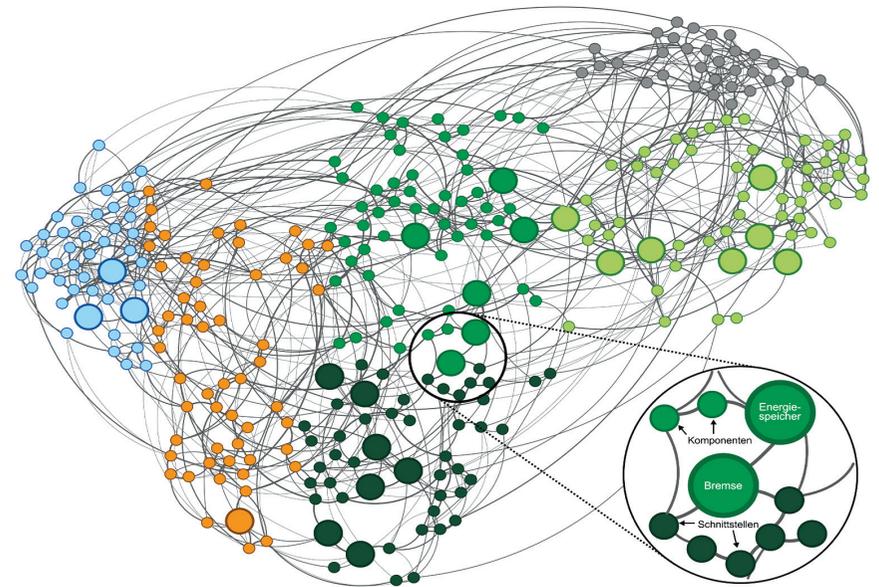


Institutsmitteilung 2025



Institutsmitteilung 2025 (Nr. 50)



Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 50
(Dezember 2025)

Herausgeber:

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

Redaktion und Layout:

Dr.-Ing. Günter Schäfer; Khanh Toan Vo Dan, M. Sc.

Anschrift:

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

Tel: (0 53 23) 72-22 70
E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de
<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Wissensgraph für den Umgang mit Schnittstelleninkompatibilitäten

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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 1

A: Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.
Einfluss von Verschleiß auf die Verdrehkennlinien an Freiläufen 5

Klügel, N.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.
Experimentelle Untersuchungen für den praktischen Einsatz von
Rändelpressverbindungen 13

Lontsi Nongni, B. B.; Lohrengel, A.
Der Zielkonflikt bei der Auslegung von Seiltrommeln: Eine
Parameterstudie zum Einfluss des D/d-Verhältnisses 25

B: Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

Meyer, J.; Ravichandran, D.; Inkermann, D.
Flexibilisierungspotenziale von HLCts in der Design Automation 39

Ammerdörfer, T.; Bhatt, A.; Inkermann, D.
Strukturierte Reflexion zur Anpassung von Entwicklungsmethoden –
Ausschnitt einer experimentellen Studie 51

Bauer, R.; Inkermann, D.
Transfer Learning mittels Bayes-Inferenz: Anwendung und Potenziale
in der Degradationsprognose 63

Schumacher, T.; Inkermann, D.
Kollaboration von Mensch und KI zur Unterstützung von Systems
Engineering-Aktivitäten 73

Stephan, R.; Inkermann, D.
Überprüfung von Schnittstellenkompatibilitäten unter Anwendung von
Wissensgraphen 81

C: Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Vo Dan, K.; Lohrengel, A.</i>	
Vom Batch zur Pilotanlage: Heißluft/Heißdampfverfahren zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen	89
<i>Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.</i>	
Erweiterung eines Prüfstands für Torsionswechsellastversuche unter Temperatur- und Öleinfluss	95
<i>Alkountar, E.; Lohrengel, A.</i>	
Hysteretische Dämpfung metallischer Legierungen infolge innerer Reibung	99
<i>Hanse, M.; Heinrich, C.; Ballmann, A.; Lohrengel, A.</i>	
Spalthöhenmessung mittels LIF und Turbulenzmessungen mittels PIV an einem Tribometer.....	109

D: Hochschule und Kontakte

<i>Krahl, S.; Hanse, M.; Wruck, S.; Ammersdörfer, T.; Inker mann, D.; Lohrengel, A.</i>	
Schülerseminar Maschinenbau 2025.....	119

Ausstattung etc.

Das Institut und seine technische Ausrüstung	123
Veröffentlichungen des Institutes seit 2016	127
Erschienene Institutsmittelungen seit 2013.....	141
Autoren	143
Anfahrt	147

Vorwort

Liebe Projektpartner und Freunde:innen des Instituts für Maschinenwesen,

Unstetigkeit, oder wie wir Ingenieurinnen und Ingenieure sagen würden: *Nichtlinearität*, scheint derzeit die einzige echte Konstante zu sein. Und das spüren wir auch an der Universität. Obwohl es manchmal wirkt, als liefe die Zeit in Clausthal in einem eigenen Takt, befinden wir uns mitten in einem tiefgreifenden Wandel. Das ist herausfordernd, aber vor allem inspirierend: Wir gestalten aktiv die Zukunft unseres Faches und unserer Universität. Künstliche Intelligenz spielt dabei eine immer größere, zugleich kritisch zu reflektierende Rolle. Neue Themenfelder entstehen, unsere Lehre entwickelt sich weiter. Haben Sie schon einmal ausprobiert, sich von einem LLM einen morphologischen Kasten erstellen zu lassen? Es lohnt sich – nicht zuletzt, weil die Ergebnisse eindrucksvoll zeigen, wie wichtig ein kritischer Blick bleibt. Genau hier liegt eine zentrale Aufgabe unserer Ausbildung. Solche Beispiele machen zugleich spürbar, wie intensiv wir über die Weiterentwicklung unserer Lehr- und Forschungsinhalte nachdenken.

Und dieses Jahr bot uns einen zusätzlichen Anlass, nach vorn und zurück zu blicken: 250 Jahre TU Clausthal, ein Jubiläum, das wir mit zahlreichen Aktionen, Veranstaltungen und Beiträgen gefeiert haben. Ein beeindruckender Moment für uns alle und ein schönes Zeichen dafür, wie lebendig und vielfältig unsere Universität ist.

Während wir inhaltlich neue Wege gehen, entwickelt sich auch unsere Hochschule strukturell weiter. Ein umfassender organisatorischer und fachlicher Transformationsprozess hat begonnen, der auch den Maschinenbau an der TU Clausthal neu ausrichtet. Die geplante Neuorganisation der Fakultäten zum 01.04.2026, inklusive neuer Gremien, markiert einen Schritt in eine moderne, zukunftsfähige Hochschullandschaft. Eine Veränderung, die Weichen stellt: für klare Strukturen, stärkere Profile und neue Chancen in Forschung und Lehre.

Auch bei uns am IMW war dieses Jahr bewegter als gewohnt. Mit Martina Wächter verabschieden wir eine Kollegin, die über viele Jahre weit mehr war als eine Mitarbeiterin, sie war eine Institution, im IMW sowie an der gesamten Universität. Mit Sören Krahl führen wir das erfolgreiche Modell der Doppelrolle im IMW und als Geschäftsführer der Fakultät fort. Neu im Team begrüßen wir Khanh Toan Vo Dan und Bristol Bryan Lontsi Nongni, die unsere Forschung in den Bereichen Maschinenelemente und Konstruktionslehre verstärken und wichtige Impulse für die Forschung an Seilen sowie Welle-Nabe-Verbindungen setzen. Ein besonderer Glückwunsch geht an Dr. Apoorv Bhatt, der eine Nachwuchsförderung für sein Forschungsthema zur Circular Economy erhält – ein Projekt mit hoher strategischer Bedeutung für unsere Universität. Und es gibt weitere Gründe zur Freude: Zwei erfolgreich abgeschlossene Promotionen. Miriam Losch hat ihre Dissertation nach dem Wechsel in die Industrie erfolgreich vollendet.

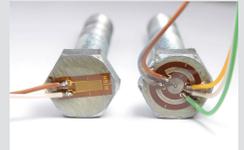
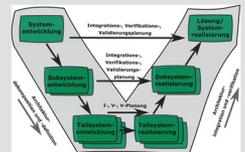
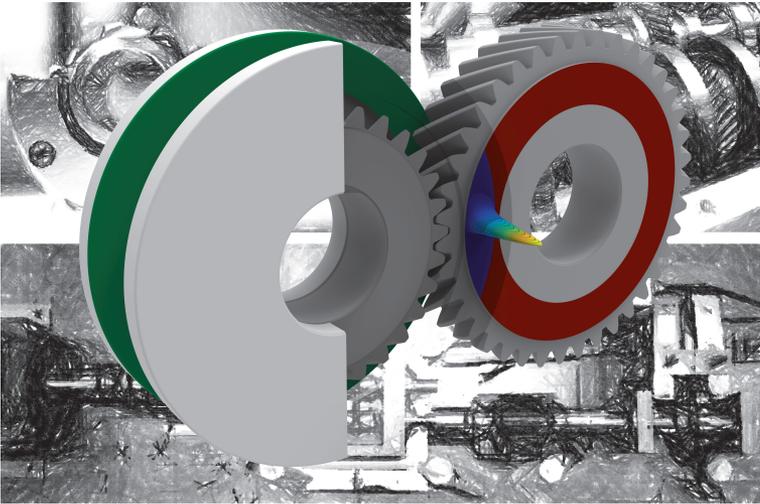
Und ein weiterer Meilenstein: Thomas Schumacher ist der erste Promovierte am Lehrstuhl für Integrierte Produktentwicklung.

Auch in der Forschung war dieses Jahr reich an neuen Impulsen. Unsere Projekte rund um KI in der Produktentwicklung entwickeln sich dynamisch: Vom Einsatz von Wissensgraphen im Model-based Systems Engineering bis hin zu KI-gestützten Planungsprozessen für variantenreiche Produkte. Ein besonderes Highlight startet im Januar 2026: Wir koordinieren einen EFRE-geförderten Innovationsverbund zur zirkulären Produktentwicklung, gemeinsam mit vier wissenschaftlichen Partnern aus Niedersachsen und zahlreichen Industrieunternehmen. Unser Beitrag am IMW konzentriert sich auf die digitale Rekonstruktion und einen Design-Automation-Prozess, der helfen soll, gebrauchte Komponenten effizient in neue Produktgenerationen zu integrieren. Ein Thema mit großem Zukunftspotenzial für Wissenschaft und Industrie. Außerdem freuen wir uns über die zweite Förderphase im DFG Schwerpunktprogramm „Sensorintegrierende Maschinenelemente“ und über den Start des FVA Projekts „Härteprofil“.

Wir als IMW-Team hoffen nun, dass die 50. Ausgabe der Institutsmitteilung auf Ihr Interesse stößt und wünschen Ihnen ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes Jahr 2026.



A



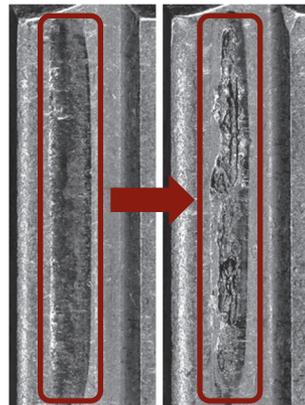
Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen



Einfluss von Verschleiß auf die Verdrehkennlinien an Freiläufen

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

Werden Freiläufe im Schaltbetrieb betrieben, führt Verschleiß meist zum Ausfall. Das Schaltverhalten spielt eine essenzielle Rolle bei der Auslegung von Freiläufen für bestimmte Anwendungsfälle. Verschleißbedingt kann es zu erheblichen Abweichungen vom ursprünglichen Ausgangsschaltverhalten über die Lebensdauer kommen, wie anhand einfacher Lebensdauerersuche gezeigt werden kann.



When freewheels are operated in switching mode, wear usually leads to failure. Switching behaviour plays an essential role in the design of freewheels for specific applications. Wear can cause significant deviations from the original initial switching behaviour over the service life, as can be demonstrated by simple life-cycle tests.

Einleitung

Reibschlüssig arbeitende Freilaufkupplungen gehören zu den selbsttätig schaltenden Kupplungen, wobei in eine Richtung Drehmoment übertragen werden kann und in Gegenrichtung Leerlauf zugelassen wird. Grundsätzlich kann ein Freilauf als Rücklaufsperr, Überholkupplung oder Schaltfreilauf eingesetzt werden. Unterschieden werden die reibschlüssig arbeitenden Freiläufe in die zwei Hauptbauarten Klemmrollenfreilauf und Klemmkörperfreilauf. Weitere konstruktive und geometrische Variationen von Klemmrampenform, Innenstern, Außenstern oder Klemmkörpergeometrie ermöglichen eine optimale Anpassung der Schalteigenschaften an die Einsatzbedingungen.

Damit Freiläufe im Sperrzustand Drehmomente zuverlässig übertragen, existieren einige entscheidende Größen, welche einen Einfluss auf die Funktion und das Schaltverhalten im Freilauf ausüben. Aufgrund des Reibschlusses wirken in den Kontaktpunkten von Klemmelement zu Innenring und Außenring Normalkräfte F_n und Tangentialkräfte F_t , siehe Abbildung 1. Zwischen den Kraftvektoren spannt sich der Klemmwinkel α auf.

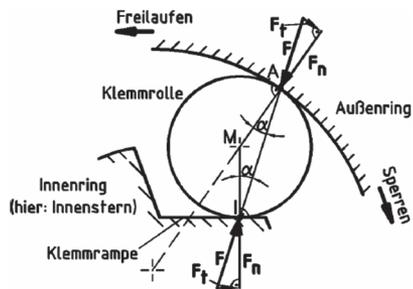


Abbildung 1: Kräfte im Klemmkontakt eines Klemmrollenfreilaufes aus /1/

Hieraus leitet sich das aus /2/ bekannte Funktionskriterium des Freilaufes in Bezug auf den Reibwert ab:

$$\mu > \tan(\alpha) = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

Der Klemmwinkel und der durch geometrische Variation beeinflussbare Klemmwinkelverlauf gelten als zentrales Auslegungswerkzeug, um die Schalteigenschaften eines Freilaufes zu beeinflussen. Der Klemmwinkel ist jedoch nicht direkt messtechnisch erfassbar, sodass häufig der Verdrehwinkel zur Analyse der Schalteigenschaften herangezogen wird. Abhängig vom Klemmwinkel ergibt sich der Verdrehwinkel φ , welcher die Verdrehung von Innen- zu Außenring in Sperrichtung darstellt. Nach /3/ hat auch die Elastizität der Freilaufkomponenten, vornehmlich des Außenrings, einen großen Einfluss auf die Steifigkeit des Systems und beeinflusst das Schaltverhalten maßgeblich mit. Abhängig von der Bauart ergeben sich unterschiedliche und charakteristische Zusammenhänge für Klemmwinkel zu Verdrehwinkel, wie Abbildung 2 skizziert. Entsprechend weisen der Rollenfreilauf mit ebener Rampe, mit Kreisbogenrampe und der Klemmkörperfreilauf individuelle Schaltcharakteristika auf.

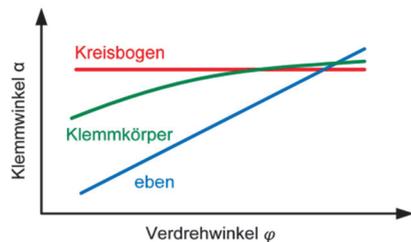


Abbildung 2: Schematischer Zusammenhang von Klemmwinkel und Verdrehwinkel für unterschiedliche Freilaufarten aus /4/

Beim Einsatz von Freiläufen im Schaltbetrieb ist ein präzises Schalten mit hoher Wiederholgenauigkeit erwünscht. Durch häufiges Schalten verschleißt der Freilauf, wodurch Abweichungen vom ursprünglichen Schaltverhalten auftreten. Folgen von Verschleiß am Freilauf im Schaltbetrieb wurden u. a. in /1/, /3/, /5/, /6/, /7/, /8/ und /9/ untersucht. Beim Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe bildet sich nach /1/ durch den kontinuierlichen, abrasiven Verschleiß über die Freilauflebensdauer eine Mulde auf der Klemmfläche. Durch das Abrollen der Klemmrolle durch die Mulde kommt es zu einer Änderung des Klemmwinkels, siehe Abbildung 3. Nach /1/ verringert sich beim Einrollen in die Verschleißmulde der Klemmwinkel (Steifigkeit nimmt ab), beim Verlassen der Rolle aus der Mulde nimmt der Klemmwinkel durch die Steigungsänderung wieder zu (Steifigkeit nimmt zu). Bei fortschreitendem Verschleiß kann es zur Verletzung des Funktionskriteriums nach Gleichung 1 und somit zum Ausfall des Freilaufes kommen.

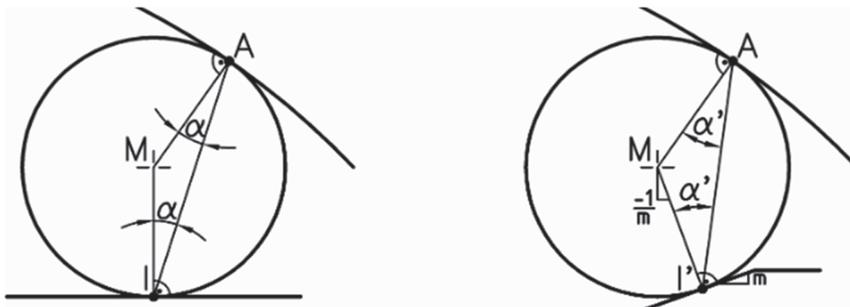


Abbildung 3: Klemmwinkelzunahme durch verschleißbedingte Muldenbildung /1/

Auch bei Klemmkörperfreiläufen wirken Tangential- und Normalkräfte, um im Reibschluss ein Drehmoment zu übertragen. Der Aufbau unterscheidet sich jedoch grundlegend. Der Reibschluss wird durch Verkeilen von speziell geformten Klemmelementen zwischen zylindrischen Ringen erzeugt, siehe Abbildung 4. Im Gegensatz zum Klemmrollenfreilauf, wo die Klemmflächen lokal hoher Belastung und somit starkem Verschleiß ausgesetzt sind, wälzen beim Klemmkörperfreilauf die Klemmelemente über den gesamten Innen- und Außenring ab. Die Freilaufringe werden über den gesamten Umfang gleichmäßig belastet, wohingegen die Klemmelemente stets lokal an denselben Stellen belastet werden und als ausfallkritisches Element im Freilauf gelten. Auch Klemmkörperfreiläufe versagen, sobald die Selbsthemmungsbedingung aus Gleichung 1 nicht mehr erfüllt wird.

