.B. via Mouse-Over ergänzende Informationen (z.B. Kurzbeschreibungen für Entwicklungsaktivitäten, Methoden und Entwicklungsartefakt) angezeigt werden können.
- Bei Auswahl von Entwicklungsaktivitäten, Methoden oder Entwicklungsartefakte sollen im unteren Fenster detaillierte Informationen angezeigt werden.
- Die Erstellung und Änderung von Entwicklungsaktivitäten, Methoden oder Entwicklungsartefakten soll jeweils über ein Fenster ermöglicht werden. Das Fenster wird nach Auswahl des jeweiligen Objektes geöffnet.

Mit diesen Hauptfunktionen wird die digitale webbasierte Umsetzung der SEMM im nächsten Abschnitt teilweise vorgestellt.

Vorstellung des SEMM-Tool Prototypen

Die im SEMM-Tool hinterlegte Funktion ermöglicht es, Abhängigkeiten zwischen Entwicklungsaktivitäten und Dokumenten festzulegen (vgl. Abbildung 7).

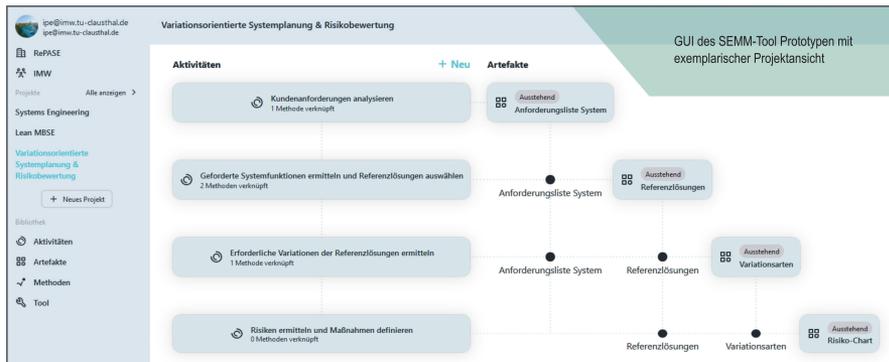


Abbildung 7: GUI des SEMM-Tool Prototypen mit exemplarischer Projektsicht

Dazu wird definiert, welche Information aus einer vorherigen Aktivität oder einem Dokument wiederverwendet werden sollen, wie beispielsweise die Wiederverwendung von Systemanforderungen oder Funktionen für die Konzeptentwicklung oder auch die Fehleranalyse. Wir verzichten dabei bewusst auf formale Beschreibungen, wie sie im Model-based Systems Engineering

vorgeschlagen werden. Damit ist keine Einführung neuer oder komplexer Entwicklungswerkzeuge erforderlich. Die zugrundeliegende Logik der Abhängigkeiten zwischen Entwicklungsaktivitäten, Artefakte und Entwicklungsmethoden, ermöglicht es, trotzdem eine hohe Durchgängigkeit und Rückverfolgbarkeit von Informationen innerhalb eines Entwicklungsprojektes zu erreichen (vgl. Abbildung 8). Das prototypische Tool steht als browserbasierte Lösung zur Verfügung und kann auf die Anforderungen unterschiedlicher Unternehmen angepasst werden. Über die Zeit entwickelt sich mit der praktischen Anwendung innerhalb dieses Tools eine unternehmensspezifische Wissensbasis, die verschiedene Entwicklungsaktivitäten, Templates für die Erstellung von Dokumenten aber auch Methodenwissen umfasst. Das Tool konnte im Rahmen des Verbundprojektes RePASE als prototypische Lösung umgesetzt und mit Praxispartnern erprobt werden. Zudem wurden mehr als 40 Methodensteckbriefe erarbeitet, die im SEMM-Tool zur Verfügung stehen.

Kundenanforderungen analysieren

1. Allgemein 2. Input-Artefakte 3. Output-Artefakte 4. Methoden (optional)

Zugewiesene Artefakte

Name

Anforderungsliste System

Artefakte zuweisen + Neues Artefakt

Name

Artefakt 01

Dokumentation Kundenanfrage

Anforderungsliste System

Morphologischer Kasten und Referenzlösungen

Referenzlösungen

Artefakt #dcf6

Variationsarten

Risiko-Chart

Verknüpfung von Entwicklungsaktivitäten und Artefakten bei der Projektplanung

→ Weiter ✓ Speichern und weiter

Abbildung 8: Verknüpfung von Entwicklungsaktivitäten und Artefakten bei der Projektplanung am Beispiel „Kundenanforderungen analysieren“

Zusammenfassung und Ausblick

Die SEMM wurde entwickelt, um Entwickler:innen in der Durchführung komplexer Entwicklungsprozessaktivitäten konsistent sowie flexibel zu unterstützen und dadurch die Effizienz im Entwicklungsprozess zu steigern. Die SEMM beinhaltet verschiedene Aktivitätsebenen, welche (Ergebnis-)Artefakte als notwendige Inputs und Outputs erzeugen. Diese werden wiederum durch die Methodenanwendung erzeugt. Um eine einheitliche und präzise Erzeugung von Methodenergebnissen bzw. Artefakten zu gewährleisten, wurden vereinheitlichte Methodensteckbriefe erstellt. Damit die SEMM schnell und zielgerichtet digital umgesetzt werden kann, wurden notwendige technische und logische Funktionen zusammengetragen. Diese wurden in einem digitalen Prototyp umgesetzt und sind für die Bearbeitung von verschiedenen Anwenderprojekten bereit. Letztlich ist der Prototyp der SEMM durch ein wachsendes Portfolio von Entwicklungsmethoden kontinuierlich erweiterbar. Durch das Einpflegen weiterer Projekte, können weitere Entwicklungsbedarfe aufgezeigt werden. Derzeit wurde sich im SEMM Prototypen auf den Bereich der Systemdefinition und -entwurf des Gesamtsystems fokussiert. Zukünftig sollen auch die weiteren Bereiche im Produktentwicklungsprozess wie beispielsweise die Systemintegration oder die Systemverifikation aufbereitet und entsprechende Methodensteckbriefe zur Verfügung gestellt werden. Damit die SEMM kontinuierlich weiterentwickelt werden kann, ist die Erprobung und Anwendung mit weiteren unterschiedlichen Anwendungspartnern hilfreich.

Danksagung

Die vorgestellten Forschungsergebnisse sind Teil des Projekts RePASE - Reflexive Prozessentwicklung und -adaption im Advanced Systems Engineering. Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms "Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen" (02J19B149) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) geleitet. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

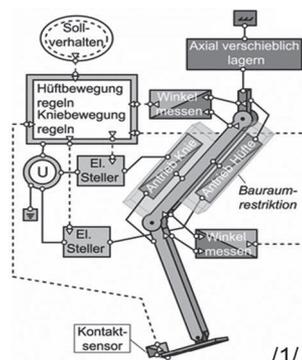
Literatur

- /1/ ISO15288 (2015): ISO15288:2015 Systems and software engineering. System life cycle processes.
- /2/ INCOSE (2015), INCOSE-TP-2003-002-04: Systems Engineering Handbook: A guide for system life cycle processes and activities, International Council on Systems Engineering (INCOSE), San Diego, USA.
- /3/ Birkhofer, H.; Kloberdanz, H.; Berger, B.; Sauer, T.: Cleaning up design methods-describing methods completely and standardised, In DS 30: Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54516885>
- /4/ Wach, J. J., Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung, München: Hanser 1994 (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. Dissertation 1993, Technische Universität München
- /5/ Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. VDI-Buch. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 3., korrigierte Auflage, 2009, ISBN 978-3-642-01422-2

Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering

Schumacher, T.; Inkeremann, D.

Die effiziente Interaktion verschiedener Entwicklungsdisziplinen und die Vermeidung von Modellinkonsistenzen stellen zentrale Herausforderungen innerhalb heutiger Systementwicklungen dar. Um bei dieser Herausforderung zu unterstützen, erläutert dieser Beitrag die Anwendung heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering. Hierzu wird ein technisches Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle vorgestellt. Kernelement dieses Beitrags ist die Einführung eines beabsichtigten Bewertungsvorgehens, um den Nutzen heterogener Modelle initial zu evaluieren.



The efficient interaction of different engineering disciplines and the avoidance of model inconsistencies represent crucial challenges within today's system developments. This article explains the application of heterogeneous models in Model-based Systems Engineering to support this challenge. To this end, a technical realisation concept for developing digital, heterogeneous models is presented. The core element of this article is the introduction of an intended evaluation procedure to evaluate the advantages of heterogeneous models initially.

Einführung und Problemstellung

Industriebranchenübergreifende Interviews belegen, dass eine zentrale Herausforderung in heutigen Systementwicklungen die interdisziplinäre Kollaboration verschiedener Entwicklungsdisziplinen darstellt /2/. Model-based Systems Engineering (MBSE) schlägt daher die Anwendung semi-formaler, abstrakter Modelle für einen verbesserten disziplinübergreifenden Informationsaustausch und Kollaboration vor /3/. Hierbei ist insbesondere die Anwendung der Modellierungssprache SysML (Systems Modeling Language) in Industrie und Wissenschaft etabliert /2, 4/. Zusätzlich zu den interdisziplinären Entwicklungsaufgaben, wie Anforderungsmanagement oder Architekturentwicklung, benötigt die Entwicklung mechatronischer Systeme auch eine domänenspezifische Entwicklung, wie Mechanik-, Elektrik/Elektronik- und Softwareentwicklung /5, 6/. Als Resultat entstehen während der Systementwicklung verschiedene Arten von produktbeschreibenden Modellen, wie SysML-, CAD- oder Modelle der Softwareentwicklung. Eine zentrale Herausforderung in der Anwendung von MBSE besteht darin, die Modellkonsistenz zwischen diese unterschiedlichen Modelle sicherzustellen /6/. Daher schlagen frühere Veröffentlichungen die Anwendung

heterogene Modelle vor, um interdisziplinäre und domänenspezifische Modelle zu verknüpfen und integrieren /7, 8/.

Zielstellung und Forschungsfrage

Dieser Beitrag greift die Anwendung heterogener Modelle im Systems Engineering auf und erläutert das geplante Vorgehen, um den Nutzen heterogener Modelle initial zu evaluieren. Aus dieser Zielstellung lässt sich nachfolgende Forschungsfrage ableiten:

- Welches Evaluationsvorgehen ermöglicht eine initiale Bewertung des Nutzens heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering?

Nachfolgend wird der Aufbau dieser Beitrag dargestellt. Zunächst werden notwendige Grundlagen zu der Modellierungstechnik heterogene Modelle eingeführt. Anschließend wird die entwickelte Lösung zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle grundlegend erläutert. Nachfolgend wird das entwickelte Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einen Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten.

Grundlagen und Stand der Technik

Dieser Abschnitt erläutert die Grundlagen der Modellierungstechnik heterogene Modelle und stellt ein Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle grundlegend vor.

Heterogene Modelle

Heterogene Modelle erlauben die Integration verschiedenartiger Partialmodelle und Modellelemente in eine gemeinsame Visualisierung /1/. Jansen /1/ zeigt die Anwendung heterogener Modelle an dem Beispiel eines mechatronischen Beins. Hierbei kombiniert das heterogene Modell sowohl 3D-Objekte, zweidimensionale Ersatzmodelle, funktionale Systembeschreibungen sowie Kontextinformationen, wie Bauraumvorgaben, und deren Verknüpfungen, siehe Titelbild dieses Artikels.

Der beschriebene Modellierungsansatz wird in diesem Beitrag aufgegriffen, um interdisziplinäre und domänenspezifische Modellelemente zu verknüpfen. Somit besteht beispielsweise die Möglichkeit SysML-Modellelemente, wie funktionale Systembeschreibungen oder Schnittstellen an der Systemgrenze, mit CAD-Objekten in einem heterogenen Modell zu kombinieren, siehe Abbildung 1.

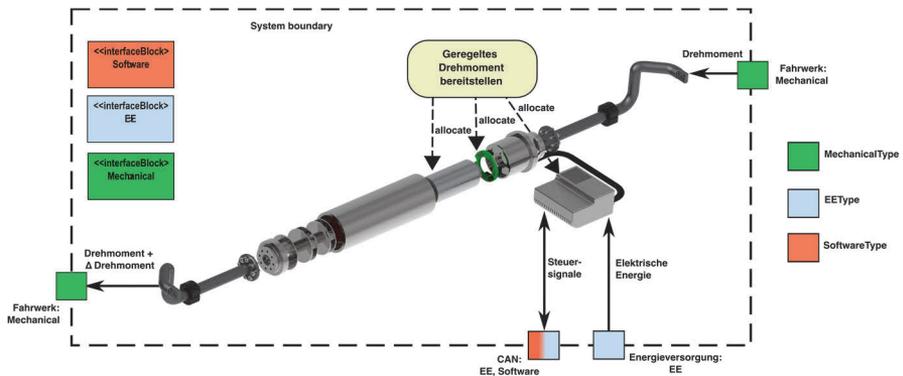


Abbildung 1: Konzeptdarstellung heterogene Modelle /7/

Diese integrierte Visualisierung kann die Kollaboration unterschiedlicher Disziplinen unterstützen, indem z.B. Domänenexperten in die Modellierung eingebunden werden können. Darüber hinaus sollen heterogene Modelle auch bei der Sicherstellung der Modellkonsistenz unterstützen. Hierzu ist vorgesehen, dass die zu erzeugenden heterogenen Modelle auf eine verknüpften Datenstruktur basieren. Zusammenfassend, soll die Anwendung heterogener Modelle interdisziplinäre Entwicklungsaufgaben, wie die Architekturentwicklung mechatronischer Systeme, durch eine bessere Kollaboration in interdisziplinären Teams, informativere Modelle und erhöhte Modellkonsistenz unterstützen /9/.

Der folgende Abschnitt stellt ein Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle vor.

Konzept zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle

Zur Erzeugung heterogener Modelle, welche sowohl unterschiedliche Modellelemente in eine gemeinsame Visualisierung integrieren als auch zur Sicherstellung der Modellkonsistenz beitragen, wurde eine Umsetzungskonzept entwickelt, siehe Abbildung 2. Zentrales Element ist die Entwicklung einer Programmierschnittstelle (*Application Programming Interface, API*) zum Verknüpfen der eingesetzten SysML- und CAD-Modellierungswerkzeuge. Hierbei soll die zu entwickelnde API das CAD-Werkzeug um die notwendigen Funktionen zur Erzeugung heterogener Modelle erweitern und gleichzeitig auf die vorhandenen Funktionen zur CAD-Modellierung zurückgreifen.

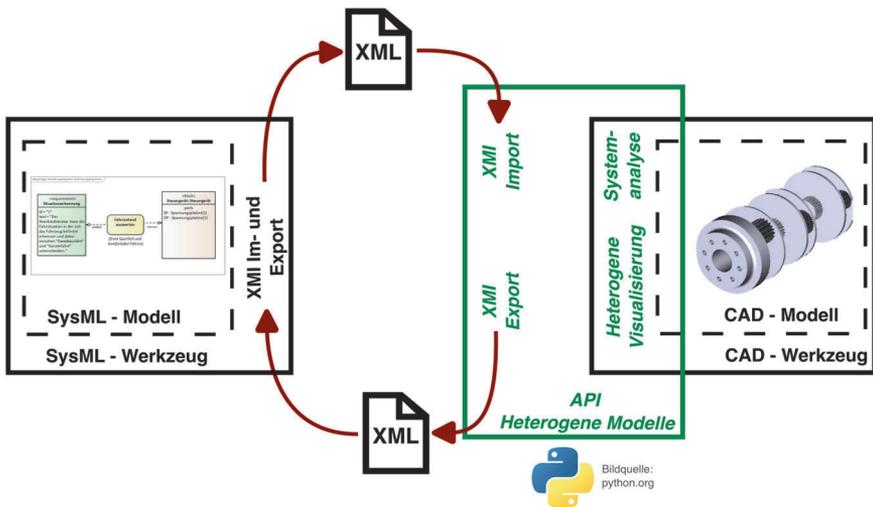


Abbildung 2: Konzept zur Realisierung digitaler, heterogener Modelle /10/

Entsprechend dem dargestellten Realisierungskonzept beinhaltet die zu entwickelnde API vier Hauptfunktionen:

1. **Heterogene Visualisierung.** Zentrale Funktion der zu entwickelnden API ist die Visualisierung von CAD- und SysML-Modellelemente in einer gemeinsamen Visualisierung. Hierzu müssen die vorhandenen Funktionen der CAD-Modellierung mit neuen Funktionen zur Erzeugung von SysML-Elementen erweitert werden.
2. **Systemanalyse.** Die zu entwickelnde API soll außerdem bei der Analyse bestehender Systemarchitekturen unterstützen. Hierzu soll das CAD-Tool um Funktionen erweitert werden, um Objekte einerseits visuell hervorzuheben und andererseits textuelle Informationen attributiv in das heterogene Modelle zu integrieren.
3. **XMI Import.** Zur Sicherstellung der Modellkonsistenz sollen heterogene Modelle auf Basis einer verknüpften Datenstruktur erzeugt werden. Hierzu sieht das Umsetzungskonzept einen datenbasierten Austausch zwischen den Modellierungswerkzeugen vor. Als Datentyp werden XML-Dateien mit XMI Datenstruktur (Version 1.1) verwendet. Diese Funktion ermöglicht das Einlesen von (partiellen) SysML-Modellen in das CAD-Werkzeug. Hierzu ist ein Python-basierter Einlesealgorithmus umzusetzen.
4. **XMI Export.** Die Vermeidung von Modellinkonsistenzen erfordert gleichzeitig, dass die Ergebnisse der Architekturentwicklung (heterogenes Modell) auch an das SysML-Werkzeug zurückgeführt werden. Hierzu wird erneut die XMI-Datenstruktur aufgegriffen. Zentrales Element ist hierbei, dass die erzeugten 3D-Objekte aus der CAD-Modellierung in SysML-Blockelemente überführt werden.

Die softwarebasierte Realisierung des vorgestellten Konzepts soll durch die Erzeugung heterogener Visualisierungen bei der Ausführung interdisziplinärer Entwicklungsaufgaben unterstützen, indem einerseits informativere Modelle erzeugt und außerdem der Modellierungsprozess unterstützt wird, durch bspw. eine bessere Einbindung von Domänenexperten und eine verbesserte Kollaboration und Kreativität während der Modellierung. Außerdem soll die realisierte API ebenfalls bei einer zentralen Herausforderung im MBSE unterstützen, die Wahrung von Modellkonsistenz. Hierzu sieht das Umsetzungskonzept einen datenbasierten Austausch von XML-Daten vor, welche automatisiert in das heterogene Modell importiert und exportiert werden. Die Verwendung von XML-Daten mit XML-Datenstruktur liegt darin begründet, dass die etablierten SysML-Modellierungswerkzeuge üblicherweise bereits eine Import- und Exportfunktion für diesen Datentyp bereitstellen. Somit kann durch Einlesen von SysML- und CAD-Modellen (z.B. durch Importieren von STEP-Dateien) Wissen aus früheren Produktgenerationen in das heterogene Modell eingelesen werden. Dies ermöglicht die Erzeugung einer initialen Version der Systemarchitektur, welche auf Architekturentscheidungen aus früheren Produktgenerationen basiert. Dieses Vorgehen ermöglicht somit Wissen aus früheren Produktgenerationen wiederzuverwenden und die Konsistenz zwischen SysML- und CAD-Modellen sicherzustellen. Beide Faktoren tragen zu einem effizienteren Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme bei. Neben der zuvor dargestellten Unterstützung der Architekturentwicklung (Synthesepfad) soll die zu entwickelnde Lösung ebenfalls bei der Analyse bestehender Systemarchitekturen unterstützen, um bspw. externe Einflussfaktoren zu analysieren. Diese Analyse trägt zu einer robusteren Systemarchitektur bei, indem externe Einflussgrößen, wie Temperatureinflüsse, im Design berücksichtigt werden. Im Umsetzungskonzept ist daher vorgesehen, dass die API während der Systemanalyse sowohl Objekte visuell hervorheben als auch textuelle Hinweise im heterogenen Modell erlaubt.

Um den erwarteten Nutzen digitaler, heterogener Modelle initial zu bewerten, wurde ein Evaluationsvorgehen entwickelt, welches der nachfolgende Abschnitt erläutert.

Vorgehen zur Evaluation digitaler, heterogener Modelle

Die Evaluation der entwickelten API zur Erzeugung digitaler, heterogener Modelle ist anhand von Studierendenbefragungen geplant. Dazu nehmen Studierende, mit geeignetem Vorwissen, an einem Übergabeexperiment (*Handover Experiment*) teil. Hiermit wird die Zielstellung verfolgt, den Nutzen heterogener Modelle gegenüber klassischen SysML-Modellen innerhalb der Architekturentwicklung zu ermitteln.

Experimentablauf

Innerhalb des Übergabeexperiments sollen zunächst zwei unabhängige Studierendenteams die Architektur eines mechatronischen Systems modellieren. Hierbei verwendet ein Team die etablierten SysML-Modelle und das zweite Team

die entwickelte Modellierungstechnik zur Erzeugung heterogener Modelle. Als Ergebnis liegen zwei unterschiedliche Architekturmodelle vor, welche als Artefakte an eine dritte Studierendengruppe übergeben (*Handover*) werden. Aufgabe der dritten Studierendengruppe ist es, basierend auf dem jeweiligen Architekturmodell das detaillierte Design des Systems in Form eines CAD-Modell zu erzeugen. Abbildung 3 stellt den geplanten Ablauf schematisch dar.

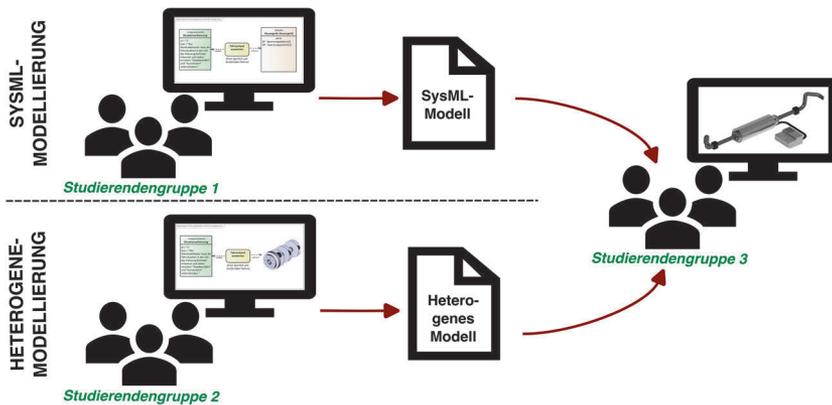


Abbildung 3: Ablauf Übergabeexperiment

Evaluation der Modellierungstechnik

Nach Abschluss des Übergabeexperimentes werden die Studierendengruppen anhand eines Fragebogens befragt. Studierendengruppe 2 hinsichtlich der Anwendung der entwickelten Modellierungstechnik für einen konkreten Anwendungsfall und Studierendengruppe 3 hinsichtlich der Verständlichkeit und Anwendbarkeit der unterschiedlichen Übergabeartefakte (Architekturmodelle) als Grundlage für die anschließende domänenspezifische Entwicklung.

Die Rückmeldungen der Studierenden sollen dazu beitragen, den Nutzen heterogener Modelle initial zu evaluieren. Hierzu stellt der folgende Abschnitt den erwarteten Nutzen der Modellierungstechnik gegenüber klassischer SysML-Modellierung vor.

Zielstellung

Anhand des geplanten Übergabeexperimentes soll der erwartete Nutzen heterogener Modelle, als integrierte Architekturmodelle, gegenüber klassischen SysML-Modellen von Studierenden bestätigt werden. Konkret sollen folgende Vorteile bzw. Nutzen der Modellierungstechnik evaluiert werden:

- Informativere Modelle zur Ausführung interdisziplinärer Entwicklungsaufgaben
- Bessere Wiederverwendung vorhandenen Wissens, in Form von SysML- und CAD-Modellen
- Höhere Modellkonsistenz zwischen interdisziplinärer und domänenspezifischer Entwicklung
- Einfacheres Modellierungsvorgehen
- Vereinfachte Definition des Modellierungszwecks
- Unterstützung bei der Ausführung von Entwicklungsaufgaben
- Verbesserung der Kollaboration in den Entwicklungsteams
- Erhöhung der Modellierungskreativität innerhalb der Entwicklungsteams
- Verbessertes Systemverständnis

Die erwarteten Vorteile der eingeführten Modellierungstechnik bilden die Grundlage für die Entwicklung eines geeigneten Fragebogens, um gezielt Rückmeldungen der Studierenden zu den erwarteten Vorteilen zu erhalten.

Das vorgestellte Vorgehen zur Evaluation heterogener Modelle kann jedoch nur als eine initiale Bewertung und somit das Ergebnis nur eingeschränkt als allgemeingültig betrachtet werden. Die Studierenden weisen zwar die notwendigen Grundlagen zur Anwendung der Modellierungstechnik auf, jedoch sind die Rückmeldungen sowohl aufgrund der begrenzten Anzahl als auch aufgrund der unzureichenden Praxiserfahrung mit Einschränkungen zu betrachten. Eine zusätzliche Anwendung des eingeführten Evaluierungsvorgehen mit Praktikern könnte das initiale Evaluationsergebnis absichern.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag empfiehlt die Anwendung heterogener Modelle im Model-based Systems Engineering um interdisziplinäre Entwicklungsaufgaben zu unterstützen. Dazu werden heterogene Modelle grundlegend eingeführt und ein Konzept zur technischen Realisierung digitaler, heterogener Modelle vorgestellt. Kernelement dieses Beitrags ist ein entwickeltes Vorgehen zur Evaluation der eingeführten Modellierungstechnik. Anhand eines Übergabeexperiments (*Handover-Experiment*) soll der Nutzen heterogener Modelle gegenüber klassischen SysML-Modellen evaluiert werden. Hierzu wendet eine Studierendengruppe die etablierte SysML-Modellierung und eine weitere Studierendengruppe die eingeführten heterogenen Modelle zur Entwicklung einer Systemarchitektur an. Die entwickelten Architekturmodelle werden anschließend als Übergabeartefakte an eine dritte Studierendengruppe übergeben, welche auf deren Grundlage die Architekturentwicklung abschließen, indem diese den Detailentwurf des Systems anhand eines CAD-Modells entwickeln. Abschließend werden die Studierenden hinsichtlich des Nutzens der eingeführten Modellierungstechnik befragt und die Rückmeldungen ausgewertet. Hierbei stellt das Ergebnis des vorgestellten Evaluierungsvorgehen nur ein initiales Evaluationsergebnis dar, um dieses Ergebnis

abzusichern, empfiehlt sich, dass beschriebene Vorgehen mit Industriepartnern zu wiederholen.

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).

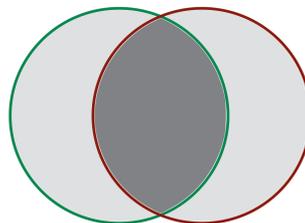
Literatur

- /1/ Jansen, S.: Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2007
- /2/ Gausemeier J.; Czaja A.; Wiederkehr O.; Dumitrescu R.; Tschirner C.; Steffen D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn, 2013
- /3/ Friedenthal S.: A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language. 3rd ed. San Francisco, Elsevier Science, 2014
- /4/ Berschik MC.; Schumacher T.; Laukotka FN.; Krause D.; Inkermann D.: MBSE within the Engineering Design Community – an Exploratory Study. In: Proc. Des. Soc. 2023; 3:2595–604, <https://doi.org/10.1017/pds.2023.260>
- /5/ Vogel-Heuser B.; Böhm M.; Brodeck F.; Kugler K.; Maasen S.; Pantförder D.; et al.: Interdisciplinary engineering of cyber-physical production systems: highlighting the benefits of a combined interdisciplinary modelling approach on the basis of an industrial case. In: Des. Sci. 2020;6, <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.2>
- /6/ Husung S.; Faheem F.; Li Z.: Wissensbasiertes und kollaboratives Systems Engineering mechatronischer Produkte. In: Entwerfen Entwickeln Erleben 2024 Menschen, Technik und Methoden in Produktentwicklung und Design, Technische Universität Dresden, 2024, p. 46–58
- /7/ Schumacher T.; Inkermann D.: Model Inconsistencies and Solution Approaches to Maintain Consistency in Model-based Systems Engineering. In: Michler O, editor. ICONS 2023: The eighteenth International Conference on Systems April 24th-28th, 2023, Venice, Italy, Wilmington, DE, USA: IARIA; 2023, p. 23–28
- /8/ Schumacher T.; Inkermann D.: Heterogeneous models to Support Interdisciplinary Engineering - Mapping Model Elements of SysML and CAD. In: Procedia CIRP 2022;109:653–8, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.309>
- /9/ Schumacher T.; Inkermann D.: Investigation of advantages of models and the modelling process by introducing a model evaluation concept. In: Proc. Des. Soc. 2024;4:2735–44, <https://doi.org/10.1017/pds.2024.276>
- /10/ Schumacher T.; Stephan R.; Inkermann D.: Development and Implementation of Digital Heterogeneous Models in Model-based Systems Engineering (in Review). In: 35th CIRP Design 2025.

Anwendung von Transfer Learning für die Degradationsprognose von Systemen

Bauer, R.; Inkermann, D.

Transfer Learning (TL) nutzt Informationen und Modelle von Vergleichssystemen und ist ein vielversprechender Ansatz für die Degradationsmodellierung bei Datenmangel in frühen Entwicklungsphasen. Es wird ein Literaturreview durchgeführt, um eine Übersicht zu TL-Ansätzen und deren Anforderungen und Eigenschaften zu analysieren. Auf dieser Grundlage werden die TL-Ansätze anhand ihrer Datenanforderungen und Leistungsfähigkeit bewertet.



Transfer Learning (TL) uses information from comparative problems for modeling and is a promising method for degradation prognosis under a lack of data in early design stages. A literature review is conducted to provide an overview of existing TL methods and their requirements and properties. On this basis, collected TL methods will be assessed, considering their data requirements and performance.

Einleitung

Um die Planung von Lebenszyklusoptionen, wie bspw. Wiederverwendung oder Wartung zu verbessern, sind Lebensdauermodelle von Systemkomponenten von zentraler Bedeutung /1/. Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen können Produkte mittels präziser Degradationsprognosen grundlegend an die gestellten Anforderungen angepasst werden. In späteren Entwicklungsphasen sind häufig nur Anpassungen mit geringeren Optimierungspotenzial möglich /2/. Ein üblicher Ansatz zur Durchführung von Degradationsprognosen ist die empirische Modellbildung. Dabei werden Schädigungsgrößen unter definierten Betriebsbedingungen gemessen und daraus Modellfunktionen abgeleitet /3/. Allerdings sind Produkte in frühen Entwicklungsphasen physisch noch nicht existent, wodurch keine Versuchsdaten gesammelt werden können. Um Degradationsprognosen in frühen Entwicklungsphasen vorzunehmen, können Informationen und Lebensdauerdaten von Vergleichssystemen genutzt werden /4/. Eine Möglichkeit zur Übertragung solcher Informationen ist das Transfer Learning (TL). Dabei handelt es sich um Verfahren des Maschinellen Lernens (ML), die u.a. in der Bild- und Textklassifizierung sowie der Spracherkennung angewendet werden /5/. Für die Degradationsmodellierung neuer Produkte ist dabei wichtig, dass die Vergleichssysteme bzw. ihre Merkmalsräume hinreichend ähnlich sind. Gleiches gilt für den Anwendungsfall bzw. Betriebs- und Umfeldbedingungen /6/. Aus unterschiedlichen

Anwendungsfällen und Systemen werden Referenzdomänen gebildet, welche sich folgerichtig ebenfalls möglichst wenig unterscheiden sollten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Bildung von Domänen zur Durchführung von TL

Domäne	System	Anwendungsfall
Domäne 1	System A	Fall 1
Domäne 2	System B	Fall 1
Domäne 3	System A	Fall 2
Domäne 4	System B	Fall 2

Aus den Daten der Referenzdomänen werden mittels TL neue Modelle gebildet, welche sich aus gemeinsamen Eigenschaften ableiten /7/. Dies geschieht, indem Muster in den Daten der Domänen erkannt und für die Modellbildung verwendet werden. Eigenschaften, die sich nicht in mehreren Domänen wiederfinden, werden bei der Modellierung ignoriert oder haben einen geringeren Einfluss. Das Prinzip ist in Abbildung 1 verdeutlicht.

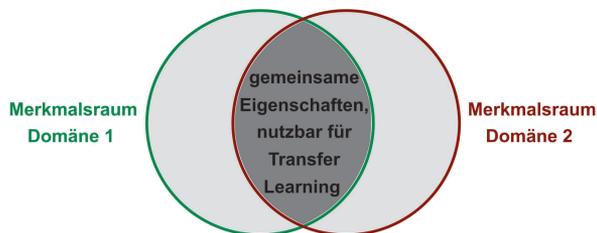


Abbildung 1: Konzept des TL in Anlehnung an /6/

Vorteile des TL gegenüber anderen Verfahren des ML sind der geringere Bedarf an Daten, die Möglichkeit, vorhandene Modelle durch ergänzende Daten von Vergleichsdomänen zu verbessern, eine schnellere und einfachere Modell-erstellung, sowie die Möglichkeit zur Übertragung von Modellen auf Vergleichsdomänen mit Datenmangel /5/. Damit erscheint das TL als eine vielversprechende Methode zur Degradationsprognose von Systemen in frühen Entwicklungsphasen.

Problemstellung und Ziele

In diesem Beitrag wird die Eignung von TL-Ansätzen zur Degradationsmodellierung unter Datenmangel bewertet. Es wird die Hypothese verfolgt, dass mittels TL auf unterschiedliche Domänen übertragbare Degradationsmodelle erstellt werden können, wenn zugrundeliegende Schädigungsmechanismen und Merkmalsräume hinreichend ähnlich sind. Dazu wird ein Literaturreview durchgeführt, um eine Übersicht zu TL-Ansätzen und deren Anforderungen und Eigenschaften zu erstellen. Es sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche TL-Methoden gibt es, um Lebensdauermodelle zu erstellen?
- Welche Informationen und Datenmengen werden für TL benötigt?
- Wie hoch ist die Genauigkeit TL-basierter Degradationsprognosen?

Review zu TL-Methoden für Lebensdauerprognosen

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wird im Folgenden eine Übersicht zu existierenden TL-Verfahren erstellt. Dazu wurde ein strukturiertes Literaturreview durchgeführt.

Forschungsmethodik

Mittels des Literaturreviews sollten TL-Methoden ermittelt werden, welche bereits zur Degradationsmodellierung angewendet wurden. Zur Ermittlung von Publikationen wurden die Bibliothek Google Scholar sowie das Suchwerkzeug Harzing's Publish or Perish verwendet /8/. Um viele Veröffentlichungen zu TL im Kontext der Lebensdauermodellierung zu erfassen, wurde der in Abbildung 2 dargestellte Suchstring verwendet.

Transfer Learning		Lifetime context
transfer learning OR tl	AND	life OR lifetime OR wear OR degradation OR failure OR aging OR ageing OR fatigue OR abrasion

Abbildung 2: Für das Review verwendeter Suchstring

Um relevante Beiträge zu extrahieren, wurden in einem ersten Schritt Titel und Abstracts anhand der in Tabelle 2 aufgeführten Ausschlusskriterien analysiert. Falls erforderlich, wurden die Volltexte quergelesen.

Tabelle 2: Ausschlusskriterien gefundener Beiträge

Nr.	Ausschlusskriterium
1.	Die Veröffentlichung befasst sich nicht mit TL zwecks Lebensdauermodellierung technischer Systeme gemäß Kapitel 1.1
2.	Die Veröffentlichung befasst sich nicht mit TL gemäß Kapitel 1.2
3.	Die Veröffentlichung wurde nicht fachlich geprüft / peer-reviewed
4.	Die Veröffentlichung kann nur kostenpflichtig über den Universitätszugang der TU Clausthal betrachtet werden
5.	TL wurde nicht tatsächlich angewendet, sondern es werden nur Konzepte oder theoretische Betrachtungen vorgestellt
6.	Das Paper wurde nicht in englischer Sprache verfasst
7.	Es handelt sich um ein Duplikat bzw. ein bereits betrachtetes Paper

Die auf diese Weise identifizierten Artikel wurden genauer untersucht und die gewonnenen Informationen zusammengefasst. Die Tabelle enthält Spalten zu Titel und Quelle der verbleibenden Publikationen, verwendeten TL-Methoden, betrachteten Anwendungsbeispielen, Datenanforderungen (besonders hinsichtlich Referenzsystemen) und zu vorgenommenen Leistungsbewertungen (insbesondere zur Genauigkeit der Prognose) der TL-Methoden. Um die Qualität der gefilterten Beiträge zu sichern, wurde ein Snowballing /9/ durchgeführt, um gegebene Annahmen und Informationen zu überprüfen.

Ergebnisse des Reviews

Mithilfe des Suchstrings wurden zunächst 297 Artikel identifiziert und anhand der Ausschlusskriterien gefiltert. Schließlich wurden 37 Artikel genauer analysiert und hinsichtlich verwendeter TL-Methoden, Anwendungsbeispielen, Anforderungen und der erzielten Prognoseergebnisse analysiert. Mithilfe der in einer Tabelle gesammelten Informationen wurde eine Übersicht zu vorhandenen TL-Methoden erstellt, wobei auch zwei Reviews /10, 11/ zur Lebensdauerprognose mittels TL berücksichtigt wurden. Abbildung 3 zeigt die aus /10 – 48/ ermittelte Architektur von TL Modellen zur Degradationsprognose, sowie eine Übersicht der in den reviewten Beiträgen genutzten Methoden zur Umsetzung einzelner Modellierungsabschnitte.

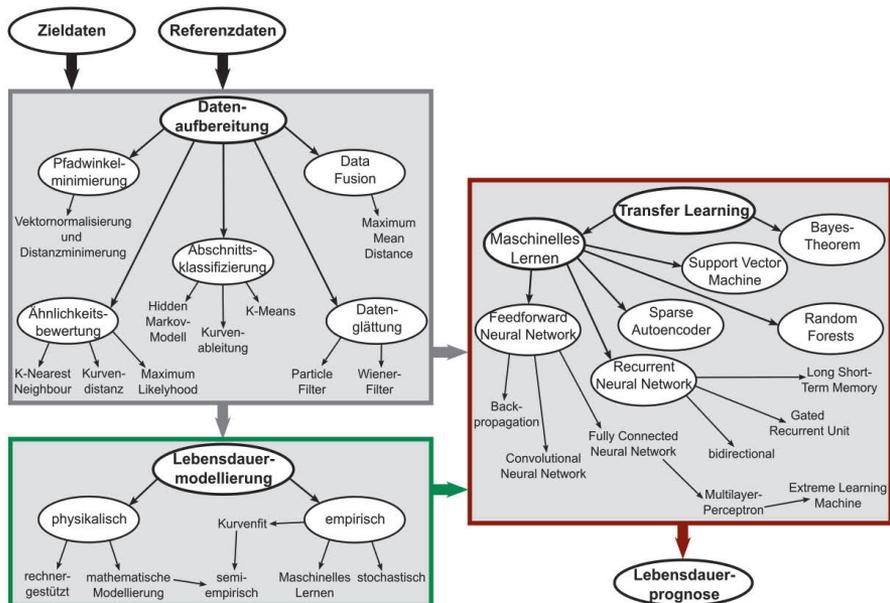


Abbildung 3: Ablauf und Verfahren TL-basierter Lebensdauermodelle /10 – 48/

TL-basierte Degradationsmodellierung wird dabei meistens anhand folgender Schritte ausgeführt:

1. Aufbereitung verfügbarer Referenzdaten, bspw. Glätten bzw. Filtern von Störsignalen oder statistischen Abweichungen. Teilweise erfolgt eine Auswahl möglichst ähnlicher Referenzdatensätze. Häufig wird eine weitere Anpassung der Daten derart vorgenommen, dass gemeinsame Eigenschaften mittels Algorithmen besser ermittelt werden können (z.B. Aufteilung von Daten in Abschnitte durch Klassifikation, Überlappung von Datensätzen/Data Fusion).
2. Erstellung von Degradations- und Lebensdauermodellen anhand der aufbereiteten Referenzdaten. Hierbei werden unterschiedliche Verfahren genutzt. Eine Beschreibung möglicher Verfahren ist in /3/ zu finden. In den gefundenen Beiträgen wurden häufig Verfahren des ML genutzt.
3. Anpassung erstellter Degradations- und Lebensdauermodelle mittels des in Kapitel 1 erläuterten TL-Konzeptes an das betrachtete Zielsystem. Dazu werden teilweise zusätzliche Referenzdaten genutzt. In den vorliegenden Beiträgen werden zudem in allen Fällen Lebensdauerinformationen des Zielsystems benötigt, diese können aber unvollständig sein und bspw. nur frühe Degradationsphasen umfassen.

Die in /10 – 48/ erfassten TL-Verfahren sind in Abbildung 3 in klassifizierter Form dargestellt. Es wurden fünf unterschiedliche Verfahren des ML angewendet, nämlich Feedforward Neural Networks (FFNN), Recurrent Neural Networks (RNN), Sparse Autoencoder (SAE), Support Vector Machines (SVM) und Random Forests. Dabei wurden RNN in verschiedenen Varianten angewendet, nämlich mit Long-Short Term Memory (LSTM RNN) oder als Gated Recurrent Unit (GRU), häufig mit bidirektionalem Informationsfluss. FFNN wurden zumeist mit Backpropagation von Informationen ausgeführt. Basierend auf FFNN wurden zudem Convolutional Neural Networks (CNN) und Fully Connected Neural Networks (FCNN) erstellt und erprobt. Außerdem fanden Sonderformen des FCNN, das Multilayer Perceptron (MLP) und daraus abgeleitete Extreme Learning Maschinen (ELM), Anwendung. Neben Verfahren des ML wurde zudem das Bayes Theorem als Grundlage von TL genutzt. Auch Hybridvarianten unterschiedlicher TL Verfahren wurden angewendet.

Weiterhin sind zwei Arten von Datengrundlagen zur Degradationsmodellierung zu unterscheiden, welche in betrachteten Beiträgen verwendet wurden:

- **Direkte Lebensdauerdaten:** Daten zu Referenz- und Zielsystemen enthalten Messwerte der Modellierungsgröße des Lebensdauermodells oder Größen, mit welchen diese berechnet werden kann (z.B. Restkapazität bei Batterien)
- **Indirekte Lebensdauerdaten:** Daten zu Referenz- und Zielsystemen enthalten Messwerte, mit denen lediglich auf die Modellierungsgröße des Degradations- oder Lebensdauermodells geschlossen wird (z.B. Schwingungsverhalten bei Kugellagerung)

Bei einer Modellierung anhand indirekter Lebensdauerdaten ist die Unsicherheit einer Degradationsprognose erhöht und die Erstellung präziser Modelle damit erschwert.

In Tabelle 3 sind die in den reviewten Beiträgen verwendeten TL Verfahren einschließlich Art der Datengrundlage und zugehöriger Quellen zusammengefasst. Weiterhin erfolgte eine Analyse und Bewertung der benötigten Menge an Referenzdaten und der Präzision der Degradationsvorhersage des angewendeten TL Verfahrens und der zugrundeliegenden Degradationsmodelle der Referenzsysteme.