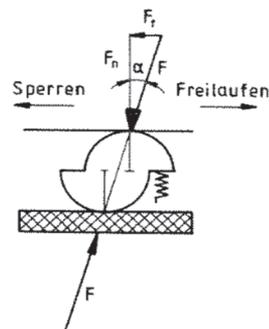


Abbildung 4: Kinematisches Modell eines Klemmkörperfreiläufes

Neben dem Klemmwinkel spielt die Drehfederkennlinie eine große Rolle bei der Betrachtung der Schaltcharakteristik. Die Drehfederkennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Drehmoment und dem sich einstellenden Verdrehwinkel von antreibendem zu abtreibendem Freilauftrieb. Der Vorteil dieser Größe ist, dass die Kennlinie, im Gegensatz zum Klemmwinkel direkt messtechnisch erfasst und ausgewertet werden kann. Die Verdrehkennlinie zeigt einen progressiven Anstieg bei zunehmendem Verdrehwinkel und hängt mit der Geometrie und der elastischen Verformung der einzelnen Freilaufkomponenten zusammen /9/. Rechnerische Grundlagen für Drehfederkennlinien bei Freilaufkupplungen lassen sich in der Literatur kaum finden. Nur in /2/ und /9/ wurden für Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufe einige Beziehungen abgeleitet. Eine Berechnung von Verdrehfederkennlinien der Freiläufe ist stets mit Fehlern behaftet, da für die Bestimmung der erforderlichen elastischen Dehnungen Vereinfachungen angenommen werden müssen /7/. Daher werden vor allem experimentelle Ergebnisse betrachtet.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Lebensdauer von Freiläufen kann an bewährten Schaltprüfständen ermittelt werden, indem der Freilauf bis zu einem definierten Abschaltkriterium (hier: Erreichen einer Verdrehwinkellgrenze, Auftreten von Pop-Outs) betrieben wird. Hierfür schaltet ein Synchronmotor den Freilauf abwechselnd zwischen Freilaufrichtung und Sperrrichtung hin und her, wobei der Winkel in Freidrehrichtung stets größer als in Sperrrichtung ausfällt, um eine vollständige Entlastung des Freilaufes zu garantieren. Der Außenring des Freilaufes ist über eine Drehmomentstütze mit Drehmomentmessung fest eingespannt. Mit zusätzlicher Erfassung des Verdrehwinkels über einen Winkelgeber am Innenring, stehen alle relevanten Daten für die Erstellung von Verdrehkennlinien zur Verfügung. Ein beispielhafter Messschrieb für Torsions- und Winkelmessung ist in Abbildung 5 gezeigt. Gut erkennbar ist die größere Winkelverdrehung in Freidrehrichtung durch den großen negativen Winkel bzw. die Nulllage im Torsionsmessschrieb. Die durchgeführten Lebensdauerversuche erfolgen winkelgeregelt. Das resultierende Torsionsmoment und der Verdrehwinkel am Innenring werden aufgezeichnet. Über die Lebensdauer reduziert sich ohne Korrektur des vorgegebenen Schaltwinkels das resultierende Drehmoment, da die Kontaktflächen im Freilauf abrasiv verschleifen und sich so die Kontaktkräfte reduzieren. Die gemessenen Verläufe und Kennlinien sinken somit über die Lebensdauer ab. Durch die Darstellung des Torsionsmomentes über den Verdrehwinkel kann direkt die Drehfederkennlinie erstellt werden, wie in Abbildung 5 skizziert. Die Drehfederkennlinie gleicht einer Hysterese, da schlupf- bzw. reibungsbedingt Verluste auftreten. Relevant für die Auswertung des Schaltverhaltens sind die in Abbildung 5 blau hervorgehobenen hochlaufenden Äste beim Verdrehen in Sperrrichtung.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen werden Stichversuche an drei Freilauftypen ausgewertet. Es werden ein Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe, ein Rollenfreilauf mit Kreisbogenrampe und ein Klemmkörperfreilauf aus /10/ verwendet. Die verwendeten Prüflinge sind ähnlicher Baugröße mit 30 mm

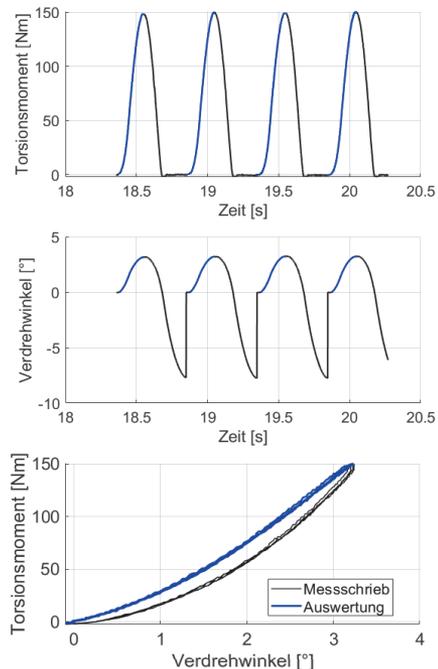


Abbildung 5: Messschrieb eines Freilaufes im Schaltbetrieb (Oben: Torsionsverlauf über Zeit; Mitte: Verdrehwinkel über Zeit; Unten: Verdrehkennlinie)

Innendurchmesser und 62 mm bzw. 41 mm Außendurchmesser für die Rollenfreiläufe mit ebener Klemmrampe bzw. Kreisbogenrampe. Der Klemmkörperfreilauf ist mit 15 mm Innen- und 47 mm Außendurchmesser insgesamt etwas kleiner dimensioniert. Die Versuche wurden jeweils bis zum Versagen durch Verschleiß durchgeführt. Anhand der ausgewählten Versuche soll grundlegend das in der Literatur beschriebene Verhalten der Verdrehkennlinien nachvollzogen werden.

Versuchsauswertung

Im Rahmen von Lebensdauer-Schaltversuchen an Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufen aus /10/ wurden an ausgewählten Versuchen die Verdrehkennlinien aufgezeichnet. Die sich über die Lebensdauer verändernden Verläufe der Drehfederkennlinien werden mit Erkenntnissen der Literatur verglichen. Während der Schaltversuche verändern sich die aufgezeichneten Kennlinien z. T. erheblich, sodass ein großer Einfluss auf das ursprüngliche Schaltverhalten vorliegt. Diese Einflüsse werden im Folgenden gezeigt.

Klemmrollenfreilauf ebene Klemmrampe

Für die Betrachtung der Kennlinienänderungen am Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe wird ein ausgewählter Versuch herangezogen. Abbildung 6 zeigt eine Auswahl der, über die gesamte Lebensdauer in regelmäßigen Abständen erfassten, Drehfederkennlinien. Die Kennlinien wurden jeweils nach der in der Legende angegebenen Lastwechselzahl aufgenommen.

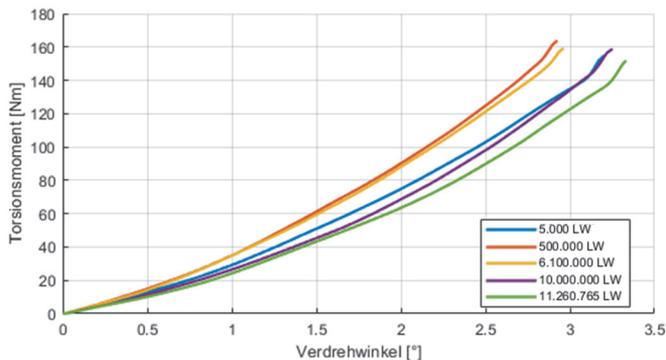


Abbildung 6: Verdrehkennlinien vom Klemmrollenfreilauf mit ebener Klemmrampe und typisches Schadensbild nach Versuchsende

Die Drehfederkennlinien zeigen erwartungsgemäß Abweichungen zueinander. Zunächst liegen die Kennlinien mit zunehmender Lebensdauer erheblich über der Ausgangskennlinie. Gegen Ende der Freilauflebensdauer erfolgt schließlich eine

Absenkung der Lage der Drehfederkennlinie auf zunächst die der Ausgangskennlinie und anschließend, zum Zeitpunkt des Ausfalls, auf unterhalb dieser. Grundsätzlich decken sich die Versuchsergebnisse mit den Angaben der Literatur aus /1/ und /4/. Beim Durchrollen der sich ausbildenden Mulde verändert sich die Steifigkeitscharakteristik des Freilaufes. Der erwartete „bauchiger“ werdende Verlauf ist nicht so stark ausgeprägt wie erwartet, kann aber anhand der Kennlinie von „10.000.000 LW“ dennoch im Vergleich zur Ausgangskennlinie erkannt werden. Die Absenkung der Kennlinien gegen Ende der Lebensdauer ist darauf zurückzuführen, dass der vorgegebene Winkel nicht korrigiert wird. Verschleißbedingt kann bei gleichem Winkel weniger Drehmoment übertragen werden. Die Klemmrollen rollen in die Verschleißmulde ab, jedoch nicht mehr bis auf die aufsteigende Flanke hinauf, sodass der erwartete Anstieg durch die Klemmwinkeländerung ausbleibt.

Klemmrollenfreilauf Kreisbogenrampe

Der Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe zeichnet sich durch eine spezielle Rampengeometrie aus. Diese zeigt sich in Abbildung 7 am linearen Verlauf der ersten Messung des Versuches (blauer Verlauf).

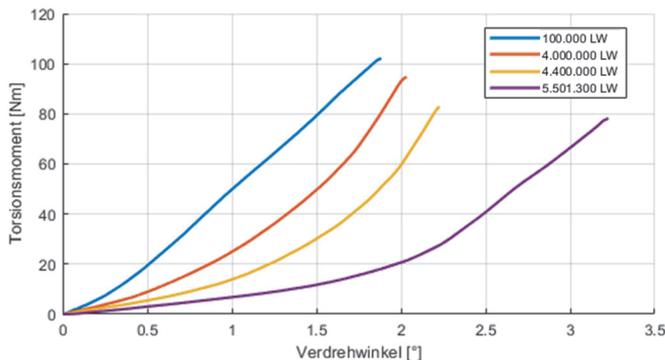


Abbildung 7: Verdrehkennlinien vom Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe und typisches Schadensbild nach Versuchsende

Über die Lebensdauer des Freilaufes weichen die Verdrehkennlinien immer weiter von der Ausgangsform ab und werden bauchiger. Insgesamt wird das Freilauverhalten weicher, sodass die Verdrehkennlinie absinkt und eine Verschiebung nach rechts auf der Abzisse aufweist. Beim Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe ist die Kennlinienänderung über die Lebensdauer gravierend. Der Verschleiß bedingt eine starke Zunahme des Klemmwinkels, bei gleichzeitiger Abnahme des übertragbaren Drehmomentes und der Steifigkeit. Dieser Effekt ist deutlich stärker ausgeprägt als beim Rollenfreilauf mit ebener Klemmrampe. Dies ist vermutlich auf die Form der Klemmrampe zurückzuführen. Die bogenförmigen Klemmrampen

verstärken die Steigung in der Verschleißmulde zusätzlich, sodass der Klemmwinkel und damit indirekt der Verdrehwinkel größeren Änderungen unterworfen ist.

Klemmkörperfreilauf

Auch der Klemmkörperfreilauf zeigt anfangs den erwarteten typischen Verlauf. Mit zunehmendem Verdrehwinkel wächst das Torsionsmoment progressiv an, wie Abbildung 8 zeigt.

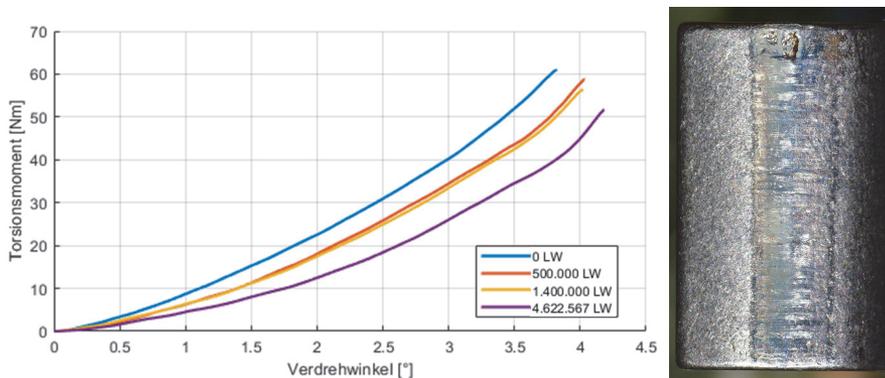


Abbildung 8: Verdrehkennlinien vom Klemmkörperfreilauf und typisches Schadensbild nach Versuchsende

Mit fortschreitender Lebensdauer werden die in Abbildung 8 geplotteten Kurven bauchiger und zeigen das weniger steife Verhalten vom Freilauf mit zunehmendem Verschleiß. Auch hierbei bewirkt der Verschleiß eine Veränderung der Kontaktgeometrie. Anders als beim Rollenfreilauf können beim Klemmkörperfreilauf keine Verschleißmulden entstehen. Durch das Abwälzen der Klemmkörper auf den Freilauftringen verschleifen diese gleichmäßig. Die Klemmelemente selbst weisen hingegen lokal erhöhten Verschleiß auf, sodass sich die Kontaktgeometrie verändert und die Abweichungen in den Kennlinien verursacht werden. Ausfallursache ist bei den Klemmkörperfreiläufen daher oftmals ein Versagen der Klemmelemente selbst.

Zusammenfassung

Anhand einzelner Stichversuche wurden Verdrehkennlinien über die Freilauflebensdauer hinweg ermittelt und untersucht. Die Verläufe entsprechen den aus der Literatur bekannten Angaben. Es wurde gezeigt, dass typabhängig Freiläufe Steifigkeitsänderungen im Schaltverhalten über die Lebensdauer aufweisen bis es zum Versagen der Prüflinge kommt. Die Lage der Ausgangskennlinien zu Beginn der Versuche passt zu den typabhängig üblichen Verläufen, sodass die Messergebnisse als plausibel angenommen werden können. Anhand der Auswertung von jeweils nur einem Prüfling besteht jedoch keine statistische Absicherung. Einfluss

auf die Lage und die Veränderungen der Kennlinien über der Lebensdauer hat die Art der Versuchsdurchführung. Werden die Versuchsparameter verschleißbedingt nachgeregelt, sodass stets ein konstantes Drehmoment erreicht wird, zeigen sich die in der Literatur benannten bauchigen Verläufe mit Endlagen über der ursprünglichen Ausgangslage deutlicher, da dabei die Verschleißmulden stets komplett durchrollt werden. In den dargestellten Versuchen ist der Abfall der Kennlinien durch den Verzicht auf eine Nachregelung verstärkt und die „Bauchigkeit“ weniger ausgeprägt, grundsätzlich gleichen die Ergebnisse aber den Erwartungen. Ergänzend zu den gezeigten Versuchen konnten ähnliche Beobachtungen bzgl. der Verdrehkennlinien auch bei weiteren Versuchen mit baugleichen Prüflingen im Rahmen von /10/ unter reiner Torsion und unter kombinierter Last (Torsion und Radiallast) festgestellt werden.

Literatur

- /1/ Hüllenkremer, M.; Loos, J.: Einfluss von Teillastungen auf die Lebensdauer von Klemmfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 464 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 2008
- /2/ Stölzle, K.; Hart, S.: Freilaufkupplungen: Berechnung und Konstruktion; Springer-Verlag, 1961, ISBN: 3-64251-094-9
- /3/ Tönsmann, A.; Jordan, W.: Schaltverschleiß bei Rollenfreiläufen. Forschungsvorhaben FVA 103 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1989
- /4/ Martinewski, V.; Nagler, N.; Qian, B.; Lohrengel, A.; Ochse, G.: Freilauf Lebensdauer – kombinierte Radial- und Drehmomentenbelastung. Forschungsvorhaben FVA 694 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 2018
- /5/ Welter, R.; Peeken, H.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 137 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1990
- /6/ Deppenkemper, P.; Peeken, H.; Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 137 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1993
- /7/ Deppenkemper, P.; Lohrengel, A.; Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb. Forschungsvorhaben FVA 137 III der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1999
- /8/ Biemann, W.; Gerve, A.; Vogg, H.: Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Klemmfreiläufen mit Radionuklidverfahren. Forschungsvorhaben FVA 21 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 1980
- /9/ Timptner, K.: Berechnung von Drehfederkennlinien und zulässiger Drehmomente bei Freilauf-Kupplungen mit Klemmkörpern. Dissertation, Hochschule Darmstadt, Papierflieger, 1974.
- /10/ Duchateau, F.; Ochse, G.; Lohrengel, A.; Rienäcker, A.: Einfluss kombinierter Zusatzlasten auf die maximale Hertzsche Pressung beim Klemmrollen- und Klemmkörperfreilauf. Forschungsvorhaben FVA 694 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. Frankfurt am Main, 2025

Experimentelle Untersuchungen für den praktischen Einsatz von Rändelpressverbindungen

Klügel, N.; Schäfer, G.; Lohregel, A

Im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen FVA-Eigenmittelvorhabens Nr. 1045 I „Rändel2Standard“ wurden am IMW experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des Nabenaußendurchmessers auf das Füge- und statische Übertragungsverhalten von Außenrändelpressverbindungen durchgeführt. Zusätzlich wurde die Möglichkeit der Absicherung des statisch übertragbaren Torsionsmoments auf Basis einfach ermittelbarer geometrischer und im Fügeprozess auftretender Größen diskutiert.