Tabelle 3: Bewertung der Leistungsfähigkeit betrachteter TL-Methoden

Verwendete TL-Verfahren	Direkt/indirekt	Referenzdatenbedarf	Genauigkeit	Quellen
FFNN oder MLP	indirekt	mittel	niedrig bis mittel	/12 – 16/
ELM	direkt	mittel	mittel	/17/
CNN	indirekt	niedrig bis mittel	niedrig bis mittel	/18 – 22/
CNN und FCNN	indirekt	mittel	niedrig bis mittel	/23/
CNN und FCNN	direkt	hoch	niedrig bis mittel	/24, 25/
LSTM RNN	indirekt	mittel	niedrig bis mittel	/26, 27/
LSTM RNN	direkt	mittel bis hoch	hoch bis sehr hoch	/28 – 36/
GRU	indirekt	mittel	niedrig bis mittel	/37/
GRU	direkt	mittel	hoch bis sehr hoch	/38/
LSTM RNN und FCNN oder CNN	mittel	mittel	niedrig bis mittel	/39/
LSTM RNN und FCNN oder CNN	direkt	mittel	hoch bis sehr hoch	/40, 41/
GRU und FFNN	indirekt	mittel	niedrig bis mittel	/42/
CNN und LSTM	indirekt	niedrig	niedrig bis mittel	/43/
SAE	indirekt	hoch	niedrig bis mittel	/44/
SAE und LSTM RNN	indirekt	mittel	mittel?	/45/
RF	indirekt	mittel	mittel?	/46/
SVM	indirekt	mittel	mittel?	/47/
BT	direkt	mittel	hoch bis sehr hoch	/48/

Als Bewertungsgrundlage für die Datenanforderungen wurde definiert, dass ein Bedarf an Lebensdauerinformationen von maximal 20 Referenzsystemen als

„niedrig“ bewertet wird. Werden über 100 Referenzsysteme benötigt, ist der Datenbedarf „hoch“, ansonsten wird er als „mittel“ eingestuft. Befindet sich der Datenbedarf nahe den definierten Grenzwerten, wurde zudem keine eindeutige Bewertung vorgenommen und bspw. „niedrig bis mittel“ gewählt. Die Präzision der TL-Verfahren wurde daran bemessen, ob mit dem erstellten Degradationsmodell eine zuverlässige Prognose für das Zielsystem möglich ist. Verfehlen die in den Beiträgen dargestellten Ergebnisse die realen Lebensdauerdaten des Zielsystems mindestens zeitweise um über 30%, so ist die Genauigkeit „niedrig“, da dann nur eine unsichere Prognose möglich ist. Sind die Ergebnisse sehr nahe an den realen Daten und weichen selten um mehr als 5% ab, ist die Genauigkeit „hoch“ oder sogar „sehr hoch“, ansonsten „mittel“. Bei vielen Beiträgen variierte die Genauigkeit der TL-Verfahren bei variablen Einflussgrößen der Lebensdauer jedoch deutlich, sodass auch hier teils keine eindeutige Bewertung vorgenommen werden konnte. Zudem wurde in einigen Beiträgen die Genauigkeit der entwickelten TL-Verfahren nicht hinreichenden mit Ergebnissen belegt, sodass nur eine Bewertung unter Vorbehalt erfolgte, siehe /45 – 47/.

Zusammenfassung und Ausblick

Mittels des Reviews konnte eine umfangreiche Übersicht zu TL Verfahren für die Lebensdauermodellierung erstellt werden. Dabei wurden signifikante Unterschiede hinsichtlich der Genauigkeit betrachteter Verfahren erkannt, wenn direkte oder indirekte Lebensdauerdaten als Grundlage genutzt wurden, siehe Tabelle 3. Der Bedarf an Referenzdaten verschiedener TL Verfahren konnte ermittelt und bewertet werden, wobei zumeist weniger als 100 Datensätze benötigt wurden. Dennoch konnten Effizienzunterschiede bei den Verfahren festgestellt werden, wobei LSTM RNN, GRU und BT hier besonders vielversprechend erscheinen.

In weiterführenden Untersuchungen sollen TL Methoden ohne Nutzung von Zieldaten entwickelt und geprüft werden, da hier eine Forschungslücke gefunden wurde. Insbesondere die Integration einer geeigneten Ähnlichkeitsbewertung muss dabei betrachtet werden. Weiterhin sollen Modelverbesserungen durch die Integration in Digitale Zwillinge untersucht werden.

Literatur

- /1/ Umeda, Y.; Daimon, T.; Kondoh, S.: Life cycle option selection based on the difference of value and physical lifetimes for life cycle design. In: 16th International Conference on Engineering Design. 2007, Artikel-Nr. DS42_P_47. ISBN 1-904670-02-4
- /2/ Mcpherson, J.: Reliability Physics and Engineering. New York, Springer, 2010. DOI 10.1007/978-3-319-93683-3
- /3/ Bauer, R. S.; Inkermann, D.: Selection of model approaches and modelling methods for lifetime prognosis. In: Proceedings of the Design Society Vol. 3, 2023, S. 3125-3134. DOI 10.1017/pds.2023.313

- /4/ Inkermann, D.: Lifecycle option selection in early design stages based on degradation model evaluation. In: Proceedings of the Design Society Vol. 2, 2022, S. 475-484. DOI 10.1017/pds.2022.49
- /5/ Weiss, K.; Khoshgoftaar, T. M.; Wang, D.: A survey of transfer learning. In: Journal of Big Data Vol. 3, 2016, Artikel-Nr. 9. DOI 10.1186/s40537-016-0043-6
- /6/ Fernandes, K.; Cardoso J. S.: Hypothesis transfer learning based on structural model similarity. In: Neural Computing and Applications Vol. 31, 2019, S. 3417-3430. DOI 10.1007/s00521-017-3281-4
- /7/ Li, Z.; Kristoffersen, E.; Li, J.: Deep transfer learning for failure prediction across failure types. In: Computers & Industrial Engineering Vol. 172, Issue A, 2022, Artikel-Nr. 108521. DOI 10.1016/j.cie.2022.108521
- /8/ Harzing, A. W.: Publish or perish. <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>; 2007.
- /9/ Kitchenham, B.; Brereton, P.: A systematic review of systematic review process research in software engineering. In: Information and Software Technology Vol. 55, Issue 12, 2013, S. 2049–2075. DOI 10.1016/j.infsof.2013.07.010
- /10/ Lin, T. et al.: Investigating explainable transfer learning for battery lifetime prediction under state transitions. In: eScience Vol. 4, Issue 5, 2024, Artikel-Nr. 100280. DOI 10.1016/j.esci.2024.100280
- /11/ Liu, K. et al.: Transfer learning for battery smarter state estimation and ageing prognostics: Recent progress, challenges, and prospects. In: Advances in Applied Energy Vol. 9, 2023, Artikel-Nr. 100117. DOI 10.1016/j.adapen.2022.100117
- /12/ Zhu, J.; Chen, N.; Shen, C.: A new data-driven transferable remaining useful life prediction approach for bearing under different working conditions. In: Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 139, 2020, Artikel-Nr. 106602. DOI 10.1016/j.ymsp.2019.106602
- /13/ Ding, Y.; Jia, M.; Miao, Q.; Huang, P.: Remaining useful life estimation using deep metric transfer learning for kernel regression. In: Reliability Engineering & System Safety Vol. 212, 2021, Artikel-Nr. 107583. DOI 10.1016/j.res.2021.107583
- /14/ Siahpour, S.; Li, X.; Lee, J.: A novel transfer learning approach in remaining useful life prediction for incomplete dataset. In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 71, 2022, S. 1-11. DOI 10.1109/TIM.2022.3162283
- /15/ Li, Y.; Wie, P.; Xiang, G.; Jia, C.; Liu, H.: Gear contact fatigue life prediction based on transfer learning. In: International Journal of Fatigue Vol. 173, 2023, Artikel-Nr. 107686. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2023.107686
- /16/ Cheng, H. et al.: Remaining useful life prediction combined dynamic model with transfer learning under insufficient degradation data. In: Reliability Engineering & System Safety Vol. 236, 2023, Artikel-Nr. 109292. DOI 10.1016/j.res.2023.109292
- /17/ Gu, B.; Liu, Z.: Transfer learning-based remaining useful life prediction method for lithium-ion batteries considering individual differences. In: Applied Sciences Vol. 14, Issue 2, 2024, Artikel-Nr. 698. DOI 10.3390/app14020698
- /18/ Zhang, W.; Li, X.; Ma, H.; Luo, Z.; Li, X.: Transfer learning using deep representation regularization in remaining useful life prediction across operating conditions. In: Reliability Engineering & System Safety Vol. 211, 2021, Artikel-Nr. 107556. DOI 10.1016/j.res.2021.107556
- /19/ Cheng, H.; Kong, X.; Wang, Q.; Ma, H.; Yang, S.: The two-stage RUL prediction across operation conditions using deep transfer learning and insufficient degradation data. In: Reliability Engineering & System Safety Vol. 225, 2022, Artikel-Nr. 108581. DOI 10.1016/j.res.2022.108581

- /20/ Kamm, S. et al.: Simulation-to-reality based transfer learning for the failure analysis of SiC power transistors. In: IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2022, S. 1-8. DOI 10.1109/ETFA52439.2022.9921681
- /21/ Schwendemann, S.; Sikora, A.: Transfer-learning-based estimation of the remaining useful life of heterogeneous bearing types using low-frequency accelerometers. In: Journal of Imaging Vol. 9, 2023, Artikel-Nr. 34. DOI 10.3390/jimaging9020034
- /22/ Gao, Z.; Chen, N.; Yang, Y.; Li, L.: An innovative multisource lightweight adaptive replayed online deep transfer learning algorithm for tool wear monitoring. In: Journal of Manufacturing Processes Vol. 124, 2024, S. 261-281. DOI 10.1016/j.jmapro.2024.05.050
- /23/ Zhu, Q.; Zu, X.: Fully convolutional neural network structure and its loss function for image classification. In: IEEE Access Vol. 10, 2022, S. 35541-35549. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3163849
- /24/ Xiao, L. et al.: A transfer learning-based approach to fatigue life prediction of corroded bimetallic steel bars using small samples. In: Construction and Building Materials Vol. 400, 2023, Artikel-Nr. 132679. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.132679
- /25/ Zhou, C. et al.: Creep rupture life prediction of high-temperature titanium alloy using cross-material transfer learning. In: Journal of Materials Science & Technology Vol. 178, 2024, S. 39-47. DOI 10.1016/j.jmst.2023.08.046
- /26/ Zhang, A. et al.: Transfer learning with deep recurrent neural networks for remaining useful life estimation. In: Applied Sciences Vol. 8, 2018, Artikel-Nr. 2416. DOI 10.3390/app8122416
- /27/ Berghout, T.; Mouss, L.-H.; Bentracia, T.; Benbouzid, M.: A semi-supervised deep transfer learning approach for rolling-element bearing remaining useful life prediction. In: IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 37, Issue 2, 2022, S. 1200-1210. DOI 10.1109/TEC.2021.3116423
- /28/ Deng, Z.; Lin, X.; Cai, J.; Hu, X.: Battery health estimation with degradation pattern recognition and transfer learning. In: Journal of Power Sources Vol. 525, 2022, Artikel-Nr. 231027. DOI 10.1016/j.jpowsour.2022.231027
- /29/ Pan, D.; Li, H.; Wang, S.: Transfer learning-based hybrid remaining useful life prediction for lithium-ion batteries under different stresses. In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 71, 2022, S. 1-10. DOI 10.1109/TIM.2022.3142757
- /30/ Ma, J. et al.: A hybrid transfer learning scheme for remaining useful life prediction and cycle life test optimization of different formulation Li-ion power batteries. In: Applied Energy Vol. 282, Issue A, 2021, Artikel-Nr. 116167. DOI 10.1016/j.apenergy.2020.116167
- /31/ Chen, J.; Han, X.; Sun, T.; Zheng, Y.: Analysis and prediction of battery aging modes based on transfer learning. In: Applied Energy Vol. 356, 2024, Artikel-Nr. 122330. DOI 10.1016/j.apenergy.2023.122330
- /32/ Zhao, G.; Kang, Y.; Huang, P.; Duan, P.; Zhang, C.: Battery health prognostic using efficient and robust aging trajectory matching with ensemble deep transfer learning. In: Energy Vol. 282, 2023, Artikel-Nr. 128228. DOI 10.1016/j.energy.2023.128228
- /33/ Wang, Y.; Zhu, J.; Cao, L.; Gopaluni, B.; Cao, Y.: Long short-term memory network with transfer learning for lithium-ion battery capacity fade and cycle life prediction. In: Applied Energy Vol. 350, 2023, Artikel-Nr. 121660. DOI 10.1016/j.apenergy.2023.121660

- /34/ Chen, X. et al.: Transfer learning based remaining useful life prediction of lithium-ion battery considering capacity regeneration phenomenon. In: Journal of Energy Storage Vol. 76, 2024, Artikel-Nr. 109798. DOI 10.1016/j.est.2023.109798
- /35/ Li, Z.; Bai, F.; Zuo, H.; Zhang, Y.: Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on iterative transfer learning and mogrifier LSTM. In: Batteries Vol. 9, Issue 9, 2023, Artikel-Nr. 448. DOI 10.3390/batteries9090448
- /36/ Guo, Y.; Wang, Y.; Ding, P.; Huang, K.: Future degradation trajectory prediction of lithium-ion battery based on a three-step similarity evaluation criterion for battery selection and transfer learning. In: Journal of Energy Storage Vol. 72, Issue E, 2023, Artikel-Nr. 108763. DOI 10.1016/j.est.2023.108763
- /37/ Izadi, M. J.; Hassani, P.; Raeesi, M.; Ahmadi, P.: A novel WaveNet-GRU deep learning model for PEM fuel cells degradation prediction based on transfer learning. In: Energy Vol. 293, 2024, Artikel-Nr. 130602. DOI 10.1016/j.energy.2024.130602
- /38/ Ji, S.; Zhang, Z.; Stein, H. S.; Zhu, J.: Flexible health prognosis of battery nonlinear aging using temporal transfer learning. In: Applied Energy Vol. 377, Issue D, 2025, Artikel-Nr. 124766. DOI 10.1016/j.apenergy.2024.124766
- /39/ Park, S. H.; Park, K. S.: A pre-trained model selection for transfer learning of remaining useful life prediction of grinding wheel. Journal of Intelligent Manufacturing Vol. 35, S. 2295–2312. DOI 10.1007/s10845-023-02154-9
- /40/ Kim, J.; Han, D.; Lee, P.-Y.; Kim, J.: Transfer learning applying electrochemical degradation indicator combined with long short-term memory network for flexible battery state-of-health estimation. In: eTransportation Vol. 18, 2023, Artikel-Nr. 100293. DOI 10.1016/j.etrans.2023.100293
- /41/ Zhang, C.; Du, J.; Li, S.; Zhang, L.; Zhang, W.: Cross-domain machine transfer learning for capacity aging trajectory prediction of lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources Vol. 624, 2024, Artikel-Nr. 235534. DOI 10.1016/j.jpowsour.2024.235534
- /42/ Cao, Y.; Jia, M.; Ding, P.; Ding, Y.: Transfer learning for remaining useful life prediction of multi-conditions bearings based on bidirectional-GRU network. In: Measurement Vol. 178, 2021, Artikel-Nr. 109287. DOI 10.1016/j.measurement.2021.109287
- /43/ Yue, M.; Benagoune, K.; Meng, J.; Diallo, D.: Implementation of an early stage fuel cell degradation prediction digital twin based on transfer learning. In: IEEE Transactions on Transportation Electrification Vol. 9, Issue 2, S. 3308-3318. DOI 10.1109/TTE.2022.3229716
- /44/ Sun, C. et al.: Deep transfer learning based on sparse autoencoder for remaining useful life prediction of tool in manufacturing. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics Vol. 15, Issue 4, S. 2416-2425. DOI 10.1109/TII.2018.2881543
- /45/ Ma, J. et al.: Degradation prognosis for proton exchange membrane fuel cell based on hybrid transfer learning and intercell differences. In: ISA Transactions Vol. 113, 2021, S. 149-165. DOI 10.1016/j.isatra.2020.06.005
- /46/ Fan, Y.; Nowaczyk, S.; Rögnvaldsson, T.: Transfer learning for remaining useful life prediction based on consensus self-organizing models. In: Reliability Engineering & System Safety Vol. 203, 2020, Artikel-Nr. 107098. DOI 10.1016/j.res.2020.107098
- /47/ Han, X. et al.: Online transfer learning-based method for predicting remaining useful life of aero-engines. In: 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing, 2022, S. 865-870. DOI 10.1109/ICSP54964.2022.9778844
- /48/ Zhou, Z.; Liu, Y.; You, M.; Xiong, R.; Zhou, X.: Two-stage aging trajectory prediction of LFP lithium-ion battery based on transfer learning with the cycle life prediction. In: Green Energy and Intelligent Transportation Vol. 1, Issue 1, 2022, Artikel-Nr. 100008. DOI 10.1016/j.geits.2022.100008

LifeLab – Lernumgebung für die zirkuläre Produktentstehung am Institut für Maschinenwesen

Breidoehr, M.; Inkermann, D.

Mit dem „LifeLab Circular Product Creation“ entsteht am Institut für Maschinenwesen, unter dem Leitthema „Circular Economy“ eine innovative Lernumgebung, um Studierenden praxisorientiertes Wissen für die zirkuläre Produktentstehung zu vermitteln. Durch die Integration von Theorie und Praxis wird an verschiedenen Lernstationen der praktische Einsatz digitaler Technologien für verschiedene Aufgaben in der zirkulären Produktentstehung gefördert. Ziel ist es, Studierende auszubilden, indem kompetenzorientiert Wissen und Fähigkeiten in der zirkulären Produktgestaltung vermittelt werden.



With the “LifeLab Circular Product Creation”, an innovative learning environment is being created at the Institute of Mechanical Engineering under the guiding theme of “Circular Economy”. It provides students with practice-oriented knowledge for circular product creation. By integrating theory and practice, the practical use of digital technologies for various tasks in circular product creation is promoted at various learning stations. The aim is to train students by imparting competence-oriented knowledge and skills in circular product design.

LifeLab Circular Product Creation am Institut für Maschinenwesen

Inmitten der wachsenden globalen Herausforderungen im Umgang mit Ressourcen und Abfallvermeidung leistet auch das Institut für Maschinenwesen mit der Lernumgebung „LifeLab Circular Product Creation“ einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung und Forschung im Kontext der Kreislaufwirtschaft. Das LifeLab fungiert als eine Plattform für Studierende und Forscher:innen, mit dem Ziel, Studierenden praxisorientiertes Wissen und entscheidende Fähigkeiten im Rahmen der zirkulären Produktgestaltung zu vermitteln. Die Lernumgebung greift das etablierte Konzept von Lernfabriken als pädagogisches Konzept /1/ auf, und stellt eine realitätsnahe Umgebung dar um Teilnehmern praxisnahes Wissen zu vermitteln, das direkt auf industrielle Anwendungen übertragbar ist. Durch die zukünftige Integration der Lernumgebung in Lehrveranstaltungen werden zukünftige Ingenieure auf die Herausforderungen der nachhaltigen Produktentstehung vorbereitet. In der Transformation hin zur zirkulären Produktentstehung sind Lernumgebungen von entscheidender Bedeutung, um praxisorientiertes Lernen und interorganisationalen Wissensaustausch zu fördern, was wesentlich zur Integration von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in bestehende Geschäftsstrategien beiträgt /2/.

Inhaltliche Ausrichtung des LifeLabs CPC

Gängige Ansätze zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit im Produktdesign sind die Konzentration auf Ökodesign-Richtlinien sowie das Design zirkulärer Produkte. Das Gesamtkonzept zielt darauf ab, Produkte so zu gestalten, dass Komponenten mit geringem Aufwand ausgetauscht, wiederaufbereitet und wiederverwendet und Materialien leicht recycelt werden können. Das Konzept der zirkulären Produktentwicklung hingegen zielt darauf ab, gebrauchte Komponenten in die Entwicklung und Produktion neuer Produktgenerationen zu integrieren. Durch die Integration gebrauchter Komponenten in neue Produktgenerationen werden Material und Ressourcen eingespart. Gleichzeitig verändert sich die Entwicklung vom *Design für X* (vorausschauendes Design) zum *Design mit schlecht spezifizierten Komponenten* (reaktives Design). Die Unsicherheiten in den Spezifikationen resultieren aus einer hohen Variabilität der geometrischen Eigenschaften sowie der Leistungseigenschaften der verwendeten Komponenten. Dies erfordert eine hohe Flexibilität sowohl in der Produktgestaltung als auch in der Fertigung sowie einen geschlossenen Informations- und Datenaustausch zwischen den verschiedenen Prozessen der Produktentstehung. Ziel des LifeLab Circular Product Creation ist es, diese Wechselwirkungen zu verdeutlichen und Lösungen aufzuzeigen, wie eine zirkuläre Produktentstehung umgesetzt werden kann.

Zweck des LifeLabs CPC

Die Integration gebrauchter Bauteile, wie bspw. Batterien oder Elektromotoren, in neue Produktgenerationen ist mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden, wie bspw. einer Vielzahl von Geometrievarianten sowie unterschiedlichen funktionalen Eigenschaften der Bauteile. Im LifeLab CPC werden diese Herausforderungen durch die Bereitstellung einer Produktplattform, siehe Abbildung 1, und verschiedener Lernstationen adressiert, die die Aufgaben Reverse Engineering, Prozessplanung, CAD-CAM, additive Fertigung sowie Montageplanung und Montageunterstützung repräsentieren. Diese Lernstationen stellen wesentliche Aufgaben innerhalb des zirkulären Produktentstehungsprozesses dar. Der Zweck des LifeLabs besteht darin, die zentralen Herausforderungen der zirkulären Produktentstehung zu adressieren, wobei der Schwerpunkt auf den folgenden Zielen liegt:

- Aufzeigen von Lösungen zur Umsetzung der Circular Economy mit Fokus auf die Wiederverwendung von Komponenten in neuen Produktgenerationen
- Vermittlung der notwendigen Kenntnisse, Methoden und Werkzeuge zur Durchführung der einzelnen Prozessschritte zur Generierung neuer Produktgenerationen auf Basis wiederverwendeter Komponenten
- die Abhängigkeiten und den notwendigen Informationsaustausch zwischen den einzelnen Prozessschritten aufzuzeigen und greifbar zu machen, um die erforderliche Flexibilität zu gewährleisten

Diesen Zielen folgend, bietet das LifeLab CPC den Studierenden die Möglichkeit, theoretisches Wissen über die Prinzipien und Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung einer zirkulären Produktentstehung zu erlangen. Um der inhärenten Komplexität der zirkulären Produktentstehung gerecht zu werden, verfolgt das Konzept einen schrittweisen Ansatz, der sich zunächst auf die einzelnen Lernschritte und in einem zweiten Schritt auf deren Zusammenspiel konzentriert.

Der Kern des LifeLab: Die Gestaltung der zirkulären Produktentstehung

Die Lernumgebung soll Rahmen der Veranstaltungen „Rechnerintegrierte Fertigung“ und „Rechnerintegrierte Produktentwicklung“ eingesetzt werden. Das Produkt, das zur Demonstration der verschiedenen Prozessschritte und ihrer Interaktionen verwendet wird, ist die in Abbildung 1 dargestellte Produktplattform eines Rovers.

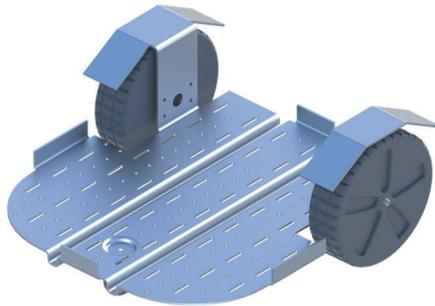


Abbildung 1: Produktplattform des Rovers

Die Produktplattform des Rovers wird im Rahmen der Lernfabrik vervollständigt, sodass ein fahrtüchtiger Rover entsteht. Die Plattform bestehend aus einem ungeformten Lochblech und drei Rädern. Zur Vervollständigung werden Varianten von gebrauchten Motoren vorgegeben, welche durch die Anwender der Lernfabrik integriert werden sollen. Durch die Verwendung der Elektromotoren sollen die realitätsgetreuen Herausforderungen nachgebildet werden, die bei der Integration von gebrauchten Komponenten in neuen Produktgenerationen entstehen. Die Produktplattform durchläuft im Rahmen der Lernfabrik mehrere Lernstationen.

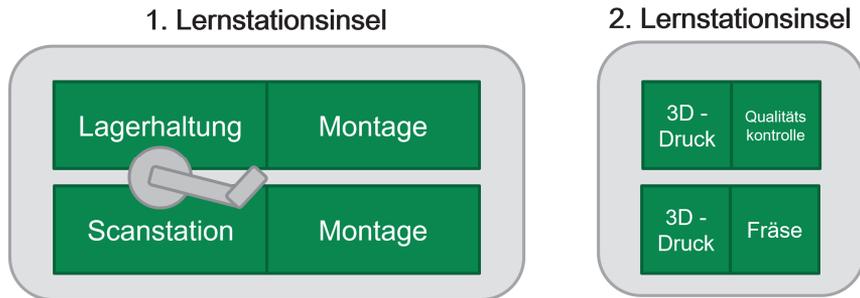


Abbildung 2: Aufteilung der Lernstation durch zwei Lernstationsinseln

Die Lernfabrik besteht aus zwei Lernstationsinseln, siehe auch Abbildung 3. Die erste Lernstationsinsel ist mit einem kollaborativen Roboterarm ausgestattet der auf der Titelseite des Artikels dargestellt ist. Des Weiteren sind zwei Montageplätze, eine Scannerstation und eine Lagerstation vorgesehen. Die Montagestationen werden durch Monitore ergänzt, wodurch eine computergestützte assistierte Montage ermöglicht wird. Die Scanstation identifiziert mit drei Tiefenkameras gebrauchte Bauteile, welche anschließend vom Roboterarm in die Lagerstation befördert werden. Die zweite Lernstationsinsel umfasst zwei 3D-Drucken sowie eine Station für die Qualitätssicherung der gedruckten Bauteile. Die Station „Fräse“ umfasst eine Spannvorrichtung um Rohlinge, ähnlich wie in einer CNC-Fräse einzuspannen. Der Bearbeitungsprozess des Rohlings wird mithilfe einer Argument-Reality-Brille simuliert.

Die Lernumgebung: Ein innovatives Lernkonzept

Die Grundlage jeder Lernstation bildet eine Lernprozesskarte. Diese dienen dem Anwender der Lernstationen als Hilfsmittel für die Nutzung der jeweiligen Lernstation. Die Lernprozesskarte enthält neben einer ausführlichen Beschreibung der Lernstation, Lernziele, Lernzielüberprüfungen, Arbeitsabläufe und weiterführende Literatur. Im LifeLab arbeiten die Studierenden in Gruppen an verschiedenen Stationen der Lernfabrik, die industrielle Aufgabenfelder wie Fertigung, Montage und Produktionsplanung widerspiegeln. An diesen Stationen werden sie mit realen Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft konfrontiert und erlernen praxisnahe Lösungsansätze, um auch bei schwankenden Komponentenangeboten konstante Produktergebnisse zu erzielen. Das LifeLab stützt sich auf eine mehrschichtige Lernstrategie, um Studierenden sowohl theoretisches Wissen als auch praktische Erfahrungen zu bieten. Im Rahmen der Lernumgebung gibt es folgende Lernstationen, die sich an den Lernprozesskarten orientieren:

- **CAD-CAM-Prozessplanung:** Dieses Expertenteam fokussiert sich auf die Entwicklung und Implementierung von Computer-Aided Design und Computer-Aided Manufacturing Prozessen. Studierende lernen, wie sie CAD-Modelle erstellen und diese in CAM-Systemen zur Programmierung von Maschinenabläufen nutzen, um die Herstellung von Bauteilen effizient zu gestalten.
- **Digitale Produktionsplanung:** Hier wird die digitale Planung und Kontrolle von Produktionsabläufen im industriellen Kontext vermittelt. Die Studierenden sind gefordert, Produktionsressourcen zu organisieren und Prozesse zu optimieren, um eine ressourcenschonende und wirtschaftliche Fertigung sicherzustellen.
- **Montageplanung und assistierte Montage:** Diese Station bietet Einblicke in die strategische Planung von Montagevorgängen sowie in Techniken zur Unterstützung und Automatisierung der Montage von komplexen Baugruppen.
- **Additive Fertigung und Qualitätssicherung:** An dieser Station erlernen Studierende die Prinzipien der additiven Fertigungstechniken, insbesondere FDM, und deren Anwendung zur Herstellung von Komponenten. Ein gleichzeitiger Fokus liegt auf der Entwicklung und Implementierung von Qualitätssicherungsmaßnahmen, um die Einhaltung von Designanforderungen und Toleranzen sicherzustellen.

Die Lernumgebung, die die Integration gebrauchter Komponenten in neue Produktgenerationen praxisnah darstellt, wird mit vier Teilnehmergruppen betrieben. Diese Gruppen bekommen jeweils eine Lernprozesskarte und arbeiten an einer der genannten Lernstationen. Für den Betrieb der Lernumgebung ist die Teilnahme von mindestens zwölf Studierenden erforderlich, die sich nach dem Studium der theoretischen Grundlagen in Expertenteams aufteilen. Diese Teams spezialisieren sich auf unterschiedliche Themen, damit ein umfassendes Verständnis der jeweiligen Prozesse erlangt wird. Der Betrieb der Lernumgebung wird durch den Einsatz von Lernprozesskarten organisiert, die den Studierenden helfen, spezifische Lernziele zu erreichen und praktische Fähigkeiten zu erwerben. Ein Beispiel für die praktische Anwendung ist das Kennenlernen der additiven Fertigung durch die Nutzung von 3D-Druckern. Ziel ist es, den Studierenden die Kompetenzen zu vermitteln, die benötigt werden, um die Herausforderungen nachhaltiger Produktionsprozesse zu bewältigen und innovative, ökologisch verträgliche Lösungen zu entwickeln. Die Tische der Lernstationen sind mit Nuten versehen, sodass ein flexibler Aufbau der Lernstationen gewährleistet wird. Das LifeLab wird ein vollständiges, detailliertes CAD-Modell erstellt. Diese CAD-Modelle bilden die Grundlage für weiterführende Forschungsaktivitäten. Das Fernziel ist dabei die Lernumgebung als Digitalen Zwilling abzubilden. In Abbildung 3 sind die zwei Lernstationsinsel der Lernfabrik als CAD-Modell dargestellt.

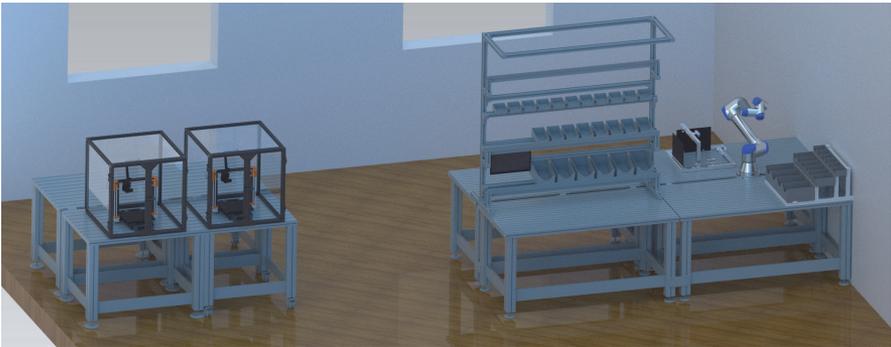


Abbildung 3: CAD-Modell der Tische der Lernstationen

Diese digitale Abbildung ermöglicht es in weiteren Forschungsarbeiten, reale Produktionsprozesse und Produktentwicklungen virtuell zu simulieren, wodurch Studierende und Forschende in Echtzeit auf verschiedene Szenarien und Variablen reagieren können. Der digitale Zwilling dient nicht nur als didaktisches Instrument, sondern auch als Plattform für die Erprobung neuer Technologien und Methoden im Kontext der Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus bietet er die Möglichkeit, Daten in einem kontrollierten Umfeld zu sammeln und zu analysieren, welche die Entwicklung innovativer Lösungen zur Integration gebrauchter Komponenten in neue Produktgenerationen fördert. Dieses flexible und erweiterbare Modell des LifeLabs steht für kollaborative Projekte offen und lädt zur kontinuierlichen Erforschung und Optimierung von Produktions- und Planungsprozessen ein.

Zusammenfassung

Das Projekt LifeLab steht am Anfang seiner Umsetzung und ist darauf ausgelegt, zu Beginn des Sommersemester 2025 seinen Betrieb aufzunehmen. Die nächsten Schritte umfassen die detaillierte Ausarbeitung der physischen Infrastruktur der einzelnen Lernstationen sowie die Durchführung erster Testszenarien mit Studierenden. Das Ziel ist die optimale Lehrbetriebskonzeption für die Lernumgebung, um die zukünftigen Ingenieure auf eine innovative und nachhaltige Weise auszubilden.

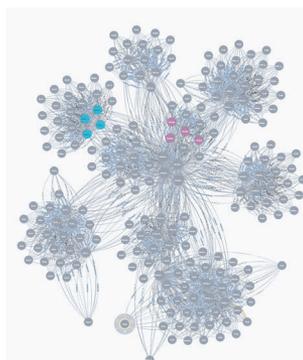
Literatur

- /1/ Tisch, M.; Ranz, F.; Abele E.; Metternich J.; Hummel, V.: „Learning Factory Morphology – Study Of Form And Structure Of An Innovative Learning Approach In The Manufacturing Domain“, *Turkish Online Journal of Educational Technology*, Bd. Special Issue, S. 356–363, Aug. 2015
- /2/ Mogos, M.; Vildåsen, S.; Sørumsbren-Den, J.; Powell, D.: „Rethinking Circular Business Models: The Role of the Learning Factory“, Sep. 2021

Wiederverwendung von SysML Modellen durch die Nutzung von Wissensgraphen

Stephan, R.; Inkermann, D.

Die zunehmende Verbreitung von MBSE wirft die Frage auf, wie das in verschiedenen SysML-Modellen enthaltene Wissen im Verlauf von Entwicklungsprojekten und projektübergreifend wiederverwendet werden kann. Wissensgraphen können auf Grund ihrer Eigenschaften für die Steigerung der Wissens- und Modellwiederverwendung verwendet werden.



The increasing spread of MBSE raises the question of how to reuse the knowledge contained in different SysML models in the course of development projects as well as across projects. Due to their properties, knowledge graphs can be used to increase knowledge and model reuse.

Einführung und Problemstellung

Bei der Verwendung von Model-based Systems Engineering (MBSE) entstehen in frühen Entwicklungsphasen umfangreiche Systemmodelle mit einem vergleichsweise hohen Formalisierungsgrad /1/. Wesentliche Zielsetzung dieser Systemmodelle ist die Integration unterschiedlicher Sichten auf das zu entwickelnde System sowie die Vernetzung von einzelnen Modellelementen /2, 3/. Bei Anwendung von MBSE ergeben sich Herausforderungen, welche sich anhand des Modelllebenszyklus der SysML-Modelle einordnen lassen. Für die Modellerstellung entwickeln unterschiedliche Abteilungen im Unternehmen unterschiedliche SysML-Modelle in variierender Qualität. So entstehen bereits früh variierende Modelle, da keine standardisierten Regeln für die Anwendung der Modellierungssprache SysML existieren /3, 4, 5/. Dies führt zu Problemen bei der Kombination oder Wiederverwendung von Modellen. In der Nutzungsphase der Modelle fehlt oft die Darstellung von konzeptionellem, prozeduralem oder metakognitivem Wissen wie Designprinzipien und -ansätze oder Entwicklungsstrategien /2/. Hinzukommt, dass Entwickelnde oft keine tiefreichende Erfahrung im MBSE-Umfeld haben und somit Schwierigkeiten haben, mit formellen Modellen zu arbeiten /2, 3, 6/. Die Wiederverwendung von Modellen ist insbesondere in frühen Entwurfsphasen nur unzureichend unterstützt /6/. Somit geht MBSE-spezifisches Wissen häufig zwischen Projekten verloren /7/. Wissensgraphen können hierbei als zentrale Wissensbasis zusammengefasster SysML-Modelle einen erheblichen Mehrwert für die Wiederverwendung von Modellen bieten.

Zielsetzung des Forschungsthemas

Ziel des Forschungsthemas ist es, den Nutzen für die Wiederverwendung von SysML-Modellen durch die Anwendung von Wissensgraphen als Wissensbasis in Entwicklungsprojekten zu demonstrieren. Dabei soll der Wissensgraph sowohl als Grundlage und Erweiterung einer Wissensbasis durch die Integration neuer SysML-Modelle sowie auch als Ausgangspunkt für die Wiederverwendung von Modellen dienen. Es soll ermöglicht werden, integrierte Modelle analysieren zu können und Fragmente bedarfsbedingt in neue SysML-Modelle exportieren zu können. Dafür wurde zunächst auf bestehende Anwendungen von Wissensgraphen im MBSE-Umfeld zurückgegriffen um im zweiten Schritt in einer Case-Study die Wiederverwendung von Wissen aus der Integration von zwei SysML-Modellen zu demonstrieren.

Anwendung von Wissensgraphen im MBSE-Umfeld

Wissensgraphen wurden bereits im MBSE-Umfeld für unterschiedliche Zwecke verwendet. So wurden z.B. Architekturmodelle analysiert und Fehler wie fehlende erfüllte oder verifizierte Beziehungen für eine Anforderung innerhalb des transformierten SysML-Modells identifiziert /8/. Ein weiterer Anwendungsfall konzentrierte sich auf die Robustheit des SysML-Modells, wobei Fehler in der Konzeptionsphase mittels Ursachenanalyse identifiziert wurden /9/. Erste Umsetzungen für die Modellwiederverwendung im Allgemeinen sind zusätzlich bereits realisiert worden. Dafür wurden einige SysML-Elemente in eine Wissensgraphen transformiert und integriert, um die effiziente Wiederverwendung über Produkte hinweg zu unterstützen. Eine Transformation und Integration von SysML-Modellen in den frühen Phasen eines Entwicklungs-prozesses für die effiziente Wiederverwendung von bereits existierenden Modellierungslösungen steht noch aus. Zusätzlich werden für die Wiederverwendung Methoden benötigt, die eine strukturierte und zielgerichtete Verwendung des Wissensgraphen sicherstellen.

Konzeptdarstellung und Case-Study der Umsetzung SysML2KG

Das vollständige Konzept zur Transformation, Integration, Analyse und Wiederverwendung von SysML-Modellen ist in Abbildung 1 dargestellt. Ausgangslage sind unterschiedliche SysML-Modelle mit variierender Qualität. Dies umfasst unvollständige, fehlerhafte Modell sowie Modelle mit unterschiedlichen Bezeichnungen der gleichen Komponente. Nach Export der Modelle im XMI-Format sollen diese unter Einbeziehung einer für die Modelle erstellten Ontologie integriert und als Wissensgraph gespeichert. Bei Vorliegen von stark variierenden Modellinhalten soll dies durch die Verwendung von Methoden des Ontology Matching und der Entity Resolution erfolgen. Zusätzlich zu der einmaligen Integration mehrere SysML-Modelle soll zusätzlich die Funktion vorhanden sein, den Wissensgraph kontinuierlich durch neue Modelle erweitert zu können. So kann eine Erweiterung der Wissensbasis z.B. um neu realisierte Funktionen gegeben werden.

Der erstellte Wissensgraph soll anschließend mittels der Anwendung entwickelter und geeigneter Methoden analysiert werden. Durch die Anwendung der Methoden soll die Möglichkeit bestehen, neues Wissen aus dem Graphen ableiten zu können. So kann beispielsweise nach Komponenten oder Schnittstellen & -typen gesucht werden. Die Analyse des vollständigen Graphen z.B. die Anzahl an Knoten eines bestimmten Typen, soll zusätzlich ermöglicht werden. Schließlich dient der Wissensgraph als Basis für die Ableitung neuer SysML-Modelle für neue Projekte.

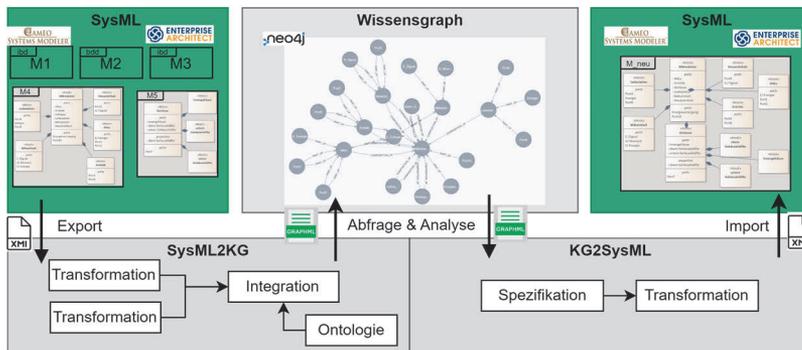


Abbildung 1: Konzeptdarstellung der SysML2KG & KG2SysML Pipeline

Im Zug einer ersten Case Study zur Umsetzung des Konzeptes wurden zwei Modelle (ibd- und bdd Modell) mit jeweils unterschiedlichen Informationen über die Anzahl der Komponenten (Sensoren, unteres Gehäuse, oberes Gehäuse, inneres Gehäuse nur einmal vorhanden) und unterschiedlicher Anzahl der Schnittstellen zwischen dem Rasenmäher-Roboter und der Umgebung verwendet. Ziel der Case Study ist es, Information über die Schnittstellen des Rasenmäher-Roboters zu erhalten, um in einem weiteren Projekt ein neues bdd-Diagramm zu modellieren. Die Diagramme wurden im XML-Format exportiert und mittels dem Python-Package „xml.etree.ElementTree“ analysiert. Relevante Informationen, visualisiert in Abbildung 3 und abhängig vom Diagrammtyp, wurden extrahiert und im nächsten

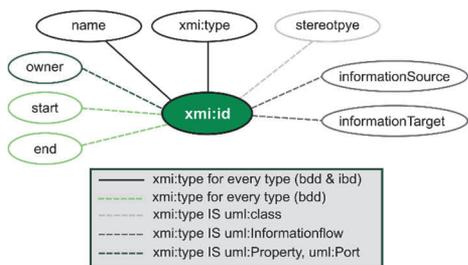


Abbildung 3: Extrahierte Datenpunkte aus dem SysML-Modell

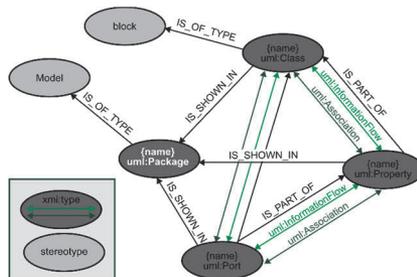


Abbildung 2: Ontologie für ibd und bdd-Diagramme

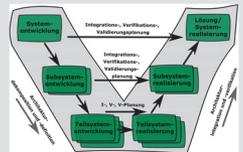
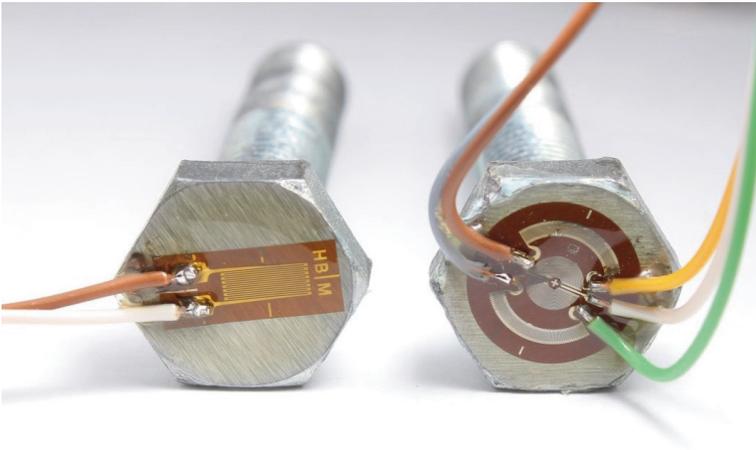
Schritt unter der Anwendung der entwickelten Ontologie, erkennbar in Abbildung 2, integriert. Im letzten Schritt wurden die Informationen per API in eine Neo4j Datenbank übertragen und anschließend als Wissensgraphen visualisiert. Über die Abfragesprache Cypher konnte anschließend die Anzahl der Schnittstellen festgestellt werden. Das Ergebnis der Abfrage zeigt, dass insgesamt vier Schnittstellen des Mähroboters ('Boden', 'Energieversorgung', 'Satellit' und 'Smartphone') vorhanden sind. Diese Information konnte im Vergleich nicht über eine einfache Anfrage aus den jeweiligen Ausgangsmodellen erhalten werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Integration von einem internen Blockdiagramm (ibd) und einem Blockdefinitions-Diagramm (bdd) und anschließender Abfrage des Wissensgraphen konnte Wissen, welches in keinem der beiden SysML-Modelle isoliert vorhanden war, als Ergebnis erhalten werden. Dafür wurde die Transformation und Integration der ibd und bdd-Diagrammen zunächst konzeptionell skizziert und anschließend in einem ersten Beispiel demonstriert. Im nächsten Schritt ist die Ontologie auf weitere Diagrammtypen zu erweitern und die Retransformation von Teilgraphen der Wissensbasis zu realisieren. Eine Vertiefung des Forschungsthemas in Kooperation mit Praxispartner und Hochschulpartnern ist im Zuge eines Transferprojekts für das kommende Jahr geplant.