As part of the recently completed FVA own-funds project No. 1045 I 'Rändel2Standard', experimental investigations were carried out at the IMW to determine the influence of the outer hub diameter on the joining and static transmission behaviour of a shaft-hub-connection with interference fit and a knurled shaft. In addition, the potential for ensuring the statically transferable torque based on easily determinable geometric variables and those occurring during the joining process was discussed.

Stand der Technik

Rändelpressverbindungen (RPV) sind kombiniert form-/reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen, welche aus einem profilierten, harten Fügepartner und einem weichen Gegenkörper bestehen. Wird der harte Fügepartner in den mit einem Übermaß behafteten Gegenkörper gefügt, bildet sich im weichen Körper ein Gegenprofil aus. Hierdurch wird eine leistungsfähige spielfreie Verbindung erzielt.

Als Profilierung des harten Fügepartners dient eine Rändelung mit achsparallelen Riefen, mögliche Profile sind die Rändelform RAA nach /1/ oder der Typ A nach /2/. Abhängig davon, ob die Profilierung des Innen oder Außenteils erfolgt, lassen sich zwei Typen der RPV unterscheiden. Der Außenrändelpressverband (ARPV) besteht aus einer gerändelten Welle, die in eine weiche Nabe mit zylindrischer Bohrung gefügt wird. Der Innenrändelpressverband (IRPV) beschreibt den umgekehrten Fall einer Verbindung aus einer weichen Welle und einer harten innengerändelten Nabe.

Die Rändelung nach /1/ kann entsprechend Abbildung 1 durch den Außendurchmesser D_1 , die Teilung t und den Öffnungswinkel α beschrieben werden. Der Öffnungswinkel beträgt für alle gängigen Verfahren ca. 90° oder 105° . Durch

geringfügige Anpassungen des Öffnungswinkels oder der Teilung kann eine ganzzahlige Zähnezahl für den festgelegten Außendurchmesser erzielt werden.

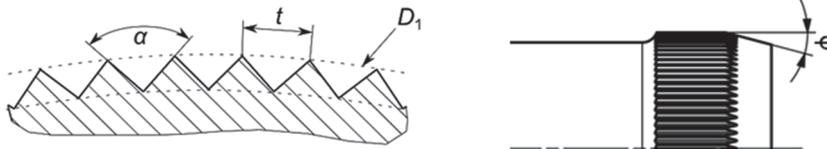


Abbildung 1: Ideale Rändelgeometrie /3/

Weitere relevante Größen der Verbindung sind der Fasenwinkel φ am Profilbeginn, die Fügelänge l_F sowie das geometrische Übermaß U_{geo} als Differenz aus Wellenaußendurchmesser D_1 und Nabeninnendurchmesser D_{iA} .

$$U_{geo} = D_1 - D_{iA} \quad (1)$$

Der Fasenwinkel φ definiert die Art des Fügevorgangs. Für kleine Fasenwinkel bis $\varphi = 15^\circ$ erfolgt der Fügevorgang formend. Ab einem Fasenwinkel von 60° erfolgt der Fügevorgang überwiegend schneidend, die Gegenprofilbildung in der Nabe erfolgt in diesem Fall spanend. Im Bereich $15^\circ < \varphi < 60^\circ$ treten sowohl umformende als auch schneidende Prozesse auf, wie die Untersuchungen von Lätzer zeigen /4/. In der praktischen Anwendung sind solche hybriden Verbindungen aufgrund der unklaren Prozessanteile zu vermeiden.

Sowohl das statische als auch das dynamisch übertragbare Torsionsmoment liegt bei formenden ARPV aufgrund der Verfestigung des umgeformten Werkstoffs nach den Ergebnissen von Lätzer /4/ und Mänz /5/ höher als bei schneidend gefügten. Gleichzeitig sind gegenüber schneidend gefügten Verbindungen höhere Fügekräfte erforderlich.

Das geometrische Übermaß U_{geo} hat bei formend gefügten ARPV einen deutlichen Einfluss auf das übertragbare Torsionsmoment. Das theoretisch maximale Übermaß bei einem Öffnungswinkel $\alpha = 90^\circ$ beträgt $U_{geo,max} = t$. Die statische Übertragungsfähigkeit kann bei gleichzeitiger Zunahme der Fügekräfte bis zu einem Übermaß $U_{geo} = 2/3 t$ gesteigert werden /4/. Größere Übermaße führen lediglich zu einer geringen Steigerung des übertragbaren Torsionsmoments. Der Einfluss der Teilung auf das übertragbare Torsionsmoment wird dagegen als vernachlässigbar eingestuft /5/.

Der Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren der Rändelung auf das Füge- und Übertragungsverhalten des ARPV wurde von Mörz untersucht /6/. Verglichen wurden gewalzte, wälzgefräste und rändelgefräste Wellen. Zusätzlich erfolgte eine Modifikation der Rändelung durch Überschleifen der Zahnköpfe mit dem Ziel die Zentriergenauigkeit zu verbessern. Zudem wurden die Rändelung im Gegensatz zur Geometrie nach /1/ (vgl. Abbildung 1) mit einer definierten Zahnfußausrundung versehen, um die Kerbwirkung auf die Welle zu reduzieren. Es wurden umfangreiche statische und dynamische Torsionsversuche mit den Nabenwerkstoffen C45-N und EN AW 5083 durchgeführt. Die Verbindung konnte durch die Profilmifikationen soweit optimiert werden, dass bei einer Fügelänge $l_F = D_F/2$ und dickwandiger Stahlnabe im Versuch ein Versagen der Welle außerhalb der Verbindung erreicht wurde.

Aus den bisherigen Untersuchungen ist bekannt, dass ARPV mit dünnwandigen Naben ein geringeres übertragbares Torsionsmoment aufweisen. Zugleich verringert sich die Fügekraft. Die Dünnwandigkeit der Nabe wird durch das Wanddickenverhältnis Q_A ausgedrückt, welches das Verhältnis vom Innendurchmesser D_{iA} zum Außendurchmesser der Nabe D_{aA} angibt.

$$Q_A = \frac{D_{iA}}{D_{aA}} \quad (2)$$

Bisherige Untersuchungen konzentrierten sich neben dem Wanddickenverhältnis auf die Untersuchung der weiteren Einflussparameter. Aus diesem Grund liegen für dünnwandige Naben mit $Q_A \leq 0,5$ nur vergleichsweise wenige Versuche vor. Untersuchungen zum Einfluss der Nabenwanddicke wurden von Mänz /5/ und Mörz /6/ an Stahl- und Aluminiumnaben mit einem Wanddickenverhältnis $Q_A = 0,5$ und $Q_A = 0,8$ durchgeführt. Generell sinken Fügekraft und übertragbares Drehmoment mit steigendem Wanddickenverhältnis, da die Nabe sich mit zunehmender Dünnwandigkeit beim Fügen stärker aufweitet und damit weniger Formschluss ausbildet wird. Die Untersuchungen über den gesamten Fasenwinkelbereich (5° bis 90°) von Suchý et al. zeigen zudem, dass der Effekt besonders bei formend gefügten ARPV stark ausgeprägt ist /7/. Zur Steigerung der Übertragungsfähigkeit wurde die Nabe in den Untersuchungen von Mörz während des Fügevorgangs am Außendurchmesser abgestützt, sodass eine Übertragung der Ergebnisse auf nicht abgestützte dünnwandige Naben nicht direkt möglich ist.

Um den Einfluss der Nabenwanddicke für die allgemeine Anwendung in einer Norm quantifizieren zu können, und Anwendungsgrenzen für ARPV mit dünnwandigen Naben angeben zu können waren daher Untersuchungen mit weiteren Nabenwanddicken erforderlich.

Berücksichtigung der realen Rändelgeometrie

Die reale Rändelgeometrie weist einige Abweichungen vom Profil nach /1/ auf. Die genormte Geometrie beschreibt einen ideal spitzen Rändel. Dagegen entsteht bei den üblichen Herstellungsverfahren immer ein Rändel mit einem unvollständig ausgebildeten Zahnkopf, vgl. Abbildung 2. Zudem wird die Verwendung einer Fußausrundung zur Reduktion der Kerbwirkung der Welle empfohlen. Eine vereinfachte Beschreibung der Geometrie ist in Abbildung 3 durch die Betrachtung als Rändel mit abgetragenen Zahnköpfen möglich. Der erzeugte Außendurchmesser D_1 wird als Funktionsmaß festgelegt. Als wesentliche Dimension zur Beschreibung der Größe des nicht vollständig ausgeprägten Rändels ist die Höhendifferenz Δh_R zum idealen Rändel ($D_{1,ideal}/2$) nutzbar. Als ein mit Werkstattmitteln messbares Maß wurde von Mörz das Abtragverhältnis a eingeführt /6/.

$$a = \frac{z_{KB}}{t} = \frac{z_{KB}}{z_{KB} + z_{LW}} \quad (3)$$



Abbildung 2: gewalzte Rändelung der Versuchsteile

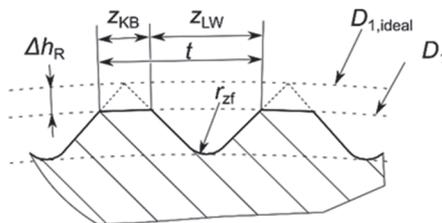


Abbildung 3: Geometriedefinition bei unvollständig ausgeformtem Rändel /3/

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Nabenwanddicke

Zur Ermittlung des Einsatzpotentials der ARPV bei dünnwandigen Naben wurden Füge- und statische Torsionsversuche an acht Varianten mit verschiedenen Wanddickenverhältnissen durchgeführt. Die untersuchten Varianten sind in Tabelle 1

aufgeführt. Untersucht wurden jeweils vier verschiedene Wanddickenverhältnisse mit zwei verschiedenen Nabenwerkstoffen, die Welle ist jeweils aus 16MnCr5.

Tabelle 1: Untersuchte Varianten

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8
Q_A	0,65	0,70	0,75	0,80	0,65	0,70	0,75	0,80
Nabenwerkstoff	St	St	St	St	Al	Al	Al	Al
St: C45-N								
Al: EN AW-5083								

Die Werkstoffeigenschaften sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die genutzten Wellen besitzen eine gewalzte Rändelung mit einem mittleren Außendurchmesser von $D_1 = 30,621$ mm, einer Zähnezahl $z = 95$ und einer Teilung $t = 1$ mm. Der Nenn-Innendurchmesser der Naben beträgt $D_{iA} = 30,1$ mm, die Fügelänge aller Prüfteile beträgt $l_F = 6$ mm. Die Form der Rändelung in Abbildung 2 zeigt eine deutliche Verrundung der Zahnköpfe infolge des Walzprozesses. Die Messung der Zahndicken an acht aufgeschnittenen Proben ergibt ein mittleres Abtragverhältnis $a = 0,208$.

Tabelle 2: Werkstoffdaten

Werkstoff	C45 /5/	EN AW-5083 /5/	16 MnCr5 /6/ (Anlieferungszustand)
E-Modul* E in MPa	210.000	70.000	210.000
Streckgrenze R_P in MPa	341	136	365,8
Zugfestigkeit R_m in MPa	649	291	651,6
Bruchdehnung A in %	18	21	23,3
* Literaturwert			

Je Variante wurden vier Proben gefügt. Verwendet wurde hierzu die in /6,8/ beschriebene Fügevorrichtung. Aufgezeichnet wurden Fügekraft und Fügeweg, ein beispielhafter Fügekraftverlauf ist in Abbildung 4 dargestellt. Vor dem Fügen wurde die Rändelung der Welle mit Öl benetzt um ein Fressen während des Fügevorgangs zu unterbinden. Nach dem vollständigen Eindringen der Welle in die Nabe zu Beginn, steigt die Fügekraft deutlich geringer aufgrund der Umformvorgänge in der Nabe bis zum Erreichen der maximalen Fügekraft $F_{f,max}$ an. Hiernach finden keine Umformvorgänge mehr in der Nabe statt, die Welle wird lediglich bis in ihre Endposition verschoben. Die Kraft fällt dabei auf eine Reibkraft F_R ab, ausgewertet wird hierzu die minimale Kraft nach dem Erreichen der maximalen Fügekraft $F_{f,max}$.

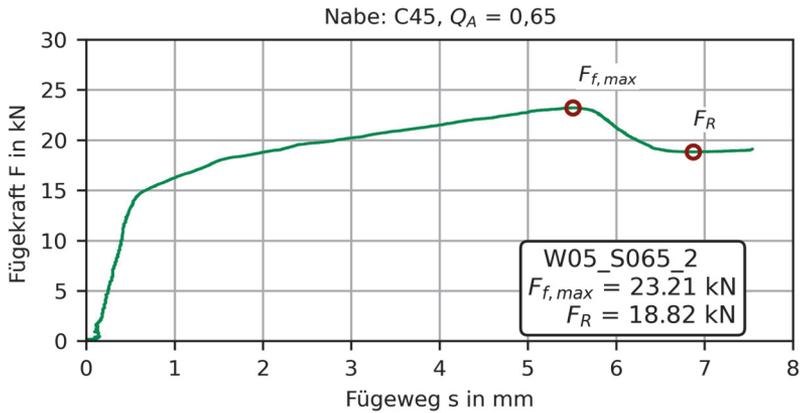


Abbildung 4: Fügekraftverlauf

Der Einfluss des Wanddickenverhältnisses ist in Abbildung 5 für beide untersuchten Nabenwerkstoffe dargestellt. Aufgrund der Anzahl der Einzelversuche je Variante kennzeichnen die Fehlermarker die Streuweite der Ergebnisse. Es zeigen sich deutlich abnehmende Fügekräfte mit ansteigendem Nabenwanddickenverhältnis. Zudem lässt sich feststellen, dass die bisher aufgrund mangelnder Versuchspunkte getroffene Annahme einer linearen Interpolation für den betrachteten Bereich der Nabenwanddicken zutreffend ist.

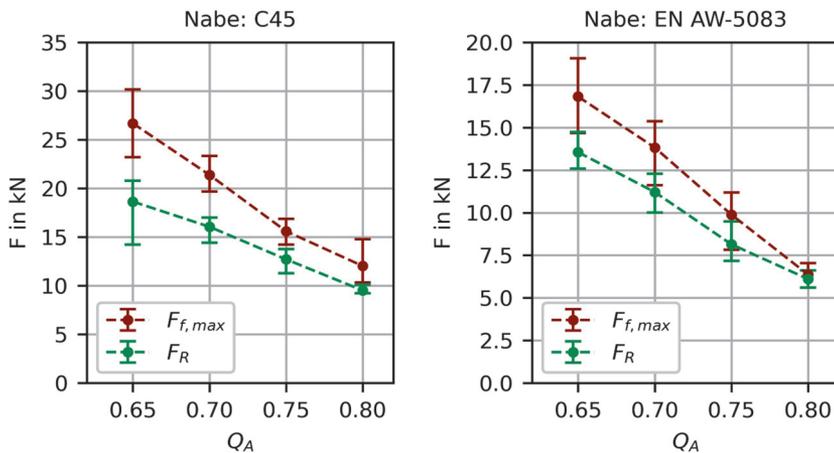


Abbildung 5: Übersicht über die durchgeführten Fügeversuche

Mit drei Proben je Variante wurde nach dem Fügen ein statischer Torsionsversuch durchgeführt. Der Aufbau des verwendeten elektromotorischen Prüfstands entspricht dem in /6, 8/ verwendeten. Das aufgebrachte Drehmoment wird quasi-statisch gesteigert, bis das maximale statische Torsionsmoment $M_{T,max}$ erreicht wird. Nach Erreichen des maximalen Torsionsmoments wird der Verdrehversuch fortgesetzt, bis ein Verdrehwinkel γ von etwa 15° erreicht wird. Eine exemplarische Auswertung eines Torsionsversuchs ist in Abbildung 6 dargestellt. Analog zum Zugversuch /9/ kann eine elastische Gerade identifiziert werden. Für die Auswertung wird die Steigung der elastischen Geraden mithilfe einer linearen Regression im Bereich zwischen beiden markierten Stützstellen ermittelt. Der Sprung unterhalb der ersten Stützstelle wird durch Spiel im verwendeten Winkelmesssystem verursacht. Der dargestellte Verlauf ist um diesen Anfangsfehler kompensiert. Mithilfe der elastischen Gerade kann das elastische Grenzmoment $M_{T,stat}$ bestimmt werden. Als Grenze wird eine Abweichung von 2% vom Verlauf der elastischen Gerade definiert. Da die ausgeformte Rändelung der Nabe oberhalb des Zahnfußes abscher, weist die Verbindung nach überschreiten des maximalen Torsionsmoments eine geringe Resttragfähigkeit auf. Es zeigen sich kleinere Maxima im Verlauf des Torsionsmoments etwa im Abstand der Rändelung ($3,79^\circ$).

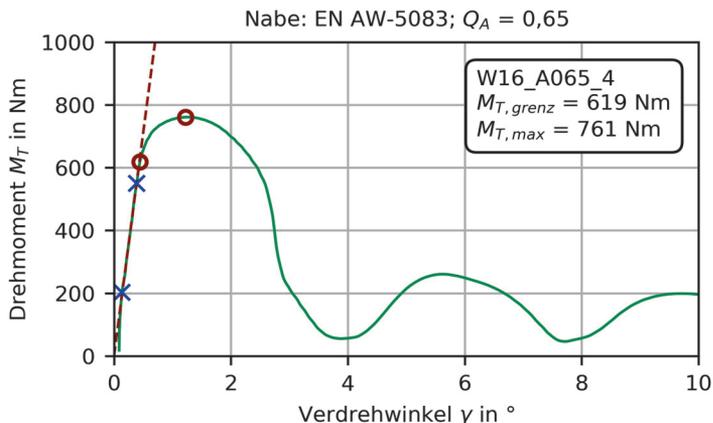


Abbildung 6: statischer Torsionsversuch

Der Einfluss der Nabenwanddicke auf das statisch übertragbare Torsionsmoment ist in Abbildung 7 dargestellt. Auch hier lässt sich ein näherungsweise linearer Einfluss der Nabenwanddicke erkennen. Auffällig sind die übertragbaren Torsionsmomente bei der dünnsten Nabenwanddicke ($Q_A = 0,8$), welche im direkten Vergleich zu den Versuchsergebnissen von Mörz /6/ geringer sind. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass Mörz die dünnwandigen Naben mithilfe eines Stützringes gefügt hat. Dieser versteift die Nabe und verringert die Aufweitung der Nabe während des Fügevorgangs, wodurch die Ausbildung eines Gegenprofils in der Nabe unterstützt wird. Dagegen wurde in den hier dargestellten Versuchen bewusst

auf einen Stützring verzichtet, da die Ermittlung der Anwendungsgrenzen von ARPV mit dünnwandiger Nabe Gegenstand der Untersuchungen war.