Literatur

- /1/ Ramos, A.L., Ferreira, J.V., Barcelo, J.: 2012. Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems. *IEEE Trans. Syst., Man*, 101–111.
- /2/ Younse, P.J., Cameron, J.E., Bradley, T.H.: 2021. Comparative analysis of a model-based systems engineering approach to a traditional system engineering approach. *Systems Engineering* 24, 177–199.
- /3/ Madni, A.M., Sievers, M.: 2018. Model-based systems engineering: Motivation, current status, and research opportunities. *Systems Engineering* 21, 172–190.
- /4/ Berschik, M.C., Schumacher, T., Laukotka, F.N., Krause, D., Inkermann, D.: 2023. MBSE WITHIN THE ENGINEERING DESIGN COMMUNITY – AN EXPLORATORY STUDY. *Proc. Des. Soc.* 3, 2595–2604.
- /5/ Boggero, L., Ciampa, P.D., Nagel, B.: 2021. An MBSE Architectural Framework for the Agile Definition of System Stakeholders, Needs and Requirements, in: *AIAA AVIATION 2021 FORUM*.
- /6/ International Council on Systems Engineering (INCOSE), 2021. *Systems Engineering Vision 2035*.
- /7/ Bayer, T.: 2018. Is MBSE helping? Measuring value on Europa Clipper, in: *2018 IEEE Aerospace Conference*. pp. 1–13.
- /8/ Schummer, F., Hyba, M.: 2022. An Approach for System Analysis with MBSE and Graph Data Engineering.
- /9/ Faheem, F., Li, Z., Husung, S.: 2023. Analysis of potential errors in technical products by combining knowledge graphs with MBSE approach. *Engineering for a changing world: Proceedings : 60th ISC Ilmenau Scientific Colloquium, 2023*.



Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik



Effizienter, schneller und flexibler Druckkammprüfstand

Heinrich, C.; Lohrengel, A.

Am IMW wurde ein neuer Druckkammprüfstand mit Fokus auf Grundlagenuntersuchungen im Langlaufbetrieb aufgebaut.

A new thrust collar test rig was built at the IMW focusing on fundamental research on operation over high revolution numbers.



Ausgangslage

Bisher wurden am IMW Versuche zum Versagensverhalten von Druckkamm-lagerungen mit dem in /1/ vorgestellten Prüfstand durchgeführt, dessen makroskopische Prüflingsabmessungen einem Full Scale-Verdichter mit einer Leistung im zweistelligen Megawatt-Bereich entsprechen. Der Prüfstand wurde primär für Anfahrversuche entwickelt, und ist dementsprechend stark motorisiert und im niedrigen Drehzahlbereich dauerhaft betreibbar. Diese Vorteile Realismus und Langsamlaufvermögen sind in anderen Forschungsfragen nachteilig: Für Grundlagenuntersuchungen sind die Prüflinge unnötig groß; der Energiebedarf, um solch große Prüflinge adäquat belastet zu betreiben, ist so hoch, dass Langlaufversuche schwer tragbare Kosten bedeuten. Weiterhin ist die Maximaldrehzahl eingeschränkt, so dass Langlaufversuche einen hohen Zeitbedarf mit sich bringen. Aus diesen Gründen wurde ein neuer, kleinerer Prüfstand gebaut.

Prüfprinzipien

Das bewährte Prüfprinzip von zwei fliegend gelagerten, und somit einfach zu wechselnden, axial gegeneinander verspannten Prüflingen wird für den neuen Prüfstand beibehalten. Neben dem eingangs beschriebenen IMW-Prüfstand wurde diese Bauform auch von /2/ gewählt. Weiterhin bekannt ist als Prüfprinzip für Schädigungsversuche der Einbau von Druckkammprüflingen in Gesamtgetriebe /3,4/. Das IMW betreibt lediglich für Versuche zum Systemverhalten ein Gesamtgetriebe /5/, was auch in /6/ umgesetzt wurde. Eine weitere bekannte Druckkammprüfstandbauform ist der Betrieb von isolierten Druckkammprüflingen klassisch zwischen zwei Lagern /7/, dieser Prüfstand wird aber ebenfalls primär für nicht schädigende Versuche eingesetzt.

Neuer Prüfstand

Die Prüflingsmasse ist beim neuen Prüfstand eine Größenordnung geringer, der Energiebedarf pro Überrollung ist zwei Größenordnung geringer, und die Prüfgeschwindigkeit ist – unter Berücksichtigung von nunmehr zwei parallelen Prüfsträngen – eine Größenordnung höher als beim vorherigen. Der Prüfstand ist in Abbildung 1 und 2 dargestellt.

Die Verspannung erfolgt mit einer weichen Feder, deren Federsteifigkeit auf einer Zug-Druckprüfmaschine bestimmt wurde. Über ein Gewinde kann ein gewünschter Verspannweg eingestellt werden. Der Antrieb erfolgt über einen Doppelzahnriementrieb, wobei das Schlupfverhältnis frei über die Wahl der Riemenscheiben eingestellt werden kann. Protokolliert und als Abschaltkriterium benutzt werden die Schwingung der axial verschieblichen Welle, die Lauffächentemperatur (Infrarotthermometer), die Öleinspritztemperatur (Widerstandsthermometer) und die Überrollungszahl. Die Öleinspritzung erfolgt direkt in den Eingriff; das Öl kann temperiert werden.

Durch den Aufbau bestehend aus Stehlagern auf einem Nutenbett kann der Prüfstand flexibel für neue Forschungsfragen rekonfiguriert werden. So ist bspw. der Achsabstand variabel; anstelle des Riementriebs kann auch jede Welle direkt vom Motor angetrieben werden. Aufgrund dieser Flexibilität wird in Tabelle 1 zwischen der aktuell für grundlegende Schädigungsversuche gefahrenen Standardkonfiguration und der Maximalkonfiguration unterschieden.

Tabelle 1: Technische Daten

	Standardkonfig.	maximal
max. Axialkraft [kN]	20	30
Drehzahl ax. feste Welle [min ⁻¹]	3000	6700
Drehzahl verschiebl. Welle [min ⁻¹]	4500	6700
Schlupf	20%	∞
Antriebsleistung [kW]	2x 7,5	
Achsabstand [mm]	110	500
Prüflingsinnendurchmesser [mm]	75	
Prüflingsdicke [mm]	40	

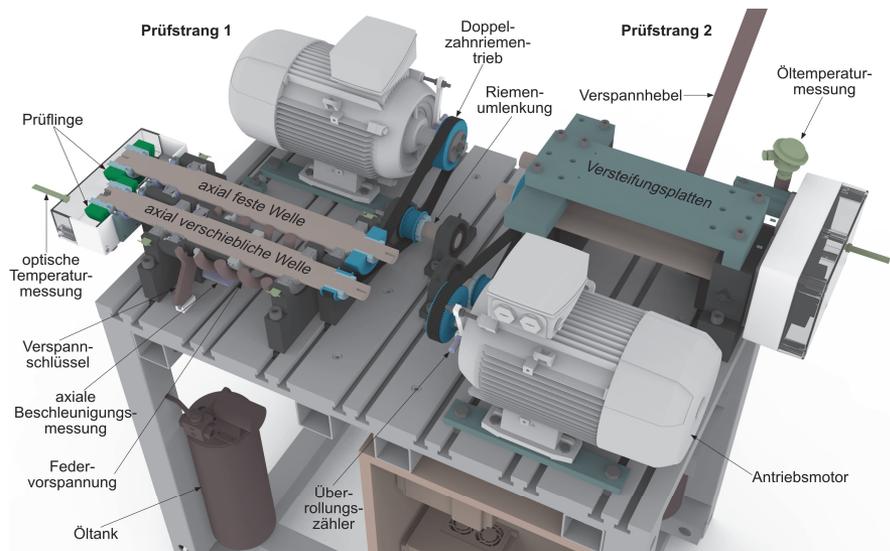


Abbildung 1: Schematische Darstellung

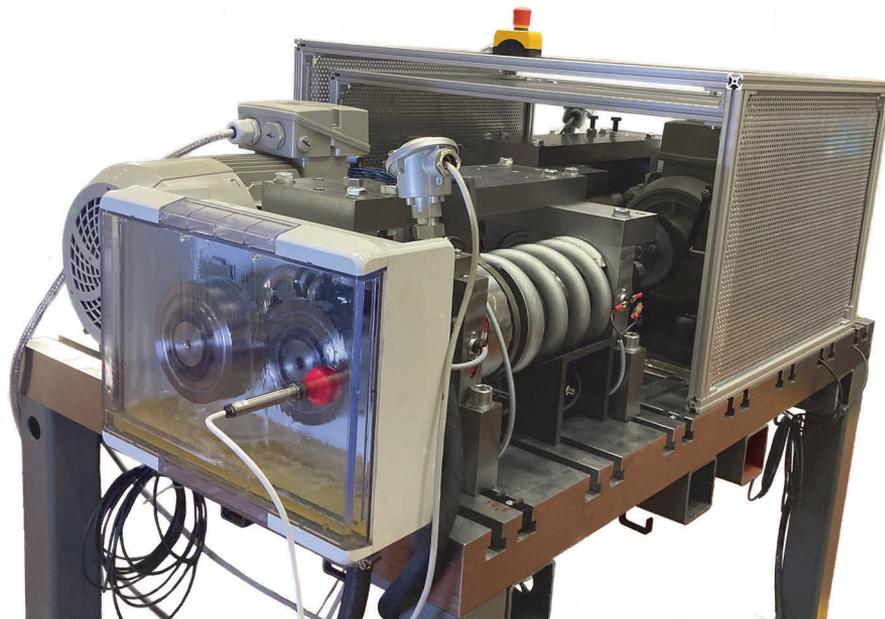


Abbildung 2: Foto des laufenden Prüfstands

Einsatz

Der Prüfstand wird aktuell in den Forschungsvorhaben DFG Lo 1557/12-1 „Auslegung von Druckkamm Lagerungen im Hochlastbereich“ sowie in BMWK TurboGetEff „Effizienzsteigerung eines Turboantriebsstrangs unter Einsatz von Druckkammern [...]“ eingesetzt.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens DFG Lo 1557/12-1, Projektnr. 514068987 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

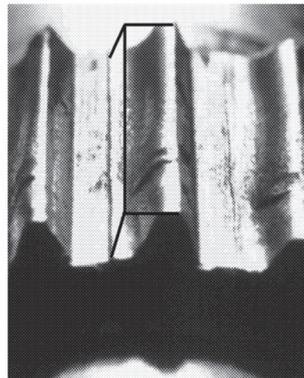
Literatur

- /1/ Thoden, D.: Neuer Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Druckkammern. In: Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal Bd. 34, S. 115-118, 2009
- /2/ Parkins, D. W.; Rudd, L.: Thrust Cone Lubrication: Part 3: A Test Facility and Preliminary Measured Data. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. Bd. 210, Ausg. 2, S. 107-112, 1996
- /3/ Sadykov, V. A.; Shneerson, L. M.: Helical Gear Transmissions with Thrust Collars. In: Russian engineering journal, S. 31-34, 1968
- /4/ Joachim, F.-J.M Kurz, N.; Somschor, B.: Druckkammtechnik in Fahrzeuggetrieben. In: Gleit und Wälzlagerungen: Gestaltung, Berechnung, Einsatz; Tagung Veitshöchheim, 3. und 4. März 1998. VDI Berichte 1380, S. 279-312, 1998
- /5/ Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Heß, M.: Druckkamm Lagerungen - Gesteigerte Effizienz für schrägverzahnte Getriebe. In: Gleit und Wälzlagerungen: Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung; Schweinfurt 06. und 07. Mai 2015, VDI Berichte 2257 S. 221-234, 2015
- /6/ Горшенин, К. И.: Контактно-гидродинамический расчет характеристик смазочного слоя упорных гребней косозубых передач мультипликаторов многовальных центробежных компрессоров. Dissertation Kasaner Staatl. Techn. Universität, 1999
- /7/ Kerr, T.: Static and Dynamic Coefficient Measurements for a Thrust Collar used in an Integrally Geared Compressor, Texas A&M University, Masterthesis, 2017

Testapparatur für Passverzahnungsverschleiß

Schäfer, G.

Neben der Gestaltfestigkeit stellt der Verschleiß eine Hauptschadensursache bei den Welle-Nabe-Verbindungen mit Passverzahnungen dar. Die Untersuchung der Einflussparameter ist dabei langwierig und mit erheblichem Energie- und Kostenaufwand verbunden. Mit der Einführung eines Zahnsegmenttesters ist es gelungen, den Versuchsaufwand deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Versuchsdauer zu kürzen, sowie die Prüfteildimensionen (Modul, Bezugsdurchmesser) zu vergrößern.



In addition to design strength, wear is one of the main causes of damage to shaft-hub connections with splines. The investigation of the influencing parameters is time-consuming and involves considerable energy and costs. With the introduction of a tooth segment tester, it has been possible to significantly reduce the test effort and at the same time shorten the test duration and increase the test part dimensions (module, reference diameter).

Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen betreibt seit vielen Jahren intensive Forschungen zum Verschleißverhalten von Passverzahnungen. Die Verschleißuntersuchungen an vollständigen Zahnwellen-Verbindungen mit Passverzahnungen sind sehr zeitaufwändig und trotz Nutzung von Verspannprüfständen mit einem relativ hohen Energieaufwand verbunden. Um zukünftig einerseits den Energieverbrauch zu reduzieren und andererseits auch größere Verbindungsdimensionen betrachten zu können, wurde ein Prüfstand aufgebaut, auf dem einzelne Zahn- und Lückensegmente der Passverzahnung mit den betriebstypischen Belastungen und Relativbewegungen mit minimalem Energieeinsatz beaufschlagt werden können.

Prüfstandsvarianten

Die beiden klassischen Ausfallursachen von Zahnwellen-Verbindungen sind einerseits Brüche bei Überschreitung der Gestaltfestigkeit und andererseits verschleißbedingter Verlust der Formschlusseigenschaften mit finalem Durchdrehen der Verbindung, siehe Abbildung 1. Für die Untersuchung der Gestaltfestigkeit von Passverzahnungen werden am IMW Torsionsresonanzprüfstände eingesetzt. Sie

erlauben eine energieeffiziente Versuchsdurchführung mit dynamischen Torsionslasten im Wechsel- und Schwelllastbereich. Ein Prüfstand für statische Torsionslasten ergänzt den Bereich der reinen Torsionsprüfstände. Darüber hinaus gibt es zwei Prüfstände für die kombinierte Belastung von Passverzahnungen durch Torsion und Biegung. Diese beiden Prüfstände können auch für Verschleißuntersuchungen genutzt werden. Für die reine Wechselbiegung gibt es zusätzlich einen geeigneten Prüfstand um entsprechende Kerbwirkungszahlen zu ermitteln.



Abbildung 1: *Vollständig verschlissene Nabe einer Passverzahnung*

Für die Untersuchung der zweiten Ausfallursache „Verschleiß“ werden im IMW neben den beiden bereits genannten Prüfständen mit kombinierter Torsions- und Biegebelastung, bei denen die Zahnwellen nicht rotieren, sondern die Biegebelastung um die Zahnwelle herumgeführt wird, aktuell fünf Verspannprüfstände genutzt. Bei den Verspannprüfständen wird die Prüfbelastung im Kreis geführt, so dass nur die Verlustleistung von ca. 10 – 15 % der Prüfleistung in das System eingespeist werden muss. Dies bedeutet aber auch bei nur mittleren Prüfleistungen von 500 kW und durchschnittlichen verschleißtypischen Prüfdauern von 2 bis 4 Wochen nicht unerhebliche Energiekosten. Vor diesem Hintergrund wurde die folgende Testapparatur entwickelt.

Zahnsegment-Verschleißtester

Entscheidend für den Verschleiß der Zahnflanken einer Passverzahnung sind die Relativbewegung zwischen den Flanken der Wellen- und Nabenverzahnung, sowie die dabei vorherrschende Flankenpressung. Grundsätzlich hat der Schmierungs-zustand (trocken, fett- oder ölgeschmiert) ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den Verschleiß, und ist im Zusammenhang mit dem hier vorgestellten Verschleißtester als Untersuchungsparameter vorgesehen. Abbildung 2 lässt die dazu geeignete Ölwanne, in der sich das Prüfsegment befindet, erkennen. Abhängig von der Relativbewegungsamplitude kann in reibkorrosiven Verschleiß (Fretting) bei minimalen Amplituden um 15 µm und Coulombschen Reibverschleiß bei Amplituden im mm-Bereich unterschieden werden, der Übergang ist dazwischen fließend. Für die Erzeugung der Relativbewegung wurde in der ersten Ausbauvariante ein

Unwuchterregerantrieb gewählt, der auf einem federelastischen Parallelogramm montiert ist und so nur Bewegungen in Zahn­längsrichtung erlaubt. Damit kann die reine Axialverschiebung der Passverzahnung abgebildet werden. Alternative Antriebe, die eine Taumelbewegung, wie sie bei radialem Achsversatz auftreten, realisieren, sind in Vorbereitung und können modular gegen den Parallelogramm­ tisch ausgetauscht werden.

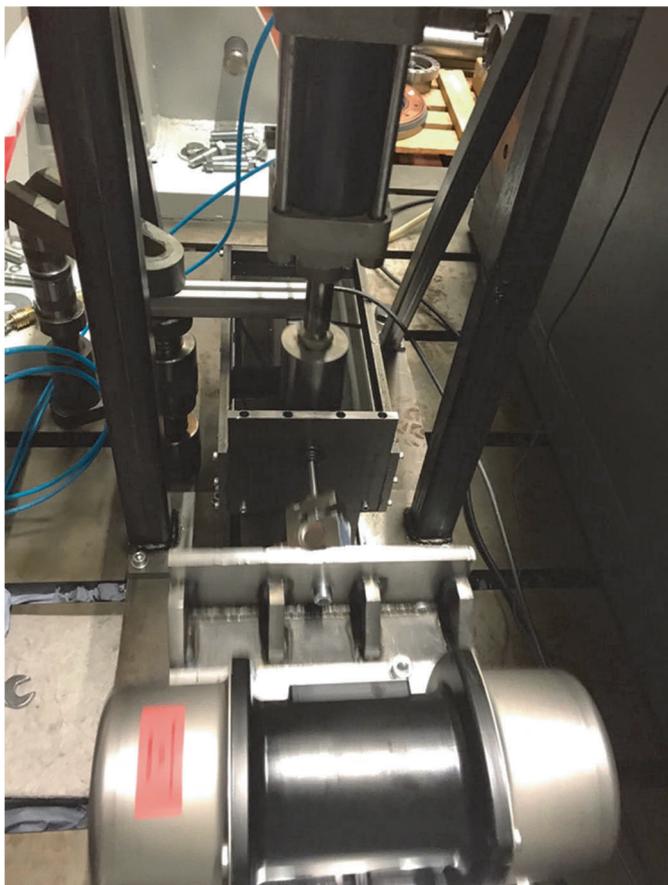


Abbildung 2: Zahnsegment-Verschleißtester mit Pneumatikzylinder oben für die Flanken­ druckung und Exzenterantrieb im Vordergrund zur Verschiebeanregung

Die zweite Verschleiß initiiierende Belastungskomponente neben der Relativbewegung ist die Flanken­ druckung, sie wird primär durch die Torsionsmomentübertragung in der Passverzahnung hervorgerufen. Passverzahnungen sind in der Regel flanken­ zentriert, so dass eine Torsionsmomentsteigerung das

Zentrierverhalten verbessert und damit die Relativbewegung reduziert. Verschleißschäden treten daher bevorzugt im „Kleinlastbereich“ der Zahnwellenverbindung auf. Der Verschleißtester wird daher häufig mit relativ geringen Flankenpressungen betrieben. Grundsätzlich erlaubt er mittlere Flankenpressungen auch oberhalb von 200 MPa, was aber zu erheblichen Versuchszeiten führt und daher bei Schmierungs- und Werkstoffvergleichsuntersuchungen nur eingeschränkt sinnvoll ist. Die Flankenpressung kann im Zahnsegment-Verschleißtester daher durch einen Pneumatikzylinder aufgebracht werden. Der Zylinder drückt dabei das Zahnsegment radial in die entsprechende Zahnücke. Durch den von 0° verschiedenen Flankenwinkel (üblicherweise zwischen 20° und 45°) ergibt sich beim Hereindrücken des Zahns in die Uücke eine Flankenpressung. Im Fall des Testers ist diese Flankenpressung an beiden Zahnflanken vorhanden, was einen Unterschied zur einseitigen Flankenpressung unter Torsionsbelastung darstellt. Dies ist bei der Auswertung von Verschleißvolumina und Verschiebekräften zu beachten. Die Symmetrierung der Torsionsbelastung auf beide Zahnflanken stellt aber ansonsten keine Einschränkung für die Versuchsergebnisinterpretation dar.