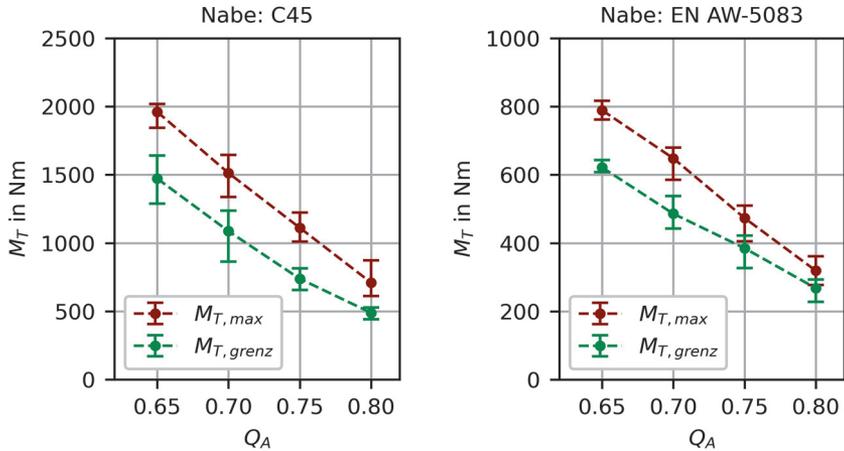


Abbildung 7: Ergebnis der statischen Torsionsversuche

Um das ausgebildete Gegenprofil in der Nabe bewerten zu können, wurde von jeder Variante eine Probe nach dem Fügen in der Fügezone aufgetrennt. Der Vergleich der Gegenprofilausprägungen in der Schnittebene in einem Abstand von 4 mm zur Nabenkante in Abbildung 8 zeigt, dass die tragende Höhe des formschlüssig übertragenden Gegenprofils bei einem Nabenwanddickenverhältnis von $Q_A = 0,8$ deutlich reduziert ist. In dieser Konfiguration führt das geometrische Übermaß im Wesentlichen zu einer Aufweitung der Nabe und nur in geringem Maße zu einer Ausbildung eines Formschlusses in der Verbindung. Aus diesem Grund ist für ein Nabenwanddickenverhältnis $Q_A \geq 0,75$ eine Abstützung der Nabe, etwa durch einen Stützring zu empfehlen.

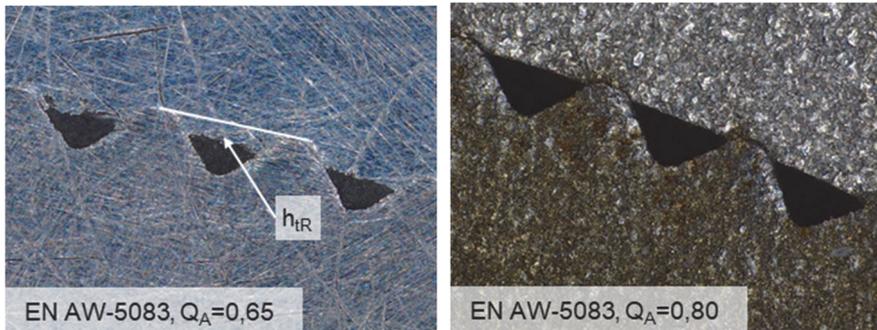


Abbildung 8: Ausprägung des geformten Gegenprofils in der Verbindungsmittle

Prozessabsicherung und Qualitätssicherung

Für die praktische Anwendung eines ARPV ist die zuverlässige Einhaltung eines geforderten elastischen Grenz- und eines Maximalmoments erforderlich. Neben einer analytischen Auslegung im Entwicklungsstadium ist eine Überwachung der laufenden Fertigung gefordert. Hierfür gilt es einfach messbare Größen zu definieren, welche als Indikator für das übertragbare Torsionsmoment dienen. Hierdurch können ungenügende Verbindungen durch eine Eingangs-Qualitätskontrolle aussortiert werden.

Da das Gegenprofil der Rändelpressverbindung im Fügeprozess selbsttätig ausgebildet wird, sind im Gegensatz zu Passverzahnungen nach /10/ Teilungsabweichungen und Abweichungen der Profilform ohne Bedeutung für die Fügbarkeit und die Übertragungsfähigkeit der Verbindung. Relevante Einflüsse auf das übertragbare Torsionsmoment sind das geometrische Übermaß U_{geo} zwischen dem Funktionsdurchmesser D_1 und dem Innendurchmesser der Nabe D_{IA} und das Abtragverhältnis a der Rändelung. Diese Größen beeinflussen wesentlich das im Umformprozess verdrängte Volumen in der Nabe und damit den Umformgrad des Nabenwerkstoffs.

Das Abtragverhältnis der untersuchten Rändelung weist nur geringe Schwankungen auf. Da alle Wellen in einer Charge gewalzt wurden, besteht zudem ein direkter Zusammenhang zum Außendurchmesser der Welle D_1 . Die durchgeführten Untersuchungen beschränken sich daher auf den Einfluss des geometrischen Übermaßes. Zur Bestimmung werden der Wellenaußendurchmesser und der Innendurchmesser der Nabe vor dem Fügen mit einer Koordinatenmessmaschine erfasst. Zur Bestimmung des Funktionsdurchmessers D_1 der Rändelung wird der Hüllkreis über die Zahnköpfe erfasst. Aber auch eine Messung mit einer Bügelmessschraube ist grundsätzlich möglich. Die Messungen zeigen, dass das geometrische Übermaß wesentlich vom Durchmesser der Rändelung beeinflusst wird, da dieser prozessbedingt durch das Walzen der Rändelung eine größere Streuung aufweist als die gedrehte Nabe. Die Toleranz des Funktionsdurchmessers D_1 der Rändelung lässt sich etwa in die Toleranzklasse IT 9 nach /11/ einsortieren, wohingegen der Innendurchmesser der Nabe entsprechend der Fertigungsunterlagen mit der Toleranzklasse IT 7 toleriert ist.

Die Betrachtung des Einflusses des geometrischen Übermaßes auf das maximal übertragbare Torsionsmoment erfolgt in Abbildung 9. Um alle Untersuchungen eines Nabenwerkstoffes miteinander vergleichen zu können, werden die erzielten Torsionsmomente auf das mittlere Maximalmoment $M_{Tmax,m}$ der einzelnen Versuchsreihen bezogen. Es zeigt sich unabhängig vom Nabenaußendurchmesser ein Zusammenhang zwischen geometrischem Übermaß und übertragbarem Torsionsmoment.

Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, dass ein erforderliches geometrisches Übermaß definiert werden kann. Die hierfür erforderliche Überprüfung des Funktionsdurchmessers D_1 der Welle sowie des Innendurchmessers D_{IA} der Nabe

kann mit Werkstattmitteln erfolgen. Da bis zu einem geometrischen Übermaß von $U_{\text{geo}} = 2/3t$ mit einer weiteren Steigung des übertragbaren Torsionsmoments zu rechnen ist /4/, sind keine Maßnahmen zu Einengung der Toleranzfelder erforderlich. Gegebenenfalls kann für den Innendurchmesser der Nabe sogar ein größeres Toleranzfeld zugelassen werden, da die Schwankungen des geometrischen Übermaßes von dem Außendurchmesser der Rändelung dominiert werden. Eine Überprüfung des Abtragverhältnisses a kann Chargenweise erfolgen.

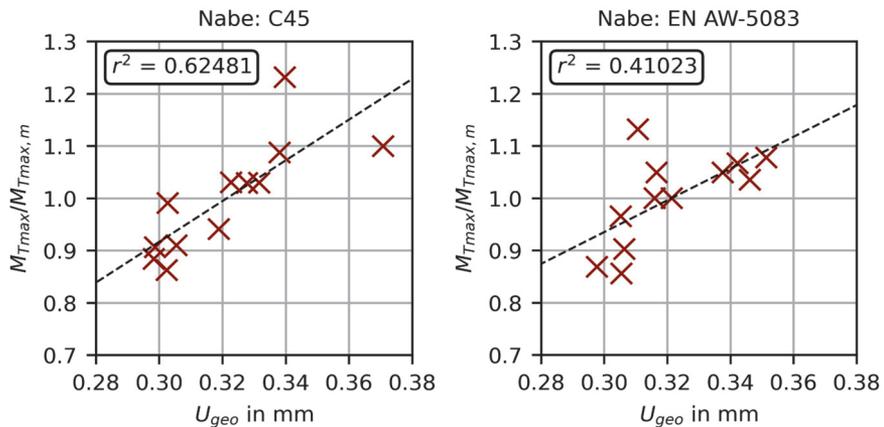


Abbildung 9: Einfluss des geometrischen Übermaßes auf das maximal übertragbare Torsionsmoment

Zusätzlich zu der Ermittlung der Durchmesser D_1 und D_{1A} im Wareneingang ist eine zerstörungsfreie Prüfung der gefügten Verbindung auf ihre Funktionsfähigkeit gewünscht. Hierzu eignet sich die maximale Fügekraft, die im industriellen Prozess im Regelfall mit aufgezeichnet wird. Die Gegenüberstellung für die Naben aus C45 in Abbildung 10 zeigt eine sehr gute lineare Korrelation zwischen maximaler Fügekraft $F_{f,\text{max}}$ und maximal übertragbarem Torsionsmoment $M_{T_{\text{max}}}$, unabhängig vom Außendurchmesser der Nabe. Es lassen sich Fügekraftfenster definieren, innerhalb derer die gefügte Verbindung später das geforderte Torsionsmoment sicher überträgt. In Abbildung 10 erfolgt dies über ein Prädiktionsintervall des verwendeten linearen Modells. Das Prädiktionsintervall gibt den Bereich an, in den ein zukünftiger Punkt mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit fällt. Die untere Grenze des verwendeten 90%-Intervalls gibt somit für eine gegebene Fügekraft das Torsionsmoment an, welches zu 95% ertragen wird /12/. Umgekehrt kann zu einem geforderten Torsionsmoment eine statistisch abgesicherte Mindestfügekraft bestimmt werden. Zur Festlegung der maximalen Fügekraft wird empfohlen die zulässige Aufweitung oder ein maximal zulässiges geometrisches Übermaß heranzuziehen.

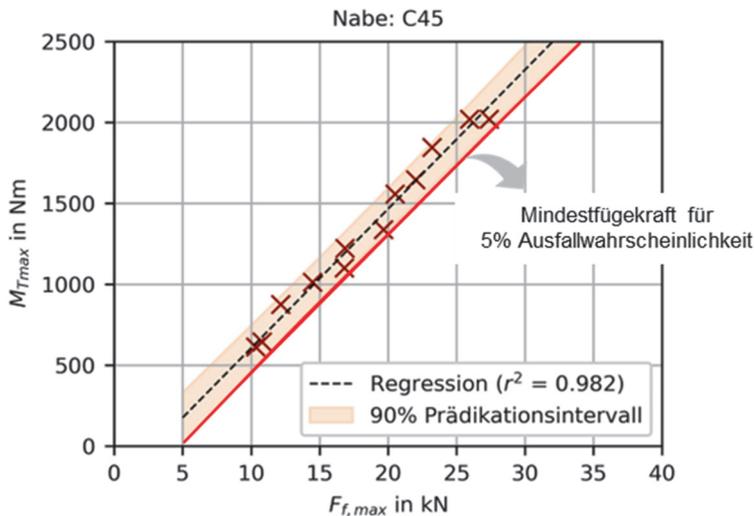


Abbildung 10: mögliche Absicherung im Prozess durch eine statistische Definition einer Mindestfügekraft am Beispiel der Versuche mit dem Nabenwerkstoff C45

Zusammenfassung und Ausblick

Rändelpressverbindungen stellen eine sehr wirtschaftliche und zugleich technisch sehr leistungsfähige Welle-Nabe-Verbindung dar. Bei geeigneter geometrischer Ausführung ist diese sehr kompakt bauende Verbindung bei der Verbindung von zwei Stahlwellen in der Lage, den Bruchort in den ungestörten Wellenbereich zu verlagern [6]. Die Verbindung ist damit nicht mehr die Schwachstelle. Sie ist spielfrei und hat gleichzeitig die Vorteile einer formschlüssigen Verbindung. Für die Fertigung eignen sich sowohl umformende Großserienverfahren, als auch spanende Verfahren wie z. B. das Wälzfräsen gleichermaßen.

In diesem Betrag wurden Grenzen bezüglich des Nabenwanddickenverhältnisses experimentell untersucht, mit dem Ergebnis einer einfachen Nutzbarkeit bis herunter zu $Q_A = 0,7$. Darüber hinaus sind Detailbetrachtungen notwendig.

Als weiterer, für die praktische Anwendung notwendiger Punkt, wurde die Qualitätssicherung betrachtet. Dazu wird ein abgestuftes Konzept von Durchmesserüberprüfungen im Wareneingang, sowie folgende Fügekraftüberprüfungen in der Baugruppe empfohlen, sodass ein final störungsfreier Einsatz im Produkt sichergestellt werden kann.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden zusammen mit den Simulationsergebnissen des Projektpartners, dem IKAT der TU Chemnitz, im

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens /3/ veröffentlicht. Dieser enthält einen gemeinsam erarbeiteten Normvorschlag zur Gestaltung und Auslegung des formend hergestellten ARPV. Dieser soll im DIN-Normenausschuss „Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen“ weiterentwickelt werden und als Norm in den Stand der Technik eingehen.

Danksagung

Die Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des Eigenmittelvorhabens Nr. 1045 I „Rändel2Standard“ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. erzielt. Die Autoren danken den beteiligten Institutionen, namentlich dem IKAT der TU Chemnitz sowie dem FVA-Arbeitskreis „Welle-Nabe-Verbindungen“ für die Unterstützung

Literatur

- /1/ Norm: DIN 82:1973-01, Rändel
- /2/ Norm: ISO 13444:2012-08: Technical product documentation (TPD) - Dimensioning and indication of knurling
- /3/ Klügel, N.; Hentschel, T.: Qualifizierung der Berechnung der Fügekräfte und statischen Übertragungsfähigkeiten von Rändelpressverbindungen für die normative Anwendung, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 1045 I, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (erscheint demnächst)
- /4/ Lätzer, M: Füge- und Übertragungsverhalten torsionsbelasteter Stahl-Aluminium-Rändelpressverbindungen. Dissertation, TU Chemnitz, 2016
- /5/ Mänz, T: Auslegung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle. Dissertation, TU Clausthal, 2017
- /6/ Mörz, F: Torsionsbelastete Rändelpressverbindungen – Gestaltung, Ausführung und Auslegung. Dissertation TU Clausthal, 2021
- /7/ Suchý, L.; Leidich, E.; Gerstmann, T; Awiszus, B.: Influence of Hub Parameters on Joining Forces and Torque Transmission Output of Plastically-Joined Shaft-Hub-Connections with a Knurled Contact Surface. In: Machines Volume 6, Issue 2, 2018. <https://doi.org/10.3390/machines6020016>
- /8/ Mörz, F.; Schäfer, G.: Fertigungseinfluss auf das Füge- und Übertragungsverhalten von Rändelpressverbindungen Institutsmitteilungen Nr. 45, Seite 35-46, IMW TU-Clausthal, 2020, ISSN 0947-2274
- /9/ Norm: DIN EN ISO 6892-1:2019, Metallische Werkstoff – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2019
- /10/ Norm: DIN 5480-15:2006-03, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser – Teil 15: Qualitätsprüfung
- /11/ Norm: DIN EN ISO 286-1:2019-09, Geometrische Produktspezifizierung (GPS) – IOS-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO 286-1:2010 + Cor1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 286-1:2001 + AC:2013
- /12/ Fahrmeir, I.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Verlag, Berlin, 5. Auflage, 2004

Der Zielkonflikt bei der Auslegung von Seiltrommeln: Eine Parameterstudie zum Einfluss des D/d-Verhältnisses



Lontsi Nongni, B. B.; Lohrengel, A.

Die optimale Auslegung von Seiltrommeln stellt Konstrukteure vor einen Zielkonflikt: Während ein hohes Trommel-Seildurchmesser-Verhältnis (D/d) die Bordscheiben signifikant entlastet, führt es gleichzeitig zu erhöhten Spannungen im Trommelmantel. Aufbauend auf einer systematischen Sensitivitätsanalyse wird das D/d -Verhältnis als einer der dominierenden Einflussparameter identifiziert und in diesem Artikel in einer umfassenden Parameterstudie untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vergrößerung des D/d Verhältnisses zu einer klaren Entlastung der Bordscheiben führt, teilweise mit signifikanter Reduktion der Vergleichsspannungen, jedoch die Membranspannungen in der Trommelmitte substantziell erhöhen kann. Somit verschiebt sich die höchstbeanspruchte Stelle von den Bordscheiben in die Mantelmitte. Die Studie macht den grundlegenden Zielkonflikt in der Konstruktion von Seiltrommeln quantitativ sichtbar und bietet wertvolle Hinweise für die ingenieurtechnische Auslegung im Hinblick auf Sicherheit und Ressourceneffizienz.

The optimal design of rope drums presents engineers with a fundamental conflict of objectives: while a high drum-to-rope diameter ratio (D/d) significantly relieves stresses on the end flanges, it simultaneously leads to increased stresses in the drum shell. Building upon a systematic sensitivity analysis, the D/d ratio is identified as one of the dominant influencing parameters and is investigated in a comprehensive parameter study in this article. The results demonstrate that an increase in the D/d ratio leads to a clear stress reduction in the end flanges, partly with significant reductions in equivalent stresses, but can substantially increase the membrane stresses in the middle of the drum shell. Consequently, the region of highest stress shifts from the end flanges to the middle of the drum shell. This study quantitatively illustrates the inherent conflict of objectives in rope drum design, offering valuable insights for engineering design with regard to safety and resource efficiency.

Einleitung

Die Seiltrommel ist eine zentrale, sicherheitsrelevante Komponente in der Hebe- und Fördertechnik, deren zuverlässige Auslegung maßgeblich zur Betriebs- und Anlagensicherheit beiträgt. Angesichts steigender Anforderungen an Leichtbau, Ressourceneffizienz und Lebensdauer der Anlagen gewinnen präzise und

ingenieurwissenschaftlich fundierte Berechnungsmethoden zunehmend an Bedeutung. Während sich in der Forschung detaillierte analytische Verfahren für die Spannungsanalyse von Seiltrommeln etabliert haben, erschwert deren Komplexität jedoch noch immer eine breite Anwendung in der industriellen Praxis. In frühen Entwurfsphasen oder bei Variantensimulationen ist ein reduzierter, auf die dominierenden Systemparameter konzentrierter Berechnungsansatz besonders gefragt.

Ein wesentlicher Einflussparameter ist hierbei das Verhältnis von Trommel- zu Seildurchmesser (D/d). Es beeinflusst maßgeblich sowohl die Belastung der Bordscheiben als auch die Spannungszustände im Trommelmantel, wobei eine Erhöhung des D/d -Verhältnisses mit gegensätzlichen Effekten auf diese beiden kritischen Bauteile einhergeht. Dies führt zu einem bislang wenig quantifizierten Zielkonflikt, der für die technische Auslegung von zentraler Bedeutung ist: Die Beanspruchung lässt sich nicht gleichzeitig in beiden Bauteilen minimieren.

In diesem Beitrag wird mittels einer umfassenden Parameterstudie die funktionale Abhängigkeit der lokalen Spannungen innerhalb der Seiltrommel vom D/d -Verhältnis analysiert und damit den Zielkonflikt in der Konstruktion quantitativ erlebbar zu machen.

Gegenstand und Zielstellung der Untersuchung

Im Zentrum dieser Untersuchung steht die systematische Analyse der Spannungszustände innerhalb einer mit mehreren Lagen belegten Seiltrommel unter Variation des Trommel-Seildurchmesser-Verhältnisses (D/d). Ziel ist es, die durch eine Änderung dieses Verhältnisses hervorgerufenen Effekte auf kritische Beanspruchungen der Bauteile, insbesondere Trommelmantel und Bordscheiben, zu quantifizieren und den damit verbundenen Zielkonflikt bei der mechanischen Auslegung sichtbar zu machen.

Die Basis der parametrischen Analyse bildet eine bereits in Forschung und Praxis etablierte, analytische Berechnungsmethode für Seiltrommeln, wie sie am Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal entwickelt wurde. Es werden die wichtigsten Konstruktions- und Materialparameter kontrolliert festgelegt, um den Einfluss des D/d -Verhältnisses isoliert betrachten zu können. Die Ergebnisse liefern eine quantitative Grundlage für die Auslegungsentscheidung hinsichtlich dieses maßgeblichen Geometrieparameters.

Modellierung und Berechnungsgrundlagen

Ausgangspunkt der Analyse ist ein mechanisches Ersatzmodell der Seiltrommel, das in Anlehnung an die Methodik nach Mupende /1/ den Trommelmantel als rotationssymmetrische Kreiszylinderschale und die Bordscheiben als Kreisringplatten abbildet. Die Spannungs- und Verformungsberechnung erfolgt auf

Basis der linearen Schalen- und Plattentheorie unter der Annahme eines homogenen, isotropen und im Wesentlichen elastischen Materialverhaltens.

Die Belastung des Trommelmantels wird im Modell als radiale Druckverteilung aus den aufgewickelten Seillagen angesetzt, während die Bordscheiben durch die aus dem Wickelpaket resultierenden axialen Linienkräfte beansprucht werden. Beide Lastarten werden durch die Seilparameter und insbesondere das D/d-Verhältnis beeinflusst.

Die verwendeten Berechnungsgleichungen und die Validierung der Methode basieren auf einer umfangreichen Literatur- und Forschungsgrundlage, wobei die Referenzberechnungen mit dem hauseigenen Programm „Seilwinde.exe“ durchgeführt wurden. Komplexe Materialeffekte wie Plastizität oder lokale Kontakthänomene werden im Rahmen dieser Studie zugunsten einer klaren Parametrierung nicht vertieft betrachtet.

Geometrie und Randbedingungen der untersuchten Seiltrommel

Für die Parameterstudie wird eine repräsentative Seiltrommel ausgewählt, deren Geometrie und Materialkennwerte sich an aktuellen industriellen Anwendungen orientieren. Die untersuchte Trommel ist für die Aufnahme eines Stahldrahtseils mit einem Nenndurchmesser $d=14$ mm ausgelegt. Die übrigen Geometrie- und Materialdaten (siehe Tabelle 1) sind nach Stand der Technik gewählt und werden im Verlauf der Studie konstant gehalten, um den Einfluss des D/d-Verhältnisses isoliert herausstellen zu können

Tabelle 1: Geometrie- und Materialdaten des untersuchten Systems aus Seiltrommel und Seil

Mantel			Bordscheibe		
Innendurchmesser	[mm]	208	Außendurchmesser	[mm]	450
Grunddurchmesser	[mm]	252	Wandstärke	[mm]	20
Mantellänge	[mm]	330,3	E-Modul	[MPa]	210000
Fließgrenze	[MPa]	900	Querkontraktionszahl	-	0,25
E-Modul	[MPa]	210000	Seil		
Querkontraktionszahl	-	0,25	Seildurchmesser	[mm]	14
Windungsabstand	[mm]	14,7	Längselastizitätsmodul	[MPa]	110000
Reibbeiwert	-	0,18	Nutzlast	[N]	38000

Vorgehen der Parameterstudie

Die Auswirkungen des D/d-Verhältnisses auf die Spannungsverteilung werden mittels einer systematischen Parameterstudie untersucht. Hierzu wird das D/d-Verhältnis im Bereich von 18 bis 30 stufenweise variiert. Dabei ist für jedes festgelegte D/d-Verhältnis ein vollständiger Belastungsfall mit identischer Betriebsbeanspruchung berechnet. Die Änderung des D/d-Wertes erfolgt durch Anpassung des Trommeldurchmessers, für jede Variation werden die zugehörigen Bordscheibendurchmesser und relevanten Lagen angepasst, sodass stets eine technisch realistische Wickelgeometrie gegeben ist.

Für jedes Modell werden die resultierenden radiale, tangentielle und axiale Spannungsponenten sowohl im Trommelmantel als auch in den kritischen Bereichen der Bordscheiben ausgewertet. Die maßgeblichen Kennwerte sind dabei die lokalen Vergleichsspannungen (nach von Mises), die als Beurteilungsmaßstab für die strukturelle Beanspruchung dienen.

Der Fokus der Auswertung liegt darauf, die Änderung der Maximalspannungen in Abhängigkeit vom D/d-Verhältnis übersichtlich und nachvollziehbar darzustellen, um den Zielkonflikt in der Konstruktion der Seiltrommel quantitativ herauszuarbeiten.

Ergebnisse der Parameterstudie

Entwicklung der Spannungen in den Bordscheiben

Die Bordscheiben sind maßgeblich durch die axialen Kräfte aus dem Wickelpaket beansprucht. Die Analyse zeigt, wie die Variation des D/d-Verhältnisses die lokalen Spannungszustände in diesen kritischen Bauteilen beeinflusst.

Radiale Spannungen

Die Entwicklung der radialen Spannungen in den Bordscheiben zeigt einen überwiegend degressiven Verlauf mit steigendem D/d-Verhältnis. Dies ist besonders ausgeprägt an den äußeren Seiten beider Bordscheiben zu beobachten. Beispielsweise sinkt die radiale Spannung an der äußeren Seite der linken Bordscheibe von 160,7 MPa bei $D/d = 18$ auf 112,9 MPa bei $D/d = 30$ (siehe Tabelle 2), was einer signifikanten Reduktion von rund 30 % entspricht. Dieser Trend wird in Abbildung 1 durch sinkende Balken verdeutlicht.

Physikalisch lässt sich dieses Verhalten durch die veränderte Biegesteifigkeit der Plattenstruktur erklären: Eine Trommel mit größerem Durchmesser führt bei gleicher Dicke zu einer geringeren Krümmung der Bordscheibe, was die Biegespannungen reduziert.

Eine bemerkenswerte Ausnahme dieses monotonen Trends findet sich im hochbelasteten Anschlussbereich der linken Bordscheibe. Hier zeigt sich ein nicht-lineares Verhalten: Die Spannung steigt von einem Ausgangswert von 642,0 MPa zunächst auf ein lokales Maximum von 704,0 MPa bei einem D/d-Verhältnis von 22, bevor sie bei größeren Verhältnissen wieder deutlich auf 491,6 MPa abfällt. Dieses Phänomen ist in Abbildung 1 (Balken für D/d = 20 und D/d = 22 über dem Referenzwert von 1) hervorgehoben. Eine weitere Anomalie tritt an der äußeren Seite der rechten Bordscheibe auf, wo die radiale Spannung bei D/d = 22 und D/d = 24 jeweils 123,8 MPa beträgt. Diese Beobachtungen deuten auf eine komplexe strukturelle Interaktion zwischen der Bordscheibenverformung und der elastischen Einspannung durch den Trommelmantel hin, die bei spezifischen Geometrieverhältnissen zu lokalen Spannungsüberhöhungen führt.

Tabelle 2: Radiale Spannungen der Bordscheiben in MPa

D/d-Verhältnis	18	20	22	24	26	28	30
BS links, äußere Seite	160,7	145,1	134,7	128,0	122,8	117,8	112,9
BS links, Anschlussseite	642	699,2	704	658,4	597,2	539,9	491,6
BS rechts, äußere Seite	139,6	131,3	123,8	123,8	110,5	104,6	99,3
BS rechts, Anschlussseite	421,3	398,1	376,0	356,1	338,4	322,6	308,6

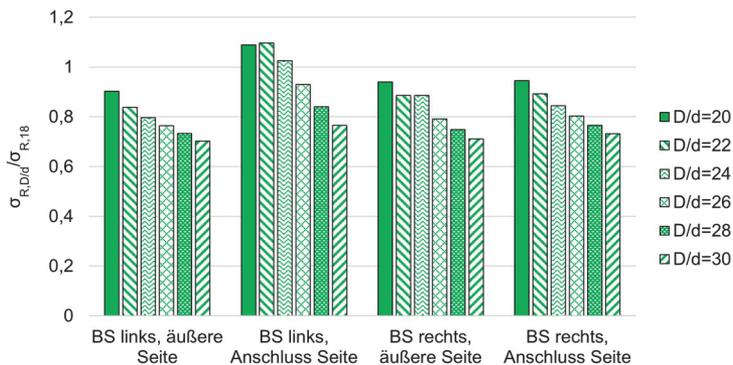


Abbildung 1: Entwicklung der radialen Spannungen der Bordscheiben

Tangentiale Spannungen

Die Analyse der tangentialen Spannungen zeigt insbesondere im Bereich der Bordscheiben deutliche Unterschiede in Betrag und Verlauf in Abhängigkeit vom D/d-Verhältnis. Auffällig ist die Entwicklung an der äußeren Seite der rechten Bordscheibe: Während bei D/d = 18 noch eine geringe Zugspannung von 14,4 MPa

vorliegt, wechselt das Vorzeichen bereits bei $D/d = 22$ zu einer leichten Druckspannung von $-5,2$ MPa. Mit weiter steigendem D/d -Verhältnis nimmt die Druckspannung zu und erreicht bei $D/d = 30$ einen Wert von $-26,4$ MPa (siehe Tabelle 3).

In den Anschlussbereichen der Bordscheiben zeigen sich ebenfalls deutliche, jedoch in der Größenordnung wesentlich größere Schwankungen. Im Anschlussbereich der linken Bordscheibe nimmt die tangentielle Druckspannung von $-201,8$ MPa ($D/d = 18$) auf ein Maximum von $-236,8$ MPa ($D/d = 22$) zu und reduziert sich anschließend wieder auf $-156,0$ MPa ($D/d = 30$). Im Anschlussbereich der rechten Bordscheibe ist ein kontinuierlicher Rückgang der Druckspannung um rund 40 % zu beobachten ($-156,7$ MPa auf $-93,7$ MPa).

Tabelle 3: Tangentiale Spannungen der Bordscheiben in MPa

D/d-Verhältnis	18	20	22	24	26	28	30
BS links, äußere Seite	41,2	40,4	34,5	23,9	12,8	3,2	-4,6
BS links, Anschlussseite	-201,8	-231,2	-236,8	-220,7	-197,3	-175,0	-156,1
BS rechts, äußere Seite	14,4	3,6	-5,2	-5,2	-18	-22,6	-26,4
BS rechts, Anschlussseite	-156,7	-142,7	-129,9	-118,8	-109,2	-100,9	-93,7

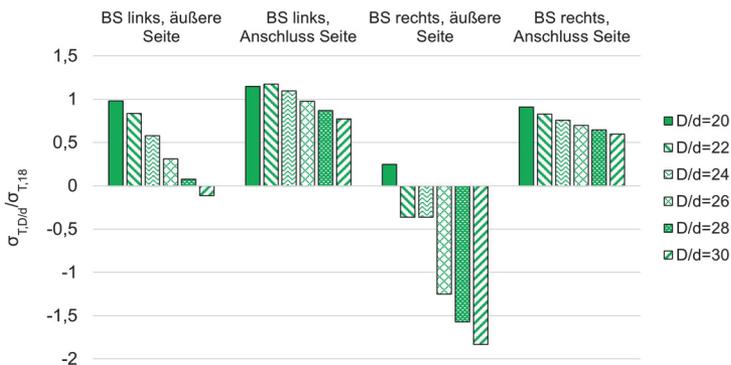


Abbildung 2: Entwicklung der tangentialen Spannungen der Bordscheiben

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass kleinere Spannungswerte, wie die an der äußeren Seite der rechten Bordscheibe, im Vergleich zu den in den Anschlussbereichen auftretenden Druckspannungen geringere Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit haben. Die Systemzuverlässigkeit sollte primär auf die Zonen mit den höchsten absoluten Spannungsspitzen, insbesondere im Anschlussbereich der Bordscheiben, fokussiert werden.

Vergleichsspannung

Die nach der Gestaltänderungsenergiehypothese gebildeten Vergleichsspannungen fassen die mehrachsigen Spannungszustände zusammen. Ihre Entwicklung wird von den dominanten Trends der Einzelspannungskomponenten geprägt. Im Anschlussbereich der linken Bordscheibe wird, analog zur radialen Spannung, ein Spannungsmaximum bei $D/d = 22$ mit einem Wert von 872,7 MPa erreicht (siehe Tabelle 4). Dies ist der höchste Spannungswert der gesamten Analyse. An allen anderen Positionen zeigt die Vergleichsspannung eine tendenziell degressive Entwicklung (Abbildung 3). Dies deutet darauf hin, dass trotz der ausgeprägten Änderungen in der Tangentialspannung die Gesamtbeanspruchung in den meisten Bereichen durch eine Vergrößerung des D/d -Verhältnisses reduziert werden kann, obwohl lokale Überhöhungen bei bestimmten Verhältnissen auftreten können.

Tabelle 4: Vergleichsspannungen der Bordscheiben in MPa

D/d-Verhältnis	18	20	22	24	26	28	30
BS links, äußere Seite	148,8	133,6	124,7	121,0	119,6	118,6	117,4
BS links, Anschlussseite	791,6	865,7	872,7	816,0	739,5	667,9	607,5
BS rechts, äußere Seite	136,0	132,1	128,6	128,6	122,1	119,0	116,0
BS rechts, Anschlussseite	542,8	510,7	480,4	453,3	429,4	408,3	389,5

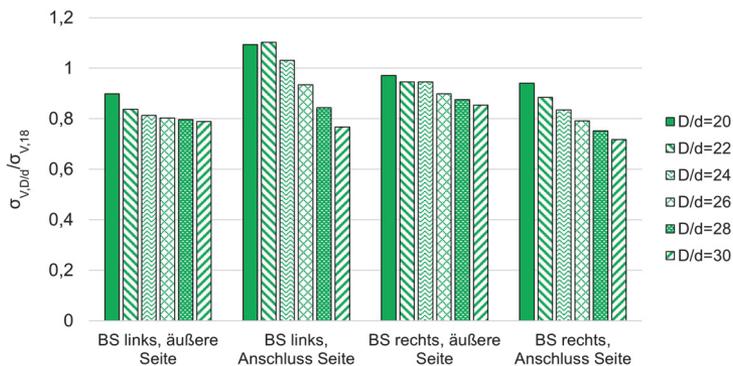


Abbildung 3: Entwicklung der Vergleichsspannungen der Bordscheiben

Entwicklung der Spannungen im Trommelmantel

Die Analyse des Trommelmantels zeigt, wie sich die veränderte Geometrie auf die Beanspruchungen in der zylindrischen Schale auswirkt, die primär durch den radialen Seildruck belastet wird.