Mit dem Verschleißtester können aktuell Verschiebefrequenzen von bis zu 40 Hz erreicht werden, womit eine deutlich schnellere Versuchsdurchführung als in den Spannprüfständen erreichbar ist. Gleichzeitig ist die Messung von Verschiebekraft und Verschiebeweg an den Segmentproben einfach und genau realisierbar. Neben der angestrebten energieeffizienten Versuchsdurchführung erlaubt der Zahnsegmentverschleißtester auch die Untersuchung großmoduliger Passverzahnungen bis zum Modul 10, was in real ausgeführten Verbindungen zu Drehmomentkapazitäten führen würde, die im Gesamtsystem mehr als 1 MW-Verspannleistung für die Prüfdurchführung notwendig machen würden.

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Zahnsegment-Verschleißtester konnte das IMW seine Prüfausstattung für die Untersuchung von Zahnwellenverbindung durch eine extrem energieeffiziente Prüfeinrichtung erweitern, die umfangreiche Reihenuntersuchungen zum Schmierungs- und Werkstoffeinfluss in Passverzahnungen mit sinnvollem Material- und Kostenaufwand erlaubt. Die dazu isolierte Untersuchung an einzelnen Passverzahnungssegmenten, kann im übrigen IMW-Prüffeld durch die Untersuchung an vollständigen Zahnwellenverbindungen in das Gesamtsystemverhalten unter Verschleiß und Gestaltfestigkeit sinnvoll eingeordnet werden und ergänzt diese ideal.

Analyse der Dämpfungseigenschaften von metallischen Legierungen: Abhängigkeit von elastischer Dehnung und Frequenz

Alkountar, E.; Lohrengel, A.

Die Untersuchung des Dämpfungsverhaltens von metallischen Legierungen unter Schwingungen bei variierenden Frequenzen, Dehnungsamplituden und Temperaturen ist erforderlich, um eine fundierte Bewertung der Dämpfungseigenschaften der Materialien zu ermöglichen /1/. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, die Wechselwirkungen zwischen diesen Einflussparametern zu verstehen, um das mechanische Verhalten der Metalle unter realen Betriebsbedingungen präziser vorherzusagen. Am Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal wurde ein neuer Prüfaufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Dämpfungseigenschaften von Metallen und Legierungen bereits in frühen Entwicklungsstadien zu untersuchen. Durch die Analyse der logarithmischen Dekremente freischwingender Systeme wird das Dämpfungsverhalten bestimmt, was zu einer verbesserten Bewertung der Materialeigenschaften führt.



The investigation of the damping behavior of metallic alloys under vibrations of different frequencies, strain amplitudes, and temperatures is essential for a thorough evaluation of the materials' damping properties /1/. Understanding the interactions between these parameters is crucial for more accurate predictions of the mechanical behavior of metals under real operating conditions. At the Institute of Mechanical Engineering (IMW) at Clausthal University of Technology, a new test apparatus has been developed to enable the analysis of the damping properties of metals and alloys at early stages of development. By analyzing the logarithmic decrements of freely oscillating systems, the damping behavior is determined, leading to an improved assessment of the material properties.

Einleitung

Durch die Vibration eines Materials tritt aufgrund innerer Reibung ein Energieverlust auf, bei dem Energie in Form von Wärme dissipiert wird. Die Dämpfungseigenschaften können durch das Verhältnis der dissipierten Energie ΔW zur während eines Schwingungszyklus gespeicherten Energie W beschrieben werden. Der Ausdruck $100 \cdot \Delta W / W$ stellt einen prozentualen Kennwert dar, der die innere Reibung des Materials quantifiziert /1/. Zur Bestimmung der Dämpfung wird dieser Ansatz häufig experimentell durch Verfahren wie den statischen Hystereseversuch umgesetzt, bei dem genormte Proben und spezielle Prüfstände zum Einsatz

kommen. In frühen Entwicklungsphasen ist es oft erforderlich, eine erste approximative Einschätzung der Dämpfungseigenschaften einer Legierung zu erhalten, insbesondere um verschiedene Legierungszusammensetzungen oder Materialien miteinander zu vergleichen und schnelle Entscheidungen für die Weiterentwicklung auf Basis vorhandener Vorkenntnisse zu treffen. Ein vereinfachter Prüfaufbau mit weniger komplexen Prüfbedingungen ist hierbei von Nutzen.

Aus diesem Grund wurde am IMW der TU Clausthal ein Prüfaufbau entwickelt, der die Auslenkungs- und Geschwindigkeitssignale frei schwingender Systeme erfasst und eine Abschätzung der Dämpfungseigenschaften der Materialien durch die Berechnung des logarithmischen Dekrements δ ermöglicht. Dieses ist als der natürliche Logarithmus zweier aufeinanderfolgender Schwingungsmaxima definiert /2/:

$$\delta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) \quad (1)$$

Wobei A_n und A_{n+1} die Amplituden zwei aufeinanderfolgender Zyklen darstellen.

Die Untersuchung der Materialdämpfung durch die Berechnung des logarithmischen Dekrements und dessen Zusammenhang mit der inneren Reibung wurde in der Fachliteratur durch verschiedene experimentelle Methoden analysiert. Chicharro et al. bestimmten das logarithmische Dekrement δ als Maß für die Dämpfung elastischer Wellen, indem sie das Verhältnis aufeinanderfolgender Amplituden freier Schwingungen betrachteten /3/. In einem alternativen Ansatz berechneten De Morton et al. das logarithmische Dekrement auf Grundlage des Abfalls der Schwingungsgeschwindigkeit, um die Dämpfung zu quantifizieren /4/. Dabei gilt:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{v_0}{v_n}\right) \quad (2)$$

Wobei v_0 und v_n die Geschwindigkeitsmaxima der ersten und der n-ten betrachteten Schwingung darstellen.

Experimenteller Aufbau

In der vorliegenden Arbeit wurden die Vibrationssignale mit einem Laservibrometer erfasst, das sowohl die Auslenkungs- als auch die Geschwindigkeitssignale aufzeichnet. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Ergebnisse beider Signalarten zu analysieren und zu vergleichen, um die Genauigkeit sowie die Grenzen des Prüfaufbaus genauer zu evaluieren.

Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Auf einem stabilen Betonfundament ist ein elektromagnetischer Shaker installiert, der die Proben durch eine fest eingespannt Halterung fixiert. Die Proben bestehen aus Metalldrähten mit

einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 15 cm und sind an einem Ende in der Halterung befestigt. Das andere Ende bleibt frei schwingend, wobei in definiertem Abstand eine bekannte Masse angebracht ist.

Das Messsystem des Prüfaufbaus umfasst ein Laservibrometer, einen Messverstärker und ein auf Python basierendes Auswertungssystem. Die vom Laservibrometer erfassten Daten werden in ein lesbare Format umgewandelt, das vom Auswertungsprogramm verarbeitet und visualisiert werden kann.

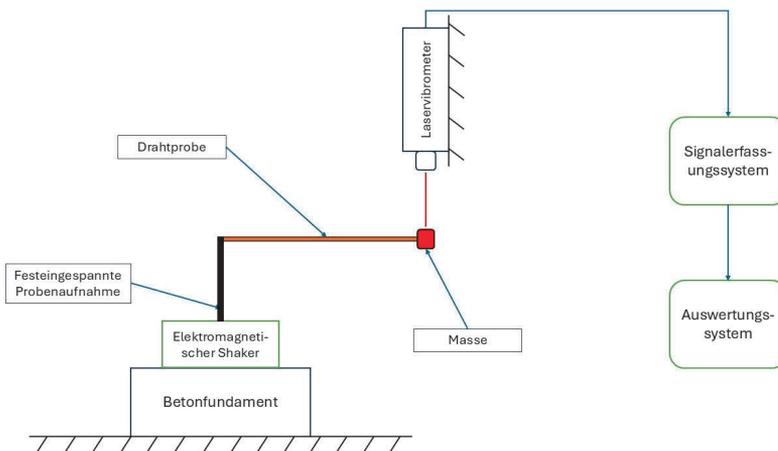


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus

Versuchsdurchführung

Die Probe wird an der fest eingespannten Seite durch den Shaker angeregt, der von einem Signalgenerator mit einem Sinussignal einer festgelegten Frequenz und Amplitude gespeist wird. Dies führt zu Schwingungen der gesamten Probe, wobei die angebrachte Masse ebenfalls in Schwingung versetzt wird, jedoch mit einer abweichenden Amplitude.

Mit dem präzise auf die Oberfläche der Masse ausgerichteten Laservibrometer werden die Geschwindigkeit sowie die Auslenkung des freien Endes der Probe erfasst. Sobald sich die Schwingungen stabilisiert haben und ein harmonischer Schwingungszustand erreicht ist, wird die Signalgenerierung gestoppt. Der Shaker bremst sofort, wodurch sowohl die Aufnahme als auch die fest eingespannte Seite der Probe in ihre Ausgangsposition (Nullposition) zurückkehren. Das freie Ende der Probe sowie die daran befestigte Masse schwingen jedoch in einem gedämpften freien Schwingungszustand weiter, bis sie schließlich zur Ruhe kommen.

Da für diese Arbeit ausschließlich die gedämpfte freie Schwingung von Interesse ist, wurde die Zeitspanne, die zum vollständigen Stoppen des Shakers und der Aufnahme benötigt wird, präzise gemessen. Diese beträgt 0,10 s. Auf dieser Grundlage beginnt die Erfassung der gedämpften freien Schwingung des freien Endes der Probe erst 0,10 s nach dem Abschalten der Signalgenerierung. Dadurch wird sichergestellt, dass die Dämpfung des Shakers sowie die Schwingungsamplitude des fest eingespannten Endes die Messung nicht beeinflussen.

Mehrere Experimente wurden unter Variation der Materialien und Versuchsbedingungen durchgeführt, um die Dämpfungseigenschaften systematisch zu analysieren. Die modifizierten Parameter umfassen:

- Materialeigenschaften, beeinflusst durch die Auswahl unterschiedlicher Drahtmaterialien
- Maximale Auslenkung (δ) des schwingenden Drahtes am freien Ende
- Resultierende maximale Dehnung (ϵ_{max}) am Festeinspannungspunkt, berechnet für Drähte mit kreisförmigem Querschnitt nach (3):

$$\epsilon_{max} = \frac{3 \cdot \delta \cdot y_{max}}{L^2} \quad (3)$$

Dabei gilt:

- δ : Maximale Auslenkung am freien Ende des Drahtes.
- y_{max} : Abstand von der neutralen Faser zur äußersten Faser des Querschnitts (entspricht dem Radius bei einem runden Draht).
- L : Effektive Länge des Drahtes, wobei die ersten 3 cm festeingespannt sind. In diesem Fall ergibt sich $L = 15 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 12 \text{ cm}$.

Zusätzlich wurden verschiedene Schwingungsfrequenzen getestet, um deren Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften zu untersuchen. Alle Experimente wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, wodurch temperatureinflussbedingte Effekte im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden können.

Tabelle 1 zeigt die durchgeführten Versuche und die verschiedenen Variationen der Versuchsparameter.

Tabelle 1: Variationen der Versuchsparameter

Drahtmaterial	Frequenz in Hz	Max. Auslenkung in μm	Dehnung an Lagerungsstelle in %
Stahllegierung (13CrMo4-5)	30	1400	0.029
Stahllegierung (13CrMo4-5)	30	700	0.015
Stahllegierung (13CrMo4-5)	20	1400	0.029
Stahllegierung (13CrMo4-5)	20	700	0.015
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	30	1400	0.029
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	30	700	0.015
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	20	1400	0.029
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	20	700	0.015

Auswertung

Erste Messreihe aus 13CrMo4-5

Für die erste Messreihe wurden Versuchsdaten erhoben, die unter variierenden Dehnungswerten beziehungsweise Schwingungsamplituden sowie bei unterschiedlichen Frequenzen aufgezeichnet wurden. Ziel dieser Experimente war es, den Einfluss der Dehnung auf die Dämpfungseigenschaften des Materials zu

analysieren. Zusätzlich wurde der Einfluss geringfügiger Frequenzänderungen auf die Dämpfungseigenschaften untersucht.

Die initiale Versuchsreihe wurde an Stahllegierungsdrähten bei zwei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen von 20 Hz und 30 Hz durchgeführt. Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Diagramme illustrieren das Schwingungsverhalten des Prüflings unter freien Schwingungsbedingungen für die jeweiligen Versuchsparameter. Dabei wird die Schwingungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit abgebildet. Die Entscheidung, die Schwingungsgeschwindigkeit statt der Auslenkungsamplitude darzustellen, beruht auf der eingesetzten optischen Messtechnik, die eine präzisere und störungsfreie Erfassung der Geschwindigkeit ermöglicht.

Abbildung 2 bis Abbildung 5 illustrieren die abklingende Schwingungsgeschwindigkeit desselben Systems unter verschiedenen Bedingungen (variierte Anregungsfrequenzen und maximale Auslenkungen). Zur quantitativen Analyse des Abklingverhaltens wurde eine exponentielle Regression auf die Maximalwerte der Geschwindigkeit angewendet, um entsprechende Anpassungskurven zu erzeugen.

Die zugrunde liegende Funktion der exponentiellen Regression lautet $v(t) = ae^{x \cdot b}$, wobei b als Abklingkoeffizient bezeichnet wird. Dieser Koeffizient beschreibt die Geschwindigkeit des exponentiellen Abfalls der Schwingungsgeschwindigkeit und charakterisiert somit das Dämpfungsverhalten des Systems. Tabelle 2 zeigt die unterschiedlichen Werte des Abklingkoeffizienten, die durch die Regression aus den Versuchsdaten berechnet wurden.

Tabelle 2: Abklingkoeffizienten der Schwingungsgeschwindigkeit (13CrMo4-5)

Versuch	Abklingkoeffizient b
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 1400 μm	-1,02
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 700 μm	-0,92
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 1400 μm	-0,98
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 700 μm	-0,83

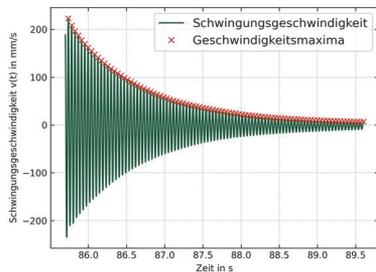


Abbildung 2: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 1400 µm maximale Auslenkung

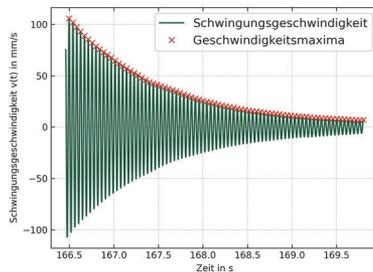


Abbildung 3: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 700 µm maximale Auslenkung

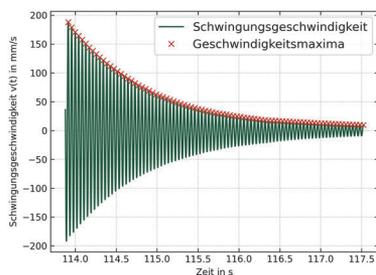


Abbildung 4: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 1400 µm maximale Auslenkung

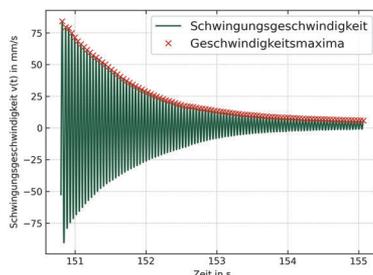
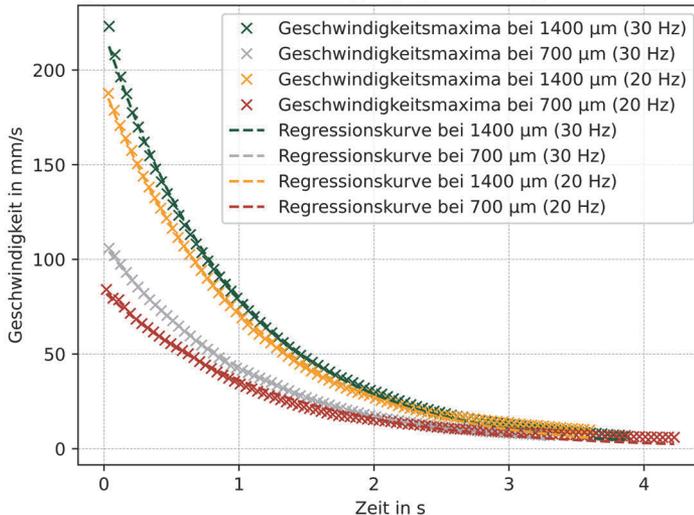


Abbildung 5: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 700 µm maximale Auslenkung

Ein weiteres Diagramm (Abbildung 6) vergleicht die resultierenden Regressionskurven, um die Unterschiede im Dämpfungsverhalten unter den jeweiligen Versuchsbedingungen zu verdeutlichen.

Geschwindigkeitsmaxima der Schwingungsgeschwindigkeit mit Kurvenanpassung

**Abbildung 6:** Regressionskurven der unterschiedlichen Versuche

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Stahllegierungen zeigen, dass bei erhöhter Dehnung eine geringere Zunahme der Dämpfung auftritt als bei niedrigeren Dehnungen. Ebenso wurde eine leichte Steigerung des Dämpfungsverhaltens bei höheren Frequenzen beobachtet. Beide Effekte bleiben jedoch gering, da die Dehnungen eindeutig im elastischen Bereich liegen, wodurch keine zusätzliche Energie durch plastische Verformung dissipiert wird. Darüber hinaus wirken sich die niedrigen Frequenzen (20–30 Hz) nur moderat auf die viskoelastische Dämpfung aus, da die Dehnrage bei diesen Frequenzen im Vergleich zu höheren Frequenzen relativ gering ist. Folglich konnte nur eine geringe Steigerung der Dämpfungseigenschaften bei 30 Hz festgestellt werden.

Die Berechnung des logarithmischen Dekrements für jedes Schwingungsgeschwindigkeitssignal gemäß Formel (2) ist in Tabelle 3 dargestellt. Die Werte wurden nach 50 Schwingungszyklen für alle Proben ermittelt.

Tabelle 3: Das logarithmische Dekrement der Schwingungsgeschwindigkeitssignale für die erste Versuchsreihe

Versuch	V_0 in mm/s	V_{50} in mm/s	Logarithmisches Dekrement δ
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 1400 μm	223,10	25,39	0,044
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 700 μm	105,83	14,85	0,039
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 1400 μm	187,72	22,75	0,042
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 700 μm	84,07	13,71	0,036

Die Ergebnisse der Berechnung des logarithmischen Dekrements stimmen mit den Aussagen der exponentiellen Regression überein und entsprechen den erwarteten Ergebnissen.

Zweite Messreihe aus EN AW-5083

Für die zweite Messreihe wurden die gleichen Versuchsbedingungen wie in der ersten Messreihe angewendet, jedoch mit einer anderen Legierung. Hierbei kamen Aluminiumlegierungsdrähte zum Einsatz, die bei Anregungsfrequenzen von 20 Hz und 30 Hz sowie maximalen Auslenkungen von 1400 μm und 700 μm untersucht wurden.

Auch für die zweite Messreihe wurde zur Analyse des Abklingverhaltens eine exponentielle Regression auf die Maximalwerte der Schwingungsgeschwindigkeit angewendet, um die Abklingkoeffizienten zu bestimmen. Die Versuchsergebnisse sind analog zur ersten Messreihe in den folgenden Diagrammen als Schwingungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die ermittelten Werte der Abklingkoeffizienten b sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

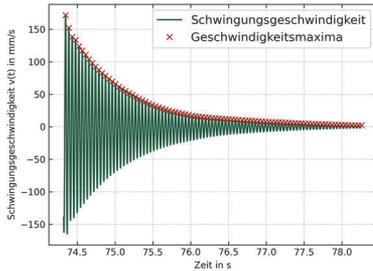


Abbildung 7: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 1400 μm maximale Auslenkung

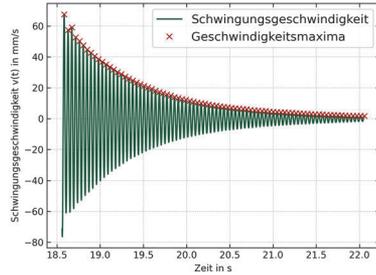


Abbildung 8: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 700 μm maximale Auslenkung

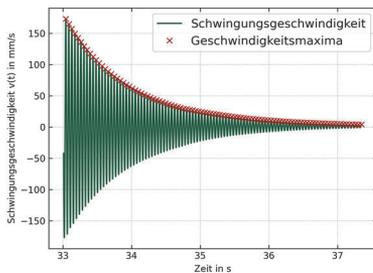


Abbildung 9: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 1400 μm maximale Auslenkung

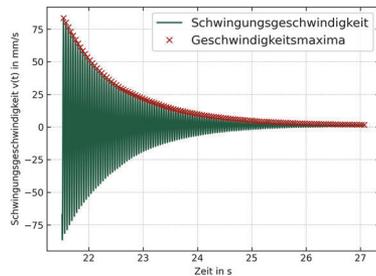


Abbildung 10: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 700 μm maximale Auslenkung

Tabelle 4: Abklingkoeffizienten der Schwingungsgeschwindigkeit (EN AW-5083)

Versuch	Abklingkoeffizient b
EN AW-5083 bei 30 Hz, 1400 μm	-1,32
EN AW-5083 bei 30 Hz, 700 μm	-1,15
EN AW-5083 bei 20 Hz, 1400 μm	-1,00
EN AW-5083 bei 20 Hz, 700 μm	-0,88

Obwohl EN AW-5083 als mittel- bis hochfeste Aluminiumlegierung eingestuft wird und typischerweise eine moderate Dämpfung aufweist, zeigen die experimentellen Ergebnisse, dass sie im Vergleich zur Stahllegierung leicht bessere Dämpfungseigenschaften aufweist. Dies ist auf Unterschiede in der Mikrostruktur, potenzielle plastische Mikroverformungen sowie die geringere Steifigkeit der Aluminiumlegierung zurückzuführen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse jedoch eine weitgehende Übereinstimmung mit den bei der Stahllegierung beobachteten Tendenzen, da die Dämpfungseigenschaften bei höheren Auslenkungen und Frequenzen größer sind als bei niedrigeren.