Axialspannungen

Die Axialspannungen im Mantel weisen ein stark positionsabhängiges Verhalten auf. An den Rändern (Position 0 und 330,3 mm), wo die Einspannung in die Bordscheiben dominiert, nehmen die Druckspannungen bei steigendem D/d-Verhältnis tendenziell ab, wie in Abbildung 4 veranschaulicht. Im Gegensatz dazu steigen die Zugspannungen im mittleren Bereich des Mantels (Position 100-200 mm) deutlich an. An der Position 200 mm beispielsweise erhöht sich die Spannung von 10,73 MPa bei D/d = 18 auf 51,19 MPa bei D/d = 30 (siehe Tabelle 5), was einem relativen Anstieg um den Faktor 4,7 entspricht.

Dieser Effekt lässt sich durch das veränderte Schalenträgerverhalten erklären: Eine Trommel mit größerem Durchmesser ist bei gleicher Wandstärke relativ "dünnwandiger". Ihr Verhalten nähert sich dem einer Membran an, was zu höheren axialen Membranspannungen in der Mitte führt, während die Biegespannungen an den eingespannten Rändern abnehmen.

Tabelle 5: Axialspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300	330,3
D/d=18	-621,57	71,11	10,73	60,35	-397,51
D/d=20	-683,95	86,87	14,17	72,19	-375,84
D/d=22	-691,00	98,52	19,52	82,98	-355,02
D/d=24	-645,85	106,13	26,26	92,24	-336,33
D/d=26	-584,40	112,34	33,92	99,99	-319,81
D/d=28	-526,86	118,63	42,27	106,38	-305,20
D/d=30	-478,47	125,38	51,19	111,60	-292,22

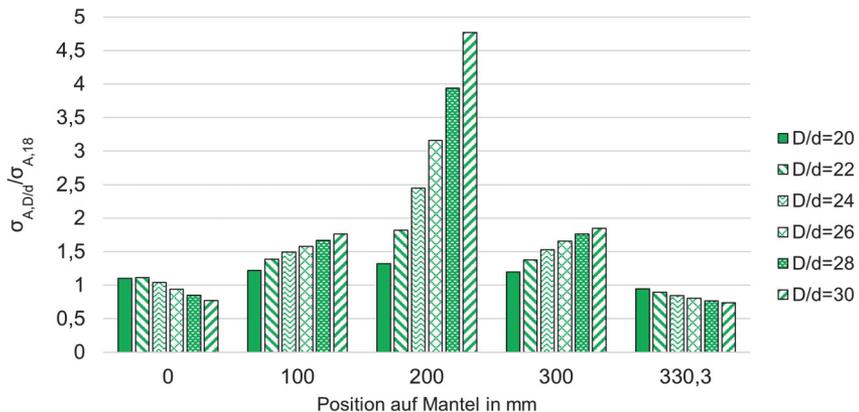


Abbildung 4: Entwicklung der Axialspannungen des Trommelmantels

Innere und äußere Tangentialspannungen

Sowohl die inneren als auch die äußeren Tangentialspannungen zeigen über die gesamte Mantellänge einen klaren Trend: Ihre Beträge nehmen mit steigendem D/d-Verhältnis zu (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6). An der Position 200 mm steigt die innere Druckspannung von -407,03 MPa (D/d = 18) auf einen betragsmäßigen Maximalwert von -539,19 MPa (D/d = 30) (siehe Tabelle 6), eine Zunahme von über 32 %. Dieses Verhalten steht im Einklang mit der Kesselformel, wonach die Tangentialspannung direkt proportional zum Durchmesser ist. Der größere Durchmesser führt zwangsläufig zu höheren Tangentialspannungen. Der Verlauf der äußeren Tangentialspannung (Abbildung 6) ist eine Überlagerung aus dieser Membranspannung und der Biegespannung, wird aber ebenfalls vom ansteigenden Membrananteil dominiert.

Tabelle 6: Innere Tangentialspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300
D/d=18	-160,57	-385,18	-407,03	-182,54
D/d=20	-190,80	-406,82	-442,02	-196,26
D/d=22	-202,38	-424,44	-470,48	-205,64
D/d=24	-196,79	-440,83	-493,41	-211,84
D/d=26	-184,54	-455,51	-511,94	-215,73
D/d=28	-171,87	-467,81	-526,98	-217,97
D/d=30	-160,74	-477,69	-539,19	-219,03

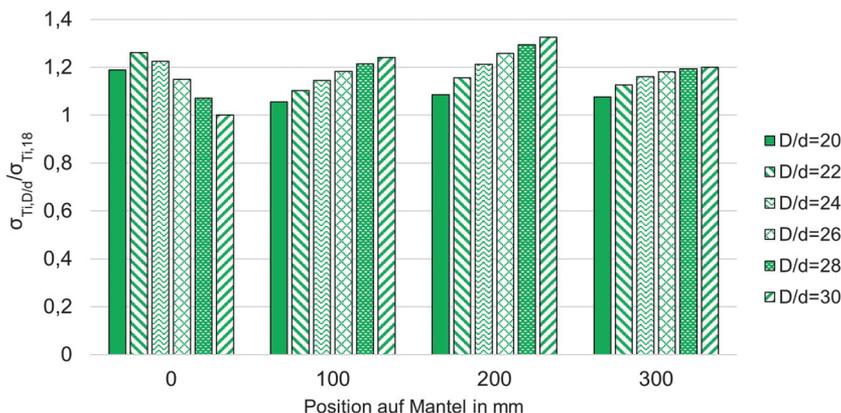
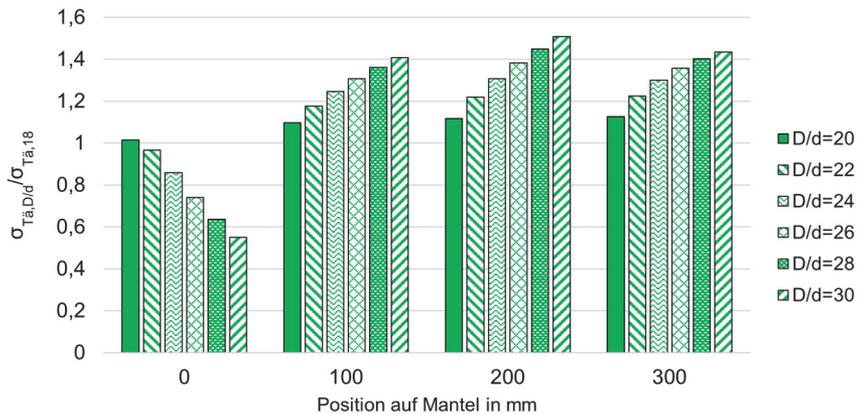


Abbildung 5: Entwicklung der inneren Tangentialspannungen des Trommelmantels

Tabelle 7: Äußere Tangentialspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300
D/d=18	159,20	-342,74	-333,22	-170,34
D/d=20	161,51	-376,06	-372,24	-191,63
D/d=22	153,88	-403,32	-406,13	-208,41
D/d=24	136,72	-427,00	-435,39	-221,36
D/d=26	117,79	-447,97	-460,76	-231,24
D/d=28	101,15	466,41	-482,92	-238,71
D/d=30	87,53	-482,50	-502,42	-244,31

**Abbildung 6:** Entwicklung der äußeren Tangentialspannungen des Trommelmantels

Vergleichsspannungen

Die Entwicklung der Vergleichsspannungen im Mantel ist eine Synthese der zuvor beschriebenen Effekte. An den Rändern (Position 0 und 300 mm), wo die Biege- und Axialdruckspannungen dominieren, ist der Verlauf degressiv. In der Mitte des Mantels (Position 100 bis 200 mm) ist der Trend hingegen eindeutig progressiv. Hier dominiert der starke Anstieg der Tangential- und axialen Membranspannungen, wie in Abbildung 7 zu sehen. Der höchste Anstieg wird an der Position 200 mm verzeichnet, wo die Vergleichsspannung (Druckspannung) von 412,54 MPa auf 566,61 MPa bei D/d = 30 ansteigt (siehe Tabelle 8).

Diese Erkenntnis ist für die Konstruktionspraxis von entscheidender Bedeutung: Eine Vergrößerung des Trommeldurchmessers zur Entlastung der Bordscheiben kann die kritischste, höchstbeanspruchte Stelle von den Rändern in die Mitte des Trommelmantels verlagern.

Tabelle 8: Vergleichsspannungen des Trommelmantels in MPa

Position auf Mantel in mm	0	100	200	300
D/d=18	596,08	425,44	412,54	223,43
D/d=20	646,54	456,72	449,32	244,56
D/d=22	648,72	481,53	480,59	261,01
D/d=24	605,28	502,57	507,12	273,49
D/d=26	548,26	521,04	529,79	282,78
D/d=28	495,43	537,23	549,42	289,59
D/d=30	541,22	551,36	566,61	294,48

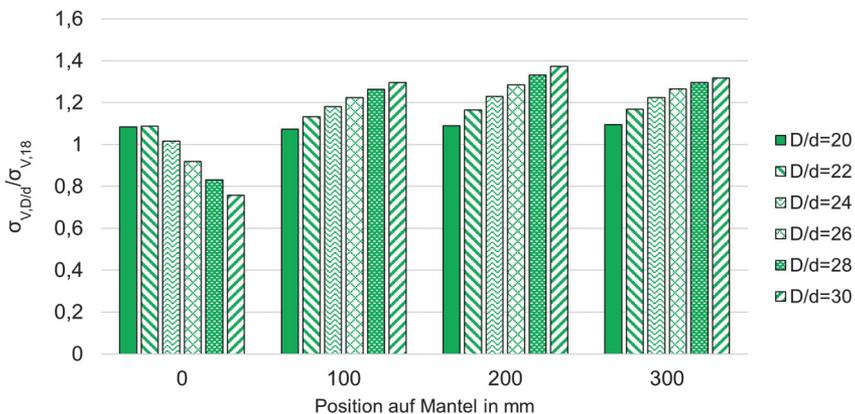


Abbildung 7: Entwicklung der Vergleichsspannungen des Trommelmantels

Zusammenfassung

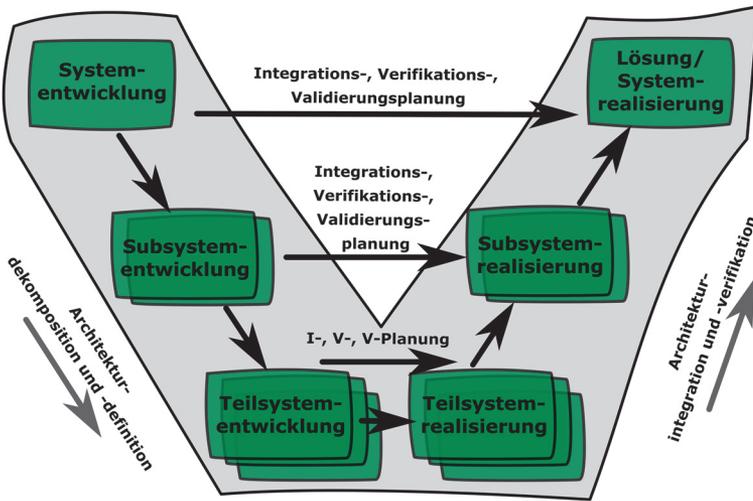
Diese Parameterstudie beleuchtet den kritischen Einfluss des Trommel-Seildurchmesser-Verhältnisses (D/d) auf die Spannungsverteilung in Seiltrommeln und identifiziert einen fundamentalen Zielkonflikt in deren Auslegung. Es wurde quantifiziert, dass ein größeres D/d-Verhältnis tendenziell zu einer signifikanten Entlastung der Bordscheiben führt, jedoch gleichzeitig eine massive Zunahme der Beanspruchung im mittleren Bereich des Trommelmantels verursacht. Dieser Konflikt, bei dem die Lastaufnahme von den Bordscheiben zum Trommelmantel verlagert wird, stellt Konstrukteure vor die Herausforderung, eine optimale Balance zu finden, um Materialversagen und Ermüdung zu vermeiden.

Zur Bewältigung dieses Zielkonflikts werden verschiedene konstruktive Maßnahmen vorgeschlagen. Eine gezielte Variation der Wanddicken des Mantels oder der

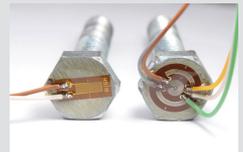
Bordscheiben kann Spannungsspitzen lokal reduzieren. Die Integration von Verstärkungsrippen im Mantelbereich kann die Steifigkeit erhöhen und somit die hohen Tangential- und Axialspannungen im mittleren Bereich des Mantels effektiv mindern. Des Weiteren kann die Art der Torsionseinleitung und die Gestaltung des Seilschlusses optimiert werden, um lokale Kerbwirkungen und Spannungsakkumulationen zu minimieren. Eine ganzheitliche Optimierung unter Berücksichtigung dieser Parameter ist unerlässlich, um die Betriebsfestigkeit und Lebensdauer von Seiltrommeln zu gewährleisten und den identifizierten Zielkonflikt durch angepasste konstruktive Details zu entschärfen.

Literatur

- /1/ Mupende I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten, Dissertation, Technische Universität Clausthal, Cuvillier Verlag Göttingen, 2001



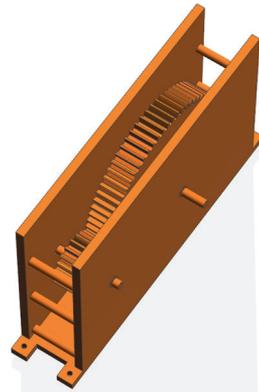
Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung



Flexibilisierungspotenziale von HLCts in der Design Automation

Meyer, J.; Ravichandran, D.; Inkermann, D.

High-Level-CAD-Templates (HLCt) sind ein verbreitetes Prinzip der Design Automation. Diese sind hochparametrisierte Grundmodelle für einen bestimmten Konstruktionszweck, die Varianten oder Designänderungen eines Produktes ableiten. Allerdings sind jene oft auf einen spezifischen Anwendungsfall begrenzt und bieten durch ihren Vorlagencharakter wenig Flexibilität. In diesem Artikel wird an einem studentischen Use Case einer HLCt für ein Getriebe untersucht, welche Schritte sich für eine Flexibilisierung anbieten und wie diese sich als eine Designerweiterung für den Use Case eignen.



High-level CAD templates (HLCt) are a common principle in design automation. These are highly parameterized basic models for a specific design purpose, which derive variants or design changes for a product. However, they are often limited to a specific use case and offer little flexibility due to their template nature. This article uses a student use case of an HLCt for a gearbox to examine which steps can be taken to increase flexibility and how these are suitable as a design extension for the use case.

Einleitung und Problemstellung

Technische Konstruktionsaufgaben zu automatisieren, wird allgemein als Design Automation bezeichnet /1/. Ziel der Design Automation ist es, Konstruktionen, welche wiederholt in einer ähnlichen Form erstellt werden, zu automatisieren, sodass möglichst kein oder wenig menschliches Eingreifen notwendig ist /2/. Hierbei können Zeit und personeller Aufwand eingespart werden, was den Entwicklungsprozess verkürzt und dadurch Kosten senkt /2/. Eine Methode der Design Automation ist das High-Level-CAD-Template, kurz HLCt /3/. HLCts sind hochdetaillierte CAD-Vorlagen in Form eines vordefinierten Programmcodes, welche für einen bestehenden Konstruktionszweck erstellt werden. Dies können Abläufe aus einfachen Parameterkombinationen, aber auch hochkomplexe Berechnungsformeln für die Erstellung von Komponenten sein /3/. Abbildung 1 visualisiert zwei Beispiele von HLCts zur Generierung eines Elektronikgehäuses /4/ und eines Werkzeuges für die Blechverarbeitung /5/.

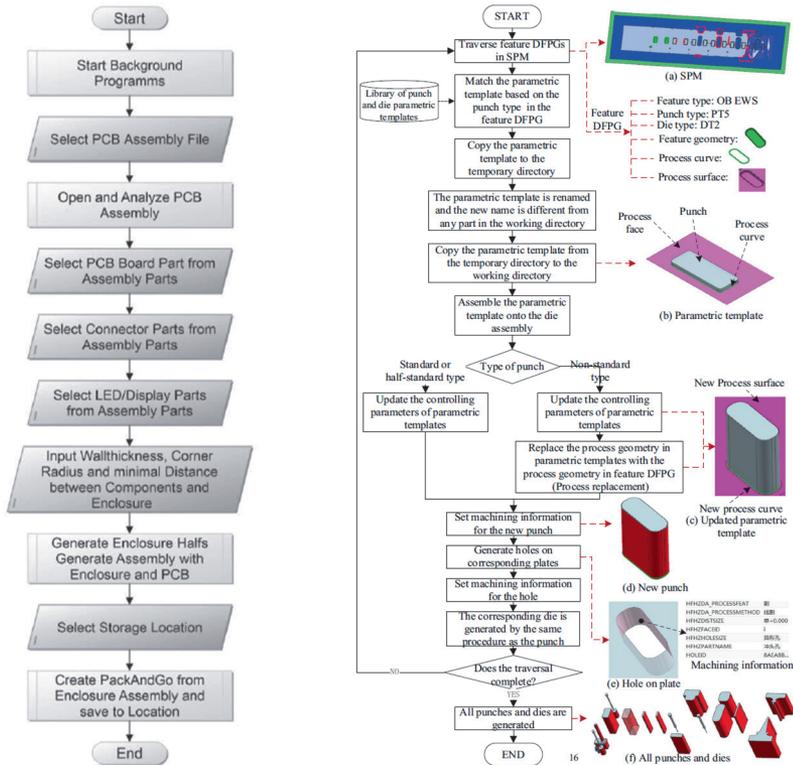


Abbildung 1: Beispiele für High-Level-CAD-Templates (HLCT), links: HLCT eines Elektronikgehäuses nach Gembarski /4/, rechts: HLCT eines Blechverarbeitungswerkzeuges nach Kong /5/

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, folgen beide HLCTs mit ihren Prozessschritten einer strengen Abfolge zur Generierung der Zielgeometrie. Dadurch ist die Flexibilität von HLCTs begrenzt. Um ein HLCT zu erstellen, ist je nach Ziel der HLCT ein mittlerer bis hoher Aufwand erforderlich. In jedem Fall kann das Ziel nur mit einem gewissen Änderungspotenzial flexibel angepasst werden. Somit kann es schnell passieren, dass für einen neuen Konstruktionsfall eine alte HLCT nicht mehr verwendet werden kann. Hieraus resultiert die Frage, wie HLCTs angepasst werden können, um eine höhere Flexibilität und somit die Anwendbarkeit für verschiedene Konstruktionsfälle zu ermöglichen. In diesem Beitrag wird daher untersucht, wie die Flexibilität im Allgemeinen erhöht werden kann. Dafür wird ein Use Case anhand einer am IMW generierten HLCT in Siemens NX Open durchgeführt. In diesem Use Case wird ein HLCT für ein Getriebe erstellt, das die Integration gebrauchter Elektromotoren in eine neue Produktgeneration eines Rovers ermöglicht.