Tabelle 5 zeigt die berechneten Werte des logarithmischen Dekrements für jeden Versuch nach 50 Schwingungen. Diese stimmen mit den Ergebnissen der exponentiellen Regression überein.

Tabelle 5: Das logarithmische Dekrement der Schwingungsgeschwindigkeitssignale für die zweite Messreihe

Versuch	V_0 in mm/s	V_{50} in mm/s	Logarithmisches Dekrement δ
EN AW-5083 bei 30 Hz, 1400 μm	171,57	11,40	0,054
EN AW-5083 bei 30 Hz, 700 μm	67,46	5,49	0,050
EN AW-5083 bei 20 Hz, 1400 μm	173,09	20,34	0,043
EN AW-5083 bei 20 Hz, 700 μm	83,50	12,19	0,039

Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass eine Abhängigkeit zwischen der inneren Reibung bzw. den Dämpfungseigenschaften metallischer Legierungen und der Dehnung besteht, auch im elastischen Bereich. Der Einfluss der elastischen Dehnung ist jedoch begrenzt und wird maßgeblich durch die Zusammensetzung der Legierung sowie ihrer mikrostrukturellen Eigenschaften bestimmt. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Frequenz das Dämpfungsverhalten beeinflusst, wobei die Mikrostruktur und die Steifigkeit des Materials eine entscheidende Rolle für die genaue Wirkung der Frequenz spielen.

Trotz der erzielten Erkenntnisse bleiben noch offene Fragestellungen, die in zukünftigen Studien adressiert werden sollten. Insbesondere der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfungseigenschaften metallischer Legierungen bietet Raum für weitere Untersuchungen. Hierfür könnten am IMW Experimente unter

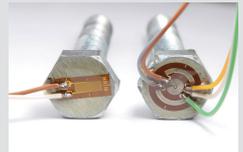
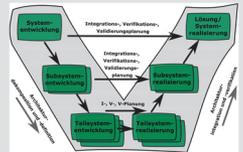
kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer mit Temperaturen bis 80 °C durchgeführt werden, um thermische Effekte besser zu verstehen.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz für künftige Arbeiten ist die Untersuchung des Dämpfungsverhaltens im Vakuum, um mögliche Störeinflüsse zu minimieren und deren Auswirkungen zu quantifizieren. Zudem sollten sowohl die Effekte plastischer Verformungen als auch das Verhalten bei hohen Frequenzen systematisch analysiert werden, um ihre Wechselwirkung mit den mikrostrukturellen Eigenschaften und deren Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften besser zu verstehen. Abschließend wäre die Entwicklung eines einheitlichen Kennwertes, der Drahtversuche und genormte Testverfahren miteinander vergleichbar macht, von großem Interesse.

Diese Ansätze könnten wesentlich dazu beitragen, das Verständnis der Dämpfungseigenschaften metallischer Legierungen aus der frühen Entwicklungsphase heraus zu vertiefen und deren Anwendungspotenzial in technischen Systemen gezielt zu optimieren.

Literatur

- /1/ Chicharro, J. M.; Bayon, A.; Salazar, F.: Measurement of damping in magnetic materials by optical heterodyne interferometry. In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003.
- /2/ de morton, M. A.; Lott, S. A.; Stainsby, D. F.: Measurement of internal friction by velocity. In: Journal of Scientific Instruments, 1963.
- /3/ Kuttner, T.; Rohnen, A.: Praxis der Schwingungsmessung. Springer Vieweg, 2019.
- /4/ Ritchie, I. G.; Pan, Z. -L.: High-damping metals and alloys. In: Metallurgical Transactions A, 1991.

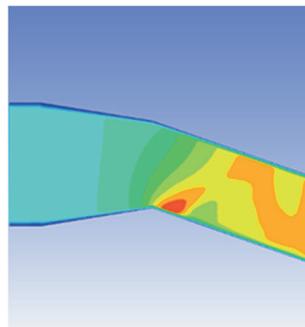


Hochschule und Kontakte

D

Untersuchung der Merkmale konvergenter und konvergent-divergenter Düsenköpfe von Dampfturbinen mit kreisförmigen und quadratischen Querschnitten

Isranuri, I.; Alfisyahrin, R. N.; Prasoso, S. M.



Das Ziel des Artikels ist es, zu untersuchen, welches Format von Düsen mit kreisförmigem und quadratischem Querschnitt besser für den Einsatz in zweireihigen einstufigen Dampfturbinen geeignet ist. In dieser Arbeit werden Simulationen mit ANSYS sowie eine Analyse verschiedener Düsentypen mit unterschiedlichen Abmessungen mit kreisförmigen oder quadratischen Querschnitten durchgeführt. Die Studie wurde für Dampfturbinen von 800 kW und 1200 kW durchgeführt. Die Modelle für beide Düsentypen wurden auf der Grundlage von Abmessungen und technischen Daten erstellt, die aus der Palmölindustrie und aus Katalogen stammen. Durch Simulation der Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturverteilung werden die Eigenschaften der einzelnen Testmodelle betrachtet und verglichen.

The aim of this article is to investigate which nozzle format, with circular and square cross-sections, is better suited for use in two-row, single-stage steam turbines. This paper presents simulations using ANSYS and an analysis of various nozzle types with different dimensions featuring circular or square cross-sections. The study was conducted for steam turbines of 800 kW and 1200 kW. The models for both nozzle types were created based on dimensions and technical data sourced from the palm oil industry and from catalogues. By simulating the velocity, pressure, and temperature distributions, the characteristics of each test model are examined and compared.

Einführung

Dampfturbinen sind Antriebsmaschinen, die in verschiedenen Industriezweigen zum Antrieb von Generatoren zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Kleine und mittelgroße Dampfturbinen werden in vielen Industriezweigen eingesetzt, insbesondere in der Palmölindustrie, z. B. in kohlebefeuernden Kraftwerken oder in Biomassekraftwerken (Abfälle von Palmschalen und -fasern). Die Dampfturbine dient dazu, die potenzielle Energie des Dampfes in kinetische Energie umzuwandeln, und die kinetische Energie treibt später die Generatorwelle an. Um die Leistung zu erhöhen, werden zahlreiche Entwicklungen an den Teilen der Dampfturbine vorgenommen. Eine der wichtigsten Komponenten hierbei ist die

Düse. Es gibt verschiedene Formen von Düsen, die heute in der Industrie verwendet werden, z. B. konvergente Düsen und konvergent-divergente Düsen.

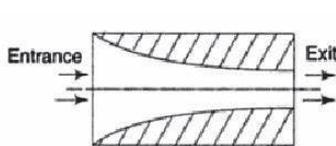
Düse und Düsentyp der Dampfturbine

Die Düse ist Teil einer Kraftmaschine, die die potenzielle Energie des Dampfes in kinetische Energie umwandelt. Düsen werden verwendet, um die Durchflussmenge, Geschwindigkeit, Richtung, Masse, Form und/oder den Druck des aus der Düse austretenden Stroms zu steuern. Nach dem Durchgang durch die Düse erhöht sich die Geschwindigkeit der Flüssigkeit auf Kosten ihrer Druckenergie.

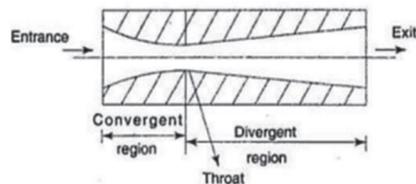
Es gibt 2 Arten von Düsen, die üblicherweise in Dampfturbinen verwendet werden, nämlich:

- Konvergente Düse
- Konvergent-divergente Düse

Eine konvergente Düse ist eine Düse, deren Querschnittsfläche kontinuierlich abnimmt, bis sie die Düsenspitze erreicht, während eine divergente konvergente Düse eine Düse ist, deren Querschnittsfläche bis zu einem bestimmten Teil der Düse abnimmt und dann wieder zunimmt, wobei dieser Übergangsbereich als Düsens Hals bezeichnet wird.



(a) Konvergente Düse



(b) Konvergent-divergente Düse

Abbildung 1: Typ der Düsen

Computational Fluid Dynamics (CFD) Annäherung

Die numerische Strömungsmechanik (CFD) ist ein Teilgebiet der Aerodynamik/Fluidmechanik, bei dem Informationen zum betrachteten System aus Berechnungen mit Hilfe von numerischen Analysen gewonnen werden, um Strömungsprobleme zu lösen und zu analysieren. CFD kann als ein technisches Werkzeug bezeichnet werden, das neben Experimenten in der Entwicklungsphase unterstützend genutzt werden kann.

Eine Systemanalyse mittels CFD besteht aus mehreren Schritten:

- Identifizierung des Problems
- Vorverarbeitung
- Lösungen
- Nachbearbeitung

Simulation mit Ansys Fluent

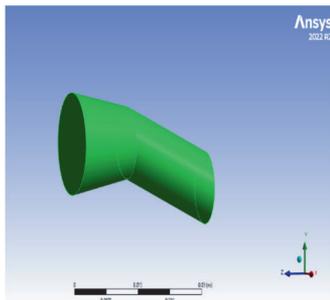
Die Durchführung einer Simulation mit Ansys Fluent erfolgt in mehreren Schritten:

I. Zeichnung der Geometrien mit den folgenden Spezifikationen:

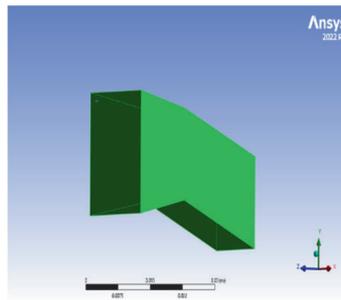
Tabelle 1: Düsenspezifikationen

Parameter	800 kW Turbine	1200 kW Turbine
d_{in} (Durchmesser Einlass)	16,88 mm	20,66 mm
d_{out} (Durchmesser des Auslasses)	12,65 mm	15,49 mm
Düsenlänge	34 mm	34 mm
Konvergentes Gefälle des Düsenauslasses	21°/0°	21°/0°

Woraus sich folgende CAD-Modelle ergeben:

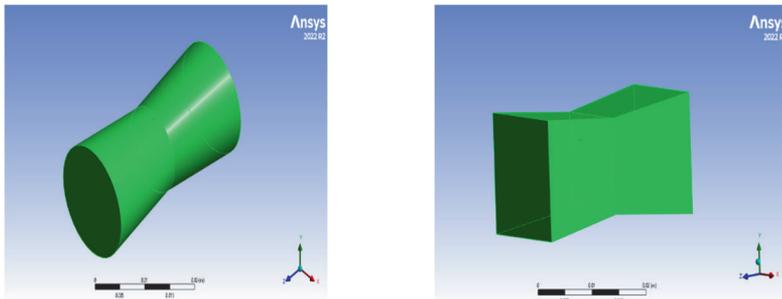


(a) Konvergente Runddüse



(b) Konvergente quadratische Düse

Abbildung 2: Typen konvergenter Düsen mit Auslassgefälle



(a) Konvergent-divergente Runddüse (b) Konvergent-divergente quadratische Düse

Abbildung 3: Arten von konvergent-divergenten Düsen ohne Auslassgefälle

Für die einstufige Dampfturbine mit 800 kW und 1200 kW gibt es vier Musterformen mit unterschiedlichen Düsenabmessungen. Die Abmessungen sind in der Tabelle 1 mit den Düsenspezifikationen für die acht zu simulierenden Exemplare aufgeführt.

II. Bildung eines Netzes auf der erstellten Geometrie, wobei die Maschenweite hier auf 0,8 mm festgelegt wird.

III. Erstellen der Simulationsdaten, bei denen das Fluid überhitzter Dampf und das feste Material SS-403 ist. Die Eintrittsgeschwindigkeit des Dampfes beträgt 189,8 m/s bei einem Druck von 20 bar und einer Eintrittstemperatur von 160 °C.

IV. Initialisierungs- und Berechnungsprozess

V. Analyse der Simulationsergebnisse durch Betrachtung der Durchschnittswerte von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur am Auslass.

Ergebnis und Diskussion

Die folgende Analyse zeigt die Modellierung von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur an jeder Düse mit quadratischem oder rundem Querschnitt mit konvergenten und divergent konvergenten Typen. Die Geometrie der verwendeten Düse entspricht der Geometrie der Düse an den 800 kW- und 1200 kW-Dampfturbinen.

Konvergente Düsen, 800 kW

Die Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturkonturen an den konvergenten 800 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 4 bis 9 dargestellt.

Aus den Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der 800 kW-Runddüse strömenden Dampfes 806,3 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 690,37 m/s beträgt. Der

Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 6,93 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 535,5 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 444,606 K beträgt.

Aus der obigen Kontur ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der 800 kW-quadrischen Düse strömenden Dampfes 746 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenausgang 652,234 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 7,7 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 535,6 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 454,69 K.

Rundstrahldüse

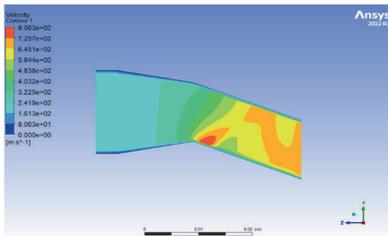


Abb. 4: Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

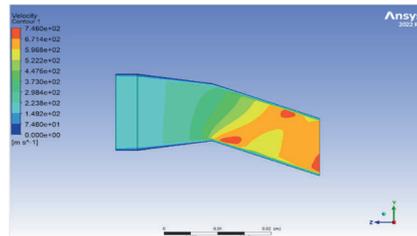


Abb. 5: Geschwindigkeitskontur

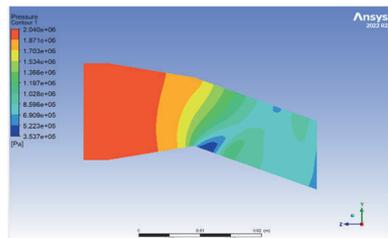


Abb. 6: Druckkontur

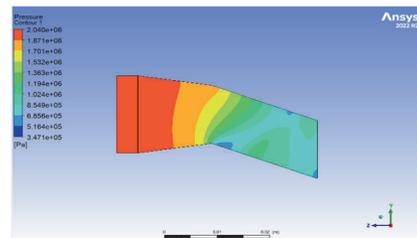


Abb. 7: Druckkontur

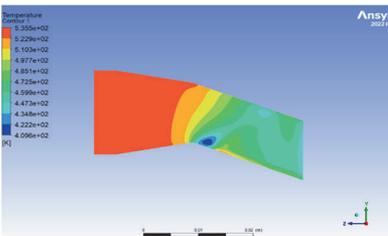


Abb. 8: Temperaturkontur

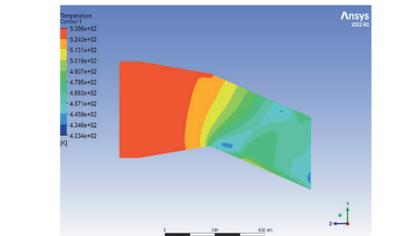


Abb. 9: Temperaturkontur

Konvergente Düsen, 1200 kW

Die Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturkonturen an den konvergenten 1200 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 10 bis 15 dargestellt.

Rundstrahldüse

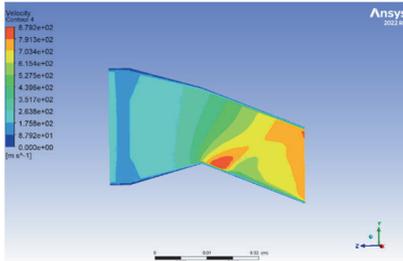


Abb. 10: Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

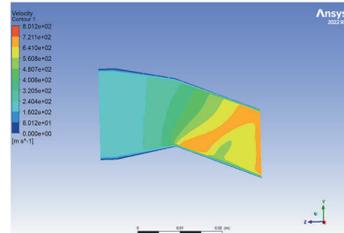


Abb. 11: Geschwindigkeitskontur

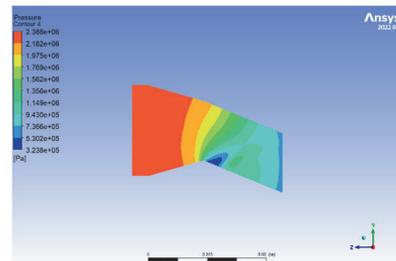


Abb. 12: Druckkontur

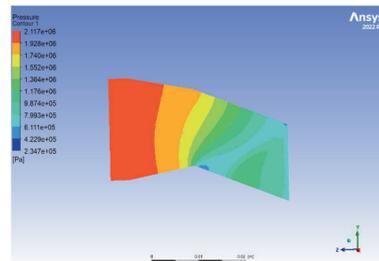


Abb. 13: Druckkontur

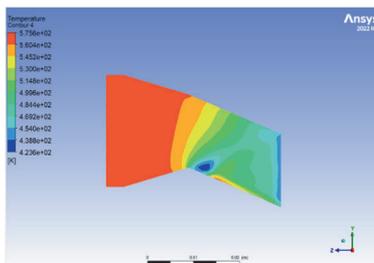


Abb. 14: Temperaturkontur

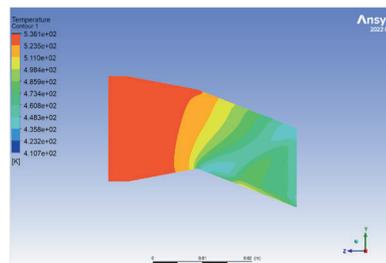


Abb. 15: Temperaturkontur

Aus den obigen Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Runddüse strömenden Dampfes 879,2 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenausgang 772,151 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 6,81671 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden

Dampfes beträgt 575,6 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 446,646 K beträgt.

Aus den obigen Konturen rechts ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der quadratischen Düse strömenden Dampfes 801,2 m/s beträgt, die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt beträgt 672,164 m/s. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 7,39 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 536,1 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 449,612 K beträgt.

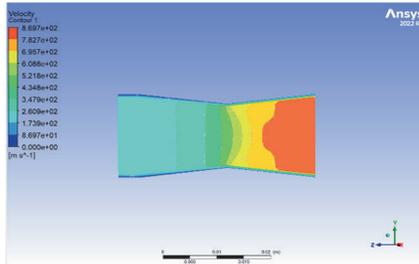
Konvergent-Divergent-Düsen, 800 kW

Die Konturen der Geschwindigkeit, des Drucks und der Temperatur an der konvergenten divergenten 800 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 16 bis 21 dargestellt.

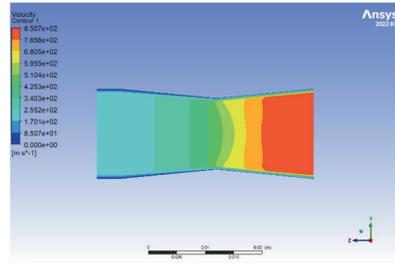
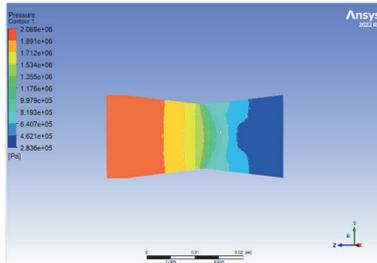
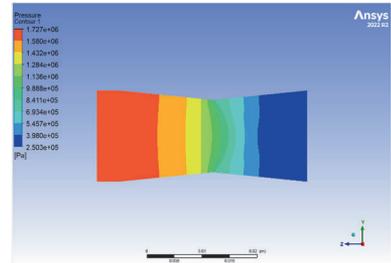
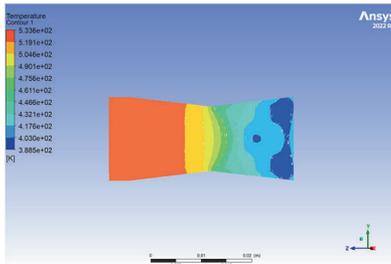
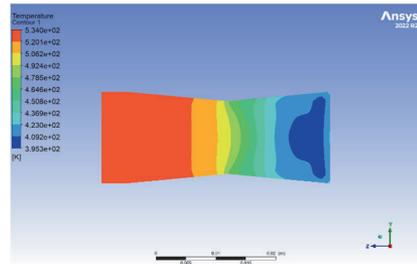
Aus den Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 869,7 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenausgang 827,742 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 3,34 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 533,6 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 405,402 K beträgt.

Aus den Konturen rechts ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 850,7 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 788,107 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 3,137 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 534 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 418,527 K beträgt.

Rundstrahldüse

**Abb. 16:** Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

**Abb. 17:** Geschwindigkeitskontur**Abb. 18:** Druckkontur**Abb. 19:** Druckkontur**Abb. 20:** Temperaturkontur**Abb. 21:** Temperaturkontur

Konvergent-Divergent-Düsen, 1200 kW

Die Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturkonturen der konvergent-divergenten 1200 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 22 bis 27 dargestellt.