Forschungsziele und Fragen

Ziel dieses Beitrags ist es, zu klären, welche Potentiale für den flexiblen Einsatz von HLCts bestehen und durch welche Anpassungen diese Potentiale erschlossen werden können. Anhand des Use Cases der Getriebe-HLCt zur Integration gebrauchter Elektromotoren werden die Potenziale verdeutlicht. Hieraus wird ein Vorschlag für die Festlegung eines geeigneten Flexibilisierungsgrades abgeleitet. Dabei stehen folgende Forschungsfragen im Vordergrund:

1. Welche Anforderungen und Bedarfe gibt es für die Flexibilisierung von HLCts?
2. Wie können diese Bedarfe im Allgemeinen in HLCts umgesetzt werden?
3. Wie kann ein flexibilisierter HLCt implementiert werden, um verschiedene Konstruktionszwecke zu unterstützen?

Um diese Forschungsfragen zu beantworten, wird im nächsten Kapitel eine genauere Übersicht über den bereits beschriebenen Use Case gegeben. Anschließend wird sich den Forschungsfragen zugewandt.

Beschreibung des Use Cases und Randbedingungen für die Betrachtung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den betrachteten Use Case sowie die Randbedingungen gegeben, die notwendig sind, um die gestellten Forschungsfragen im nächsten Kapitel zielgerichtet zu beantworten.

Der zugrunde liegende Use Case stammt aus einer Masterarbeit. Mit dem Ziel eine ressourceneffiziente Kreislaufführung von Komponenten zu ermöglichen, sollen gebrauchte Komponenten in neue Produktgenerationen integriert werden (Reuse von Komponenten, vgl. Meyer 2025) /6/. Im LifeLab am IMW /7/ wird hierzu die Wiederverwendung von Elektromotoren aus Powertools in einer Roverplattform als Use Case verfolgt. Für diesen Prozess sind verschiedene Schritte notwendig. Von der Demontage aus einem alten Produkt über die automatisierte Analyse und Objektfassung des Elektromotors hin bis zur Lagerplatzbereitstellung stellen sich hier wissenschaftliche Fragen, welche im Rahmen verschiedener Projekte bearbeitet werden. Fokus dieser Arbeit ist die funktionale und geometrische Integration der gebrauchten Elektromotoren in die Roverplattform. Die Elektromotoren in diesem Use Case stammen aus alten Akkuschraubern (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Use Case Wiederverwendung von Elektromotoren in neuen Produktgenerationen: links: gebrauchter Akku-Schrauber, mitte: extrahierter Elektromotor inkl. Getriebeeinheit, rechts: Liefer-Rover mit gebrauchten Komponenten

Die Elektromotoren werden paarweise in den Rover integriert, sodass jeder Elektromotor jeweils ein Rad des Rovers antreibt. Hierfür bedarf es aufgrund der hohen Eingangsdrehzahl der Elektromotoren einer Getriebestufe. Allerdings ist aufgrund der großen Variantenvielfalt an verbauten Elektromotoren in verschiedenen Akkuschaubern jeweils eine andere Übersetzung bzw. Getriebestufe notwendig, um einen konstanten Geschwindigkeits-Drehmoments-Bereich für den Rover zu ermöglichen. Für die Vielzahl von Elektromotoren ist es nicht zielführend, manuell für jeden Elektromotor eine eigene Getriebestufe zu konstruieren. Design Automation bietet hier durch vordefinierte Vorlagen (HLCT) eine Möglichkeit, den manuellen Konstruktionsaufwand zu reduzieren. Die Aufgabe besteht darin, eine automatisierte Getriebeerzeugung zur Integration der verschiedenen gebrauchten Elektromotoren zu erstellen. Hierbei sind einige Randbedingungen zu beachten:

- Es wird angenommen, dass alle notwendigen technischen Daten des Elektromotors bekannt sind.
- Die Elektromotoren weisen weder innere noch äußere Beschädigungen auf.
- Konstruktiv wird sich auf das Getriebe und die Schnittstelle zum Elektromotor fokussiert.
- Ein- und Ausgangswellen des Getriebes liegen jeweils auf der gegenüberliegenden Seite des Getriebes.
- Das Getriebe muss an der Unterseite verschraubt sein.
- Alle Komponenten des Getriebes müssen additiv als Baugruppe fertigbar sein.

Aus dieser Problemstellung wurde ein HLCT erstellt, welches in Abbildung 3 visualisiert ist. Auch hier werden sämtliche Parameter schrittweise weitergegeben und bieten nur wenig Flexibilität, da die Prozesskette stringent abgearbeitet werden muss. In diesem HLCT wird die STEP-Datei des Elektromotors eingelesen. Mit einer

Benutzerabfrage nach Ein- und Ausgangsdrehzahlen wird dann die Anschlussgeometrie des Elektromotors am Getriebe bestimmt und die Komponenten-Dateien erstellt. Genauer werden die Ritzel-Datei, die Zahnrad-Datei, die beiden dazugehörigen Wellen und anschließend das Getriebegehäuse berechnet. Diese Berechnungen erfolgen auf einer zwischengespeicherten Normen-Grundlage. Die fertig zusammengesetzte Getriebebaugruppe wird anschließend gesliced und mittels FDM-Verfahrens gedruckt.

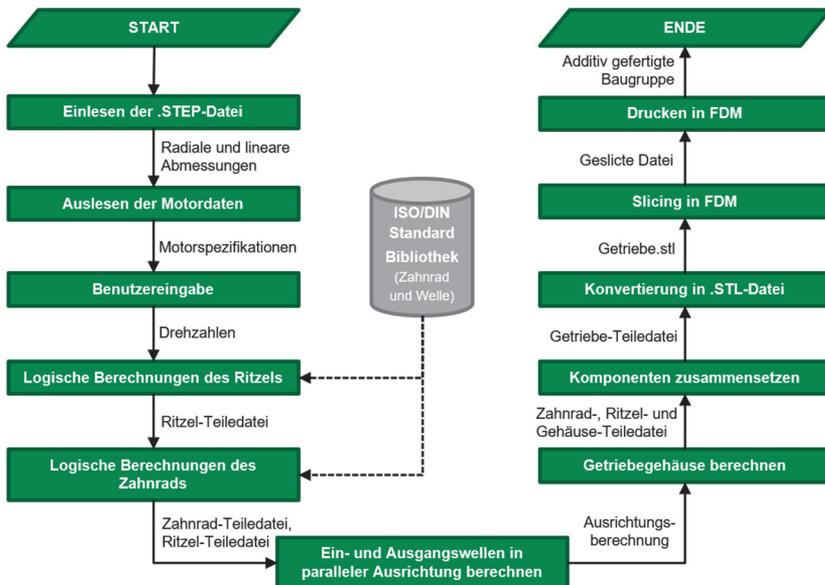


Abbildung 3: Übersicht der erstellten HLCT aus der Masterarbeit

Das HLCT ist ein praktisches Werkzeug, das automatisch ein bestimmtes Getriebe vollständig konstruiert, vergleiche Titelbild. Allerdings ist es ebenfalls unflexibel, da z.B. andere Getriebearten wie Kegelradgetriebe, die von der Form des jetzigen abweichen, ohne Anpassungen des Skriptes nicht möglich sind.

Analyse von Flexibilisierungspotenziale im Use Case

Welche Anforderungen und Bedarfe gibt es für die Flexibilisierung von HLCTs?

Um Flexibilisierungspotenziale zu analysieren, muss es einen konkreten Änderungsbedarf geben. Dieser Änderungsbedarf resultiert aus einer erweiterten Betrachtung des Use Cases. In dem in Abbildung 3 vorgestellten HLCT handelt es sich um ein einstufiges Getriebe mit gegenüberliegenden Ein- und Ausgangswellen

und geradverzahnten Zahnrädern. Die Design Automotion funktioniert für diesen Use Case vollständig und zuverlässig. Aber wenn erweiterte Funktionalitäten, z.B. eine andere Anordnung der Ein- und Ausgangswellen des Getriebes, gefordert werden, dann ist das HLCT nicht mehr anwendbar. Mit Betrachtung des in Abbildung 2 dargestellten Rovers und des erläuterten Use Cases können Flexibilisierungspotenziale für die Flexibilität dieser HLCT abgeleitet werden:

- Flexibilisierungspotenzial 1: Außerhalb des begrenzten Bauraums des Rovers kann je nach Größe des eingesetzten Elektromotors eine Anpassung des Getriebebaurums nötig sein, da die Gesamtabmessungen nicht mehr passen können. (Geometriebasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 2: Einhergehend mit dem zur Verfügung stehenden Bauraum des Getriebes kann es notwendig sein, die Ein- und Ausgangswellen des Getriebes räumlich anders anzuordnen. (Geometriebasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 3: Mit einer räumlich anders angeordneten Ein- und Ausgangswelle bedarf es als Zusatzlösung von Kegelzahnradern, um auch 90°-Anordnungen der Wellen zu ermöglichen. (Geometriebasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 4: Der Rover weist eine Lochplattengeometrie auf, um möglichst flexibel diverse Aufbauten montieren zu können. Dabei muss das Lochbild des Getriebes zum Lochbild des Rovers passen. (Geometriebasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 5: Die Grundform für die Welle des Elektromotors kann sich geometrisch, z.B. von rund mit Gewinde auf eckig mit einer Fase, ändern. Dies muss für eine höhere Flexibilität ebenfalls berücksichtigt werden. (Geometriebasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 6: Mittels einer einstufigen Übersetzung werden Drehmoment und Drehzahl gewandelt. Je nach Leistungsfähigkeit der vorliegenden Elektromotoren kann eine mehrstufige Übersetzung erforderlich sein. (Funktionsbasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 7: Um eine hohe Drehmomentübertragung flüssig zu gewährleisten, können schrägverzahnte Zahnräder erforderlich sein. (Funktionsbasiert)
- Flexibilisierungspotenzial 8: Additive Fertigung ermöglicht durch ihr Prinzip eine Anpassung von Innengeometrien, welche z.B. die Steifigkeit erhöhen. Ebenfalls ist Multimaterialdruck ein gängiger Ansatz, mit dem z.B. steife Außenstrukturen und nachgiebige Innenstrukturen eines Zahnrades gedruckt werden können. Im Use Case können somit Innenstrukturen von Komponenten für bestimmte Belastungsfälle angepasst werden. (Eigenschaftsbasiert)

Alle diese Veränderungen können Flexibilisierungspotenziale des HLCT darstellen. Wie hinter den Stichpunkten vermerkt wurde, können diese Gründe ausgehend von den Bedürfnissen des Rovers geometrie-, funktions- oder eigenschaftsbezogen sein. Vorschläge, diese Flexibilisierungspotenziale umzusetzen, werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

Wie können diese Bedarfe im Allgemeinen in HLCTs umgesetzt werden?

Um HLCTs flexibel in Bezug auf veränderte Anwendungsfälle zu gestalten, können verschiedene grundlegende Methoden genutzt werden.

- Lösungsmöglichkeit 1 ist die Änderung bzw. Verbesserung der Grundstruktur /8/. Durch eine Modularisierung verschiedener Schritte kann hier Flexibilität erzeugt werden. Diese Flexibilität kann durch parallele Prozessschritte bzw. Submodule oder anders angeordnete Prozessschritte sowie einer Logik, welche Prozessschritte erforderlich sind, ausgeführt werden. So können mittels eines HLCT, das aus austauschbaren Submodulen (z.B. der Generierung von Zahnrad, Welle oder Gehäuse) besteht, neue Varianten des Getriebes erzeugt werden, ohne die übergeordnete Produktarchitektur neu erarbeiten zu müssen.
- Lösungsmöglichkeit 2 ist die Auslagerung von Parametern in einen Zwischenspeicher /9/. Hier kann eine höhere Flexibilität erreicht werden, wenn wesentliche Abmessungen, Randbedingungen und Konfigurationsregeln als globale Teileparameter ausgelagert werden, statt diese in Skizzen zu verstecken. Hier können konsistente Parameteränderungen durch robuste Referenzen und assoziative Verknüpfungen sichergestellt werden.
- Lösungsmöglichkeit 3 entsteht durch eine klare Benennung und Dokumentation von Parametern /3/. Einheitliche, aussagekräftige Bezeichnungen, Anmerkungen und geführte Benutzerdialogfenster helfen Anwendern zu verstehen, welche Parameter verändert werden dürfen und welche Automatisierungstiefe vorgesehen ist. Diese Transparenz erleichtert es, die HLCTs in neuen Designsituationen sicher wiederzuverwenden, anzupassen oder gezielt zu steuern.
- Lösungsmöglichkeit 4 sind offene Schnittstellendefinitionen und skalierbare Teilebibliotheken hinsichtlich der Erweiterbarkeit, die es erlauben, neue Komponenten in bestehende Templates einzuklinken /2/. Systematische Validierung und Testfälle stellen anschließend sicher, dass erweiterte oder wiederverwendete HLCTs weiterhin korrekt Modelle generieren und ihren vorgesehenen Randbedingungen genügen.
- Lösungsmöglichkeit 5 ist die Ausgestaltung von 3D-Teileskeletons, welche die Einbaupositionen der einzelnen Komponenten auf Basis von Eingangsinformationen festlegen /3/. Dadurch können verschiedene Getriebevarianten flexibel konfiguriert werden.
- Lösungsmöglichkeit 6 besteht in der Wissensspeicherung von diversen Anwendungsfällen und dazugehörigen 3D-Druckvariationen für diverse Belastungsfälle, sodass eine Anpassung von 3D-gedruckten Komponenten möglich wird /10/.
- Lösungsmöglichkeit 7 lässt sich durch eine Einbindung von Large Language Models bzw. Künstliche Intelligenz schaffen. Hier könnten Dialogfenster für den Benutzer während der Design Automation intuitiver gestaltet werden oder der gesamte Prozess kann überdacht werden /11/.

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass weitere Lösungsmöglichkeiten nicht ausgeschlossen werden können. Allerdings können die im vorherigen Kapitel beschriebenen Flexibilisierungspotenziale zu den beschriebenen Lösungsmöglichkeiten im nächsten Kapitel zugeordnet werden.

Wie kann ein flexiblierter HLCT implementiert werden, um verschiedene Konstruktionszwecke zu unterstützen?

Um an die vorher gestellten Forschungsfragen anzuknüpfen, soll nun der neuen Gestaltung eines flexibleren HLCT für den Use Case des automatisierten Erstellens eines Getriebes für das Reuse gebrauchter Komponenten aufgezeigt werden. Dafür ist in Tabelle 1 die Zuordnung der Lösungsmöglichkeiten zu den Flexibilisierungspotenzialen dargestellt.

Tabelle 1: Zuordnung von Flexibilisierungspotenzialen und Lösungsmöglichkeiten

Flexibilisierungspotenziale	Lösungsmöglichkeiten
Flexibilisierungspotenzial 1: Flexible Bauraumänderungen	Lösungsmöglichkeit 1: Änderung der Grundstruktur / Lösungsmöglichkeit 5: Erstellung eines Teileskeletts
Flexibilisierungspotenzial 2: Position der Ein- und Ausgangswellen	Lösungsmöglichkeit 5: Erstellung eines Teileskeletts
Flexibilisierungspotenzial 3: Kegelhöräder als Zusatzlösung	Lösungsmöglichkeit 1: Änderung der Grundstruktur / Lösungsmöglichkeit 4: Skalierbare Teilebibliotheken
Flexibilisierungspotenzial 4: Anpassung der Lochplattengeometrie	Lösungsmöglichkeit 2: Auslagerung von Parametern / Lösungsmöglichkeit 5: Erstellung eines Teileskeletts
Flexibilisierungspotenzial 5: Anpassung an den Schaft des Elektromotors	Lösungsmöglichkeit 2: Auslagerung von Parametern
Flexibilisierungspotenzial 6: Mehrstufige Übersetzungen	Lösungsmöglichkeit 1: Änderung der Grundstruktur
Flexibilisierungspotenzial 7: Schrägverzahrte Höräder als Zusatzlösungen	Lösungsmöglichkeit 1: Änderung der Grundstruktur / Lösungsmöglichkeit 4: Skalierbare Teilebibliotheken
Flexibilisierungspotenzial 8: Belastungsfälle für die additive Fertigung	Lösungsmöglichkeit 6: Wissensspeicherung von Belastungsfällen

Durch diese Zuordnung wurde ein neues, flexibleres HLCT entwickelt. Abbildung 4 zeigt dieses flexiblere HLCT auf Basis der in Abbildung 3 ausgearbeiteten HLCT sowie der in Tabelle 1 vorgestellten Lösungszuordnung.