Rundstrahldüse

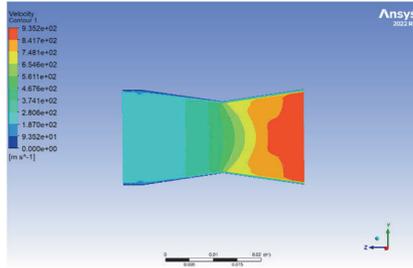


Abb. 22: Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

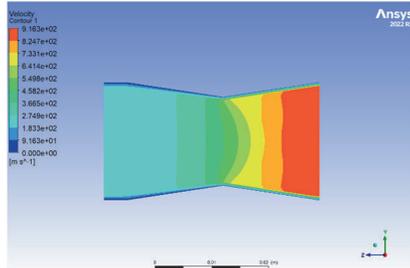


Abb. 23: Geschwindigkeitskontur

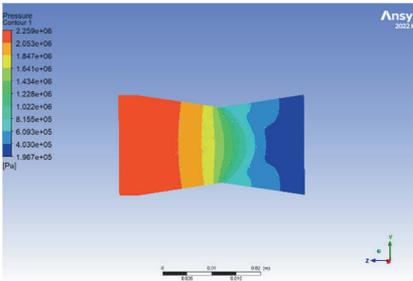


Abb. 24: Druckkontur

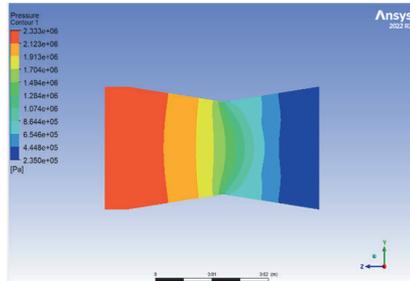


Abb. 25: Druckkontur

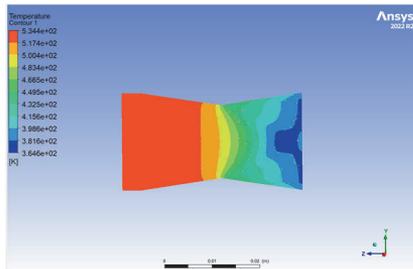


Abb. 26: Temperaturkontur

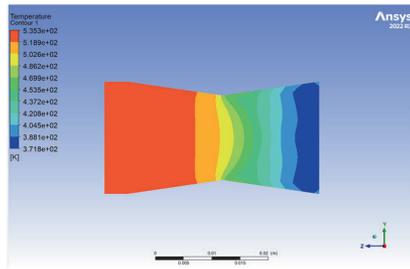


Abb. 27: Temperaturkontur

Aus den obigen Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 935,2 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 890,303 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 2,695 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 534,4 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 381,342 K beträgt.

Aus den obigen Konturen rechts ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 916,3 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 876,087 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 2,893 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 535,3 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 387,372 K beträgt.

Für den folgenden tabellarischen Vergleich sind die betrachteten Modelle in ihrer Bearbeitungsreihenfolge durchnummeriert, wie in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Vergleichende Ergebnisse der durchschnittlichen Auslaufdüse

Nr.	Typen von Düsen	Druck [bar]	Geschwindigkeit [m/s]	Temperatur [K]
1	Konvergent kreisförmig 800 kW	6.932	690.37	444.602
2	Konvergentes Quadrat 800 kW	7.730	652.324	454.690
3	Konvergent kreisförmig 1200 kW	6.816	791.209	446.646
4	Konvergentes Quadrat 1200 kW	7.392	672.164	449.612
5	Konvergent-Divergent Kreisförmig 800 kW	3.343	827.742	405.402
6	Konvergent-Divergent Quadrat 800 kW	3.137	788.107	418.527
7	Konvergent-Divergent Kreisförmig 1200 kW	2.694	890.303	381.342
8	Konvergent-Divergent Quadratisch 1200 kW	2.893	876.087	387.372

In Tabelle 2 werden die acht Testmodelle anhand von Druck-, Geschwindigkeits- und Temperaturparametern verglichen. Für die beiden Dampfturbinen ist die beste Düse diejenige mit der höchsten Geschwindigkeit und dem geringsten Temperaturabfall, wie in Abbildung 28 dargestellt. Ein relativ geringer Temperaturabfall und die damit verbundene hohe Auslasstemperatur kann die Dampfqualität in einem stabilen Zustand halten.

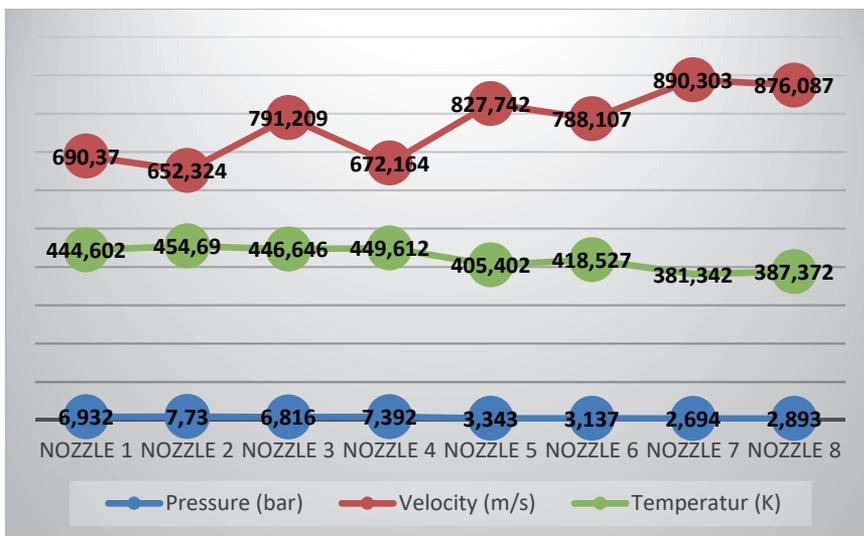


Abbildung 28: Diagramm durchschnittlicher Druck, Geschwindigkeit und Temperatur der Auslassdüsen

Von den acht Versuchsmodellen sind die Düsen 3 und 7 mit kreisförmigem Querschnitt relativ gut geeignet, wobei die konvergent-divergente Düse 7, die höchste Geschwindigkeit von 890,303 m/s hat.

Zusammenfassung

Auf der Grundlage der durchgeführten Simulation zeigen die Simulationsergebnisse, dass die größte Austrittsdampfgeschwindigkeit bei einer konvergent-divergenten Düse mit einem kreisförmigen Querschnitt bei der 1200 kW-Turbine vorliegt, wo der aus der Düse austretende Dampf eine Geschwindigkeit von 890,3 m/s besitzt. Währenddessen liegt die kleinste Dampfgeschwindigkeit bei einer quadratischen Düse an der 800 kW-Turbine vor, wobei der austretende Dampf eine Geschwindigkeit von 652,3 m/s erreicht. Dies war nach der geltenden Theorie nicht erwartet, was die Auswirkungen der Unterschiede in Querschnitt und Abmessungen auf die Ergebnisse des aus der Düse austretenden Dampfdrucks erkennen lässt.

Der aus den Simulationsergebnissen resultierende Dampfdruck zeigt, dass der größte Dampfdruck bei der 800-kW-Düse mit quadratischem Querschnitt 7,73 bar beträgt, während der kleinste Dampfdruck bei der 1200-kW-Düse mit kreisförmigem konvergent-divergentem Querschnitt bei 2,69 bar liegt. Dies ist auf die Umwandlung von Druck in Geschwindigkeit gemäß den theoretischen Grundsätzen

zurückzuführen, so dass eine 800-kW-Düse mit quadratischem Querschnitt einen höheren Austrittsdampfdruck aufweist.

Die höchste Dampftemperatur, die sich aus den Simulationsergebnissen ergibt, liegt bei 800 kW für eine Düse mit quadratischem Querschnitt bei 454,69 K oder 181,69 °C, während die geringste Dampftemperatur bei 1200 kW für eine kreisförmige, konvergierend-divergierende Düse bei 381,342 K oder 108,34 °C liegt.

Literatur

- /1/ Ansar Jilani, S.; Phaneendra, V. CVS.: Design and Analysis of Steam Turbine Nozzle, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 8 Issue 3, p.1162-1166, 2021
- /2/ Mishra, R.; Lohia, D.: CFD Analysis of Convergent and Divergent Nozzle, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 7 Issue 5, p.7639-7643, 2020
- /3/ Kanakaraju, V.; Suresh, N.; Surendar, E.: Structural and Thermal Analysis of Steam Turbine Casing, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 5 Issue10, p.1757-1763, 2018
- /4/ Venkateshwar Reddy, B.; Krishnamachary, P. C.; Chakradhar Goud, S.: Impact Analysis of Nozzle Design In Steam Turbines, Anveshana's International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences, Volume 7 Issue 7, p.25-29, 2022
- /5/ Kareem, B.; Ewetumo, T.; Adeyeri, M. K.; Oyetunji, A.; Olatunji, O. E.: Design of Steam Turbine for Electric Power Production Using Heat Energy from Palm Kernel Shell, Journal of Power and Energy Engineering, Volume 6 Issue 11, p.111-125, 2018
- /6/ Fharukh, A. M. G.; Alrobaian, A.; Aabid, A.; Khan, S. A.: Numerical Analysis of Convergent-Divergent Nozzle Using Finite Element Method, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Volume 8 Issue 6, p.373-382, 2018
- /7/ Rai, R.; Khan, D.; Chauhan, V. K.: Flow Analysis in A Convergent-Divergent Nozzle Using CFD, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, Volume 4 Issue 2, p.32-34, 2017

TUConnect: Der Hochschulinformationstag im Oberharz

Wruck, S.; Dell'Aquila, S.

Am 30. Januar 2025 findet der nächste Hochschulinformationstag (HIT) TUConnect an der Technischen Universität Clausthal statt. Das Konzept richtet sich vorrangig an Oberstufenschülerinnen und -schüler der Jahrgänge 11 bis 13.



On January 30, 2025, the next TUConnect – the University Orientation Day at Clausthal University of Technology – will take place. It is primarily aimed at pupils in years 11 to 13.

Zuhören – Mitmachen – Ausprobieren

Soll ich studieren und wenn ja, was? Diesen Fragen begegnen Jugendliche spätestens in der Oberstufe immer häufiger. Die Berufsorientierung bzw. –findung ist nicht zuletzt aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen Möglichkeiten eine Herausforderung.

Bei der TUConnect, die einmal jährlich (Ende Januar) an der TU Clausthal stattfindet, öffnet die Universität deshalb ihre Türen für studieninteressierte Schülerinnen und Schüler. Das Besondere: Ein individuell auf ihre Interessen abgestimmtes Besuchsprogramm mit Impulsvorträgen, vielen Aktionen, Experimenten sowie einer Info-Messe und direkte Gespräche mit unseren Studierenden.

Das Motto des Tages lautet **Zuhören – Mitmachen – Nachfragen** und soll die Schülerinnen und Schüler dazu motivieren, sich auszuprobieren und einen Überblick über die TU Clausthal geben. Von der Fächervielfalt über die Studienbedingungen vor Ort bis zu den Karrieremöglichkeiten im Anschluss an das Studium.

Die nächste **TUConnect** findet am Donnerstag, den **30. Januar 2025** statt. Weitere Informationen zu Ablauf und Programm gibt es unter <https://www.schulen.tu-clausthal.de/angebote-fuer-schulen/tuconnect>

Anmeldungen sind möglich bis zum **20. Januar**. Es gilt das Prinzip **first come – first serve!**



TU Clausthal

TUConnect

30. Januar 2025

DEIN HOCHSCHUL-
INFORMATIONSTAG
IM OBERHARZ

SAVE THE DATE

Mehr Infos unter



www.tu-clausthal.de



Abbildung 1: Die TU Clausthal lädt zum Hochschulinformationstag ein!

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 17 wissenschaftlichen Mitarbeitern:innen. Weitere 8 Mitarbeiter:innen arbeiten in der Verwaltung, IT, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt. In der mechanischen Werkstatt haben wir aktuell wieder 2 Auszubildende.

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 sechs Verspannprüfständen bis 1 MW, sechs Torsions-Schwingprüfständen bis 500 kNm, zwei kombinierten Umlaufbiege- und Torsionsprüfständen, einem statischen Torsionsprüfstand bis 5 kNm sowie je einer Wechselbiege- und 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 Zerlegung 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 Drahterodiermaschine (Mitsubishi MV2400S) und einer Startlochbohrmaschine (Mitsubishi START43Z). Als CAD/CAM-System wird Siemens NX 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 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 Sauerstoffsensoren, 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 Thermografiecamera 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.

Das LifeLab des IMW bietet eine haptische Lernumgebung für den gesamten Produktentstehungsprozess auf Basis der Circular Economy. Hierfür wurde ein detailliertes Lernkonzept mit aufeinanderbauenden Phasen entworfen. Der Produktentstehungsprozess für einen Transport-Rover soll anhand von Lernstationen durchgeführt werden. Dafür stehen mehrere PC-Arbeitsplätze mit SIEMENS NX CAD- und CAM-Software für Studierende bereit. Ebenfalls können Virtual-Reality-Demonstrationen mithilfe einer Video-Wall und Mixed-Reality-Brillen durchgeführt werden. Ein PRUSA-3D-Drucker steht für das Rapid Prototyping von Komponenten bereit. Für die Simulation und Umsetzung teilautomatisierter Montageschritte wird ein kollaborativer Roboterarm UR5e der Firma Universal Robotics eingesetzt.

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 2015

Veröffentlichungen 2024

Klügel, N.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.: Rechnerische Ermittlung der Dauerfestigkeit von Zahnwellen-Verbindungen mit gesinterter Nabe mithilfe örtlich ermittelter Spannungen. In: Tagungsband zur 10. VDI-Fachtagung Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen 2024, 06./07.11.2024. Seite 3-15, ISBN 978-3-18-092443-4

Krahl, S.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.: Optimierung evolventischer Zahnwellenverbindungen unter Berücksichtigung von fertigungs- und einsetzspezifischen Randbedingungen. In: Tagungsband zur 10. VDI-Fachtagung Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen 2024, 06./07.11.2024. Seite 15-25, ISBN 978-3-18-092443-4

Quanz, M.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; Barton, S.: Zahnwelle mit konditionierbarem Lastsensor und integriertem Energy Harvesting. In: Tagungsband zur 10. VDI-Fachtagung Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen 2024, 06./07.11.2024. Seiten 193-200, ISBN 978-3-18-092443-4

Grünendick, T.; Schäfer, G.: Welle-Nabe-Verbindung durch Planprofilierung „Curvic Coupling“. In: Tagungsband zur 10. VDI-Fachtagung Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen 2024, 06./07.11.2024. Seite 243-248, ISBN 978-3-18-092443-4

Bauer, R.; Reuther, A.; Plesker, C.; Schleich, B.; Inkermann, D.: Methoden und Ansätze zur Entwicklung neuer Lebensdauermodelle und deren Integration in Digitale Zwillinge. Proceedings of the 35th Symposium Design for X, 35th Symposium Design for X, 11.-13.09.2024, Bamberg, Germany. Seite 25-34. DOI: 10.35199/dfx2024

Gansel, R.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.; Barton, S.: Development of Material Sensors Made of Metastable Austenitic Stainless Steel for Load Monitoring. In: Journal of Materials Engineering and Performance. DOI: 10.1007/s11665-024-09910-9

Ammersdörfer, T.; Tartler, D.; Kauffeld, S.; Inkermann, D.: Evaluation of Reflective Behavior in Agile Product Development: A Theoretical Categorization to Evaluate the Effectiveness of Retrospectives in Engineering Teams. In: Proceedings of NordDesign 2024, 12.-14. August 2024, Reykjavik, Island. Seite: 216-255, DOI: 10.35199/NORDDDESIGN2024.24

Hanse, M.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.: Reduction in power loss and increased safety of thrust collar bearings through profiling of the treads – Application of rolling bearing profiles and crowning on thrust collar bearings. In: Tribologie und Schmierungstechnik, Band 71, Ausgabe 2, 08.2024, ISBN: 978-3-381-11591-4, ISBN: 10.24053/TuS-2024-0009

Müller, J.; Ammersdörfer, T.; Luo, Shupe; Grau, R.; Inkermann, D.; Albers, A.: Success factors for measuring agile process changes and their metrics. In: Proceedings of XXXV ISPIM Innovation Conference, Tallinn, Estland, 9.-12. Juni 2024. ISBN 978-952-65069-6-8

Heinrich, C.; Gansel, R.; Schäfer, G.; Barton, S.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.: An approach to interpreting metastable austenitic material sensors for fatigue analysis. In: Smart Materials and Structures, Band 33, Ausgabe 7. DOI: 10.1088/1361-665X/ad4f38

Gansel, R.; Zwoch, S.; Quanz, M.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.; Barton, S.: Development of an energy-autonomous eddy current sensor system for in-situ component monitoring. 20th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2024), 27-31 Mai 2024 in Incheon, South Korea. e-Journal of Nondestructive Testing. DOI: 10.58286/29942

Inkermann, D.; Ammersdorfer, T.: Towards simulation games in engineering design education – design and evaluation of a SE simulation game. In: Proceedings of the Design Society, International Design Conference Volume 4: DESIGN 2024, 20.-23.05.2024, Cavtat, Croatia. Seite 2855-2864, DOI: <https://doi.org/10.1017/pds.2024.289>

Schumacher, T.; Inkermann D.: Investigation of Advantages of Models and the Modelling Process by Introducing a Model Evaluation Concept. In: Proceedings of the Design Society, International Design Conference (DESIGN 2024), 20.-23.05.2024, Cavtat, Croatia. Seite 2735-2744. DOI: 10.1017/pds.2024.276

Quanz, M.; Schäfer, G.; Gansel, R.; Barton, S.; Maier, H. J.; Lohrengel, A.: Auswirkung der Variation des Fußrundungsradius und des Bohrungsdurchmessers in einer sensorintegrierenden Zahn-Hohlwelle auf die Kerbspannungen im Zahnfuß. In: Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2024, 2024, Göttingen, siehe VERLAG - Sierke WWS GmbH, Seiten 145-160. ISBN 978-3-96548-194-7

Gansel, R., Quanz, M., Lohrengel, A.; Maier, H.J.; Barton, S.: Qualification of Austenitic Stainless Steels for the Development of Load-Sensitive Material Sensors. J. of Materi Eng and Perform 33, 9004–9016, 2024, DOI: 10.1007/s11665-024-09287-9

Tartler, D.; Ammersdorfer, T.; Inkermann, D.; Kauffeld, S.: reflAct4-teams – Ein Kodierschema zur Erfassung der Qualität von Reflexion im Rahmen agiler Arbeitsgestaltung. Vortrag auf der Frühjahreskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften (GfA), Stuttgart, März 2024

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 Druckkämmen. 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

Bauer, R.; Inkermann, D.: Selection of model approaches and modelling methods for lifetime prognosis. Proceedings of the Design Society Volume 3, ICED 2023: 24th International Conference on Engineering Design, 24 - 28 July 2023, Bordeaux, France. Seite 3125-3134. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.313>

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 8th 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.; Ammersdorfer T.; Inkermann D.: Development and Application of Simulation Games to introduce Model-Based Systems Engineering. Proceedings of 50th Annual Conference of the European Society for Engineering Education (SEFI), Barcelona, Spanien, 2022

Ammersdorfer, 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/NORDDSIGN2022.26>

Ammersdorfer, 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/NORDDSIGN2022.29>

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 32nd 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

Bauer, R.; Inkermann, D.: Analyse von Degradationsmodellen zur Modellierung der Lebensdauerheterogenität komplexer Systeme. Proceedings of the 33th Symposium Design for X, 33th Symposium Design for X, Hamburg, Germany, 22-23.09.2022. <https://doi.org/10.35199/dfx2022.16>

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

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 Fügetechnik 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

Gröhlich, M.; Bauer, R.; Böswald, M.: Viskoelastische Dämpfungsoptimierung von Flugzeugflügeln. *VDI Verlag GmbH*, 3. VDI Fachtagung Schwingungen, 16. Nov - 17. Nov. 2021, Würzburg, Deutschland. ISBN 978-3-18-092391-8

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/duepublico/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/duepublico/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/duepublico/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/duepublico/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 kerbarme 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.; Erendsson, 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 Vollschmierung 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/drahtfachartikel/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 Profillwellen (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

Erschienenene Institutsmitteilungen seit 2012

 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2012



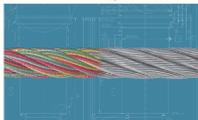
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2013



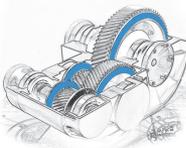
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2014



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2015



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2016



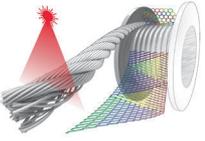
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2017



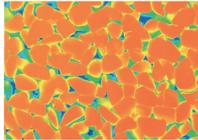
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2018



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2019



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2020



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2021



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2022



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2023



Die jeweiligen Institutsmitteilungen finden Sie ebenso auf unserer Webseite.

Autorinnen und Autoren

Alkountar, Emil: Jahrgang 1997, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 06/2024 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
alkountar@imw.tu-clausthal.de

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

Breidoehr, Markus: Jahrgang 1994, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Clausthal, seit 05/2024 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
breidoehr@imw.tu-clausthal.de

Dell'Aquila, Sofia: Jahrgang 1994, studierte Kulturwissenschaften an der Universität Vechta, seit 03/2024 tätig in der Stabsstelle Presse, Kommunikation und Marketing.
sofia.dellaquila@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

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

Isranuri, Ikhwansyah: Jahrgang 1964, studierte Maschinenbau an der Universität Sumatera Utara /Indonesien, von 1994 bis 1999 Gastwissenschaftler am IMW, Promotion 1999, inzwischen Leiter des Departments „Mechanical Engineering“ an der University of Sumatera Utara

ikhwansyah@usu.ac.id

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

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

Meyer, Johannes: Jahrgang 1996, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 12/2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

meyer@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

Stephan, Roman: Jahrgang 1997, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Clausthal, seit 07/2024 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
stephan@imw.tu-clausthal.de

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

Wruck, Sarah: Jahrgang 1979, studierte Technische Betriebswirtschaftslehre (Studienrichtung: Energiemanagement) an der TU Clausthal, seit 12/2021 Marketingkoordinatorin in der Stabsstelle Presse, Kommunikation und Marketing.
sarah.wruck@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.