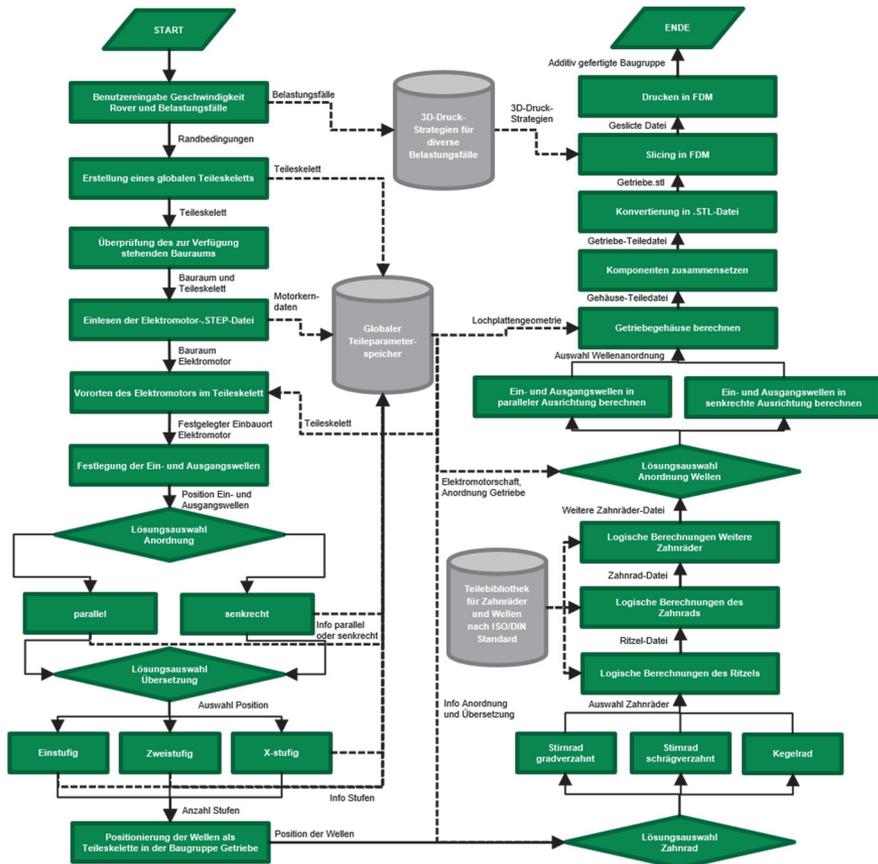


Abbildung 4: Übersicht der erweiterten flexiblen HLCt

In Abbildung 4 lässt sich die erweiterte flexiblere HLCt durch eine veränderte Grundstruktur erkennen. Diese weist durch mehrere Entscheidungsknoten eine höhere Flexibilität auf und ermöglicht es, das Flexibilisierungspotenzial 3, die Kegelnzahnäder als Zusatzlösung, das Flexibilisierungspotenzial 6, mehrstufige Übersetzungen, das Flexibilisierungspotenzial 7, schrägverzahnende Zahnäder mit in die Lösung mit einzubeziehen. Auch das Flexibilisierungspotenzial 2, die Position der Ein- und Ausgangswellen, kann durch eine initiale Benutzerabfrage mit anschließender Auswahl einbezogen werden und ermöglicht eine höhere Getriebekonfigurationsflexibilität. Das Flexibilisierungspotenzial 1, der möglichen Bauraumänderung beruht auf einer vorherigen Erstellung eines Teileskelettes des Rovers und dem anschließenden Einlesen der Elektromotor-Teiledatei. Dies wird durch einen globalen Teilparameter-Speicher unterstützt. Dieser speichert die bekannten Positionen für die Lochbilder des Rovers und des Getriebes

(Flexibilisierungspotenzial 4) zwischen, sodass diese ebenfalls angepasst werden können. Damit die Anschlussgeometrie des Elektromotors ebenfalls berücksichtigt wird, wird auch diese zwischengespeichert und dann an der passenden Stelle übergeben, bzw. abgefragt. Somit kann das Flexibilisierungspotenzial 5 auch berücksichtigt werden. Ein vordefinierter Katalog mit verschiedenen Belastungsfällen des Getriebes soll verschiedene Optimierungsschritte für einen Slicer der 3D-Druck-Datei bieten, um das Flexibilisierungspotenzial 8 zu erfüllen. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass der erweiterte flexibilisierte HLCT noch nicht digital implementiert wurde und daher noch nicht validiert ist.

Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung

Der aufgezeigte Ansatz ist mit einigen Einschränkungen verbunden. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass alle identifizierten Flexibilisierungspotenziale, durch das neue HLCT erschlossen werden. Das erweiterte flexibilisierte HLCT ist nach wie vor mit einem hohen manuellen Erstellungsaufwand verbunden. Sicherlich wird durch die Abdeckung weiterer Anwendungsfälle und eine flexiblere Kombination der Zeitaufwand pro Getriebekonfigurationsfall reduziert, ist aber noch beträchtlich hoch. Eine weitere Limitierung stellt die generelle Betrachtung dar. Die Potenziale und Lösungen wurden auf den Anwendungsfall der Wiederverwendung von gebrauchten Komponenten in neuen Produktgenerationen bezogen. Da dies ein spezifischer Anwendungsfall ist, ist der Betrachtungs- und Analysehorizont mit Sicht auf die Flexibilität beschränkt. Weiterhin wird für die grundlegenden Angaben wie den Drehzahlbereich am Anfang noch eine manuelle Eingabe mittels eines Dialogfensters benötigt. Eine weitere Möglichkeit wäre es, diese Daten im Vorfeld aus den zu Verfügung stehenden Randbedingungen einzulesen.

Aus diesen Limitationen ergeben sich wiederum Möglichkeiten für zukünftige Forschungsthemen. Das flexibilisierte HLCT kann eine Vorlage für ähnliche Anwendungsfelder oder Erweiterungen um weitere gebrauchte Komponenten einer anderen Art sein. Eine Erforschung einer präziseren Gestaltung der Teilebibliothek könnte eine mächtige Datenbank generieren, welche es ermöglicht, HLCTs mit Standard-Komponenten zügig zu generieren, ohne dass es einen manuellen Aufwand gibt, dieses HLCT jedes Mal neu zu erzeugen. Weiterhin stellt sich die Frage, wie der grundsätzliche benötigte Zeitaufwand für die Erstellung der HLCT verringert werden kann. Speziell sollte untersucht werden, wie HLCTs auf Grundlage von bestehenden Konstruktionen mithilfe von künstlicher Intelligenz erzeugt werden könnten. Als weiterer Punkt steht die Umsetzung und Validierung der flexiblen HLCT an. Speziell sollte hier die Anwendbarkeit diverser Anwendungsfälle geprüft werden.

In diesem Beitrag wurde am Beispiel des Use Cases der Wiederverwendung gebrauchter Elektromotoren in neuen Produktgenerationen die Flexibilisierung von High-Level-CAD-templates (HLCT) aufgezeigt. Genauer wurde die Generierung eines Getriebes für gebrauchte Elektromotoren in einem Rover betrachtet und analysiert, welche Flexibilisierungspotentiale bestehen und durch welche

Maßnahmen bei der Strukturierung und Umsetzung des HLCts diese erschlossen werden können. Diese wurde anschließend diskutiert und daraus wurden weitere mögliche Forschungsthemen abgeleitet.

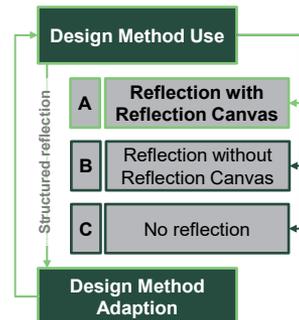
Literatur

- /1/ Umland, N.; Winkler, N.; Inkermann, D.: Multidisciplinary Design Automation of Electric Motors—Systematic Literature Review and Methodological Framework. *Energies* 2023, Schweiz, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16207070>
- /2/ Tarkian, M.: Design Automation for Multidisciplinary Optimization: A High Level CAD Template Approach. Department of Management and Engineering, Linköping University, Linköping, 2012, ISBN 978-91-7519-790-6
- /3/ Amadori, K.; Tarkian, M.; Ölvander, J.; Krus, P.: Flexible and robust CAD models for design automation. Elsevier, 2012, doi: 10.1016/j.aei.2012.01.004
- /4/ Gembarski, P. C.; Ibrahim, B.; Plett, N.; Stötzer, M.: COMBINING KNOWLEDGE-BASED CAD AND ALGORITHMIC MODELING FOR DESIGN AUTOMATION. MCP, Serbien, 2024
- /5/ Kong, H.; Zhang, Z.; Wei, Y.; Liu, Y.: Development of an automated structural design system for progressive dies based on the integrated design methodology of process and structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, London, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11346-9
- /6/ Meyer, J.; Inkermann, D.: Reusing used components in new product generations - a systematic literature review on challenges and future research. *Proceedings of the Design Society*, Dallas, 2025, doi: 10.1017/pds.2025.10293
- /7/ Breidohr, M.; Meyer, J.; Posselt, G.; Inkermann, D.: Concept of a Learning Platform on Circular Product Creation. Springer Nature Switzerland, Cham, 2026, 978-3-031-98879-0
- /8/ Gembarski, P. C.: THREE WAYS OF INTEGRATING COMPUTER-AIDED DESIGN AND KNOWLEDGE-BASED ENGINEERING. INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE, Kroatien, 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.313
- /9/ Stadler, S.; Hirz, M.: A contribution to advanced knowledge-based design in the development of complex mechanical products. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, Korea, 2013
- /10/ Li, Y.; Xu, K.; Liu, X.; Yang, M.; Gao, J.; Maropoulos, P.: Stress-oriented 3D printing path optimization based on image processing algorithms for reinforced load-bearing parts. Elsevier, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.037>
- /11/ Schöfer, F.; Seibel, A.: Augmented design automation: leveraging parametric designs using large language models. *Proceedings of the Design Society*, Dallas, 2025, <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10081>

Strukturierte Reflexion zur Anpassung von Entwicklungsmethoden – Ausschnitt einer experimentellen Studie

Ammersdörfer, T.; Bhatt, A.; Inkermann, D.

Reflexion ist wichtig für die Anwendung und Anpassung von Methoden in der Produktentwicklung, wird jedoch selten systematisch eingesetzt. Diese Studie untersucht, wie das „Reflection Canvas“ Studierende dabei unterstützt, (1) strukturierte Reflexion während der Funktionsmodellierung multimodaler Produkte durchzuführen und (2) ihre Fähigkeit zur Anpassung der Methode zu verbessern. In einer experimentellen Studie mit 87 Masterstudierenden wurden strukturierte, unstrukturierte und keine Reflexion über zwei Modellierungsaufgaben hinweg verglichen. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Canvas leicht nutzbar ist, die Reflexionsstruktur verbessert und das Verständnis der Funktionsmodellierung vertieft. Dies deutet darauf hin, dass strukturierte Reflexionswerkzeuge die Methodenkompetenz in der Ausbildung von Ingenieur:innen stärken können.



Reflection is important for the application and adaptation of methods in product development, yet it is rarely used systematically. This study investigates how the “Reflection Canvas” supports students in (1) conducting structured reflection during functional modeling of multimodal products and (2) improving their ability to adapt the method. In an experimental study with 87 master’s students, structured, unstructured, and no reflection were compared across two modeling tasks. Initial results show that the canvas is easy to use, improves the structure of reflection, and deepens understanding of functional modeling. These findings suggest that structured reflection tools can strengthen methodological competence in engineering education.

Einleitung

Strukturierte Reflexion ist ein wichtiger Ansatz, um komplexe Entwicklungsaktivitäten zu verstehen, kritisch zu hinterfragen und die systematische Anwendung und Anpassung von Entwicklungsmethoden zu unterstützen. Entwickler:innen werden durch die Anwendung von Reflexion dabei unterstützt, kontinuierlich aus ihren Erfahrungen zu lernen und zielgerichtet Anpassungen in Prozessen, Methoden und Ergebnissen zu planen /1/. Das Verständnis für den effektiven Einsatz und die Wirksamkeit von Reflexion für die Anpassung von Entwicklungsmethoden ist essenziell für die kontinuierliche Verbesserung von Produktentwicklungsprozessen in der Praxis, aber auch für die Lehre. Insbesondere

im Kontext der Entwicklung komplexer Produkte unterstützt Reflexion dabei, Unsicherheiten zu bewältigen und die Komplexität im gesamten Produktentwicklungsprozess handhaben zu können /2/. Jedoch wird die Reflexion oft nicht strukturiert angewendet, und es gibt wenige Hinweise auf ihre Wirksamkeit als Instrument für die Methodenlehre. Vielen Anwender:innen fehlen das Bewusstsein und das Verständnis für den Nutzen der Reflexion. Reflexionshilfsmittel wie beispielsweise strukturierte Vorlagen oder Reflexionsleitfragen unterstützen Entwickler:innen dabei, ihre Handlungen zu überprüfen, Fehler zu identifizieren und Verbesserungen zu planen. Entwicklungsmethoden spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle im Produktentwicklungsprozess, da sie operatives Wissen für die systematische Analyse von Problemen, die Entwicklung von Lösungen und die Bewertung und Auswahl von Lösungsvarianten bereitstellen /3/. Aus diesem Grund ist es zweckmäßig, Wissen über Reflexion und Fähigkeiten zur Reflexion bereits in der Ingenieurausbildung zu vermitteln und ein Bewusstsein für die Wirksamkeit von Reflexion bei der Anwendung und Anpassung von Entwicklungsmethoden zu schaffen. Daher wird in diesem Beitrag im Rahmen einer experimentellen Studie mit Masterstudierenden (n = 87) untersucht, wie das Reflexionshilfsmittel „Reflection Canvas“ /4/, Studierende der Ingenieurwissenschaften befähigt, den Reflexionsprozess aktiv anzuwenden, um eine Anpassung ausgewählter Entwicklungsmethoden zur Entwicklung multimodaler Produkte, wie beispielsweise eine Waschmaschine mit „Schnellmodus“ und „Eco-Modus“ oder einen Händetrockner mit „Standbymodus“ und „Trocknungsmodus“, zu verbessern. Die Studie zielt darauf ab, das Verständnis von reflexivem Lernen in der Ingenieuraus- und Weiterbildung zu vertiefen.

Methodeneinführung und -anpassung

Entwicklungsmethoden sind ein unverzichtbarer Bestandteil der Produktentwicklung. Eine Methode beschreibt, wie ein Ergebnis erzielt werden soll. Dazu gehören die Darstellung von Informationen, die verwendeten Ausgangsinformationen (Input) und Werkzeuge, die auszuführenden Aktionen in ihrer Reihenfolge sowie die Aufteilung der Aufgabe /5/. Methoden helfen Entwickler:innen, Anforderungen zu identifizieren, Systemverhalten zu analysieren und ihre Denkprozesse bei der Arbeit mit komplexen Produkten zu strukturieren. Bei anspruchsvollen oder vielschichtigen Entwicklungsaktivitäten erfordern diese Methoden eine sorgfältige Einführung, systematische Durchführung sowie die Fähigkeit, die Methode selbst an unterschiedliche Kontexte anzupassen. Ingenieur:innen benötigen dabei häufig Unterstützung, um Methoden an neue oder abweichende Entwicklungssituationen anzupassen.

Reflexion im Produktentwicklungsprozess

Reflexion als dynamischer Prozess zwischen Bewusstsein und Aktivitäten /6/ wirkt sich positiv auf die Leistung, Innovationsfähigkeit und Effektivität von Entwicklerteams aus. Durch bewusstes Hinterfragen zurückliegender Aktivitäten oder Entscheidungen kann der Entwicklungs- und Innovationsprozess beeinflusst

und kritische Entscheidungssituationen aufgelöst werden /7/. Reflexionsmethoden oder -tools können die praktische Reflexion sowohl auf Team- (z.B. Teamreflexion, vgl. /8/) als auch auf Individualebene (z.B. Selbstreflexion, vgl. /9/) unterstützen. Aber auch die Ingenieurausbildung basiert häufig auf der Vermittlung, Anwendung und Reflexion von Entwicklungsmethoden. Denn durch die praktische Anwendung der Methoden und die anschließenden Reflexionszyklen können die damit verbundenen Denk- und Verhaltensweisen in der Methodenanwendung besser erlernt und verinnerlicht werden /10/.

Funktionsmodellierung multimodaler Produkte

Funktionen definieren den Zweck eines Produkts und fassen Aufgaben oder Aktionen zusammen, die das System ausführen muss, um das gewünschte Verhalten zu erzielen. Funktionen werden in der Regel in einem Verb-Substantiv-Format ausgedrückt (z. B. *Bewegung erkennen* oder *Wasser erhitzen*) und betonen eher das „Was“ als das „Wie“ des Systemverhaltens. Ein Funktionsmodell erfasst die Funktionsweise des Produkts anhand seiner Funktionen und deren Wechselbeziehungen, die als Umwandlungen von Material, Energie und Signalen visualisiert werden /11/. Diese flussbasierte Darstellung grenzt das System ab, bildet Interaktionen mit externen Einheiten sowie Nachbarsystemen ab und organisiert Funktionen hierarchisch, um das Systemverhalten widerzuspiegeln.

Die Funktionsmodellierung ist ein strukturierter analytischer Prozess, bei dem der Zweck eines Produkts in seine Gesamtfunktion (das primäre Ziel) und Unterfunktionen (unterstützende Aufgaben) zerlegt wird. Diese Zerlegung bildet die Grundlage für die Konzepterstellung, indem funktionale Anforderungen geklärt werden, bevor Realisierungsalternativen untersucht werden. Zu den bestehenden Techniken der Funktionsmodellierung gehören unter anderem die *Function Analysis System Technique (FAST)* /12/, *Black Box Modeling* /11/, *Transformation Process* /13/ und die integrierte Funktionsmodellierung nach /14/. Diese Methoden unterscheiden sich in ihrer Darstellungsart (Syntax) und ihrem Betrachtungsschwerpunkt, zielen jedoch in der Regel darauf ab, die Produktfunktionalität systematisch zu erfassen und zu kommunizieren.

Ein komplexes Produkt kann verschiedene Zustände aufweisen, wodurch es verschiedene Funktionen ausführen kann, indem es bestimmte Unterfunktionen aktiviert, seine Struktur modifiziert oder die Art und Weise, wie seine Komponenten miteinander interagieren, verändert /15/. Wenn ein Produkt für einen bestimmten Zweck konfiguriert ist, kann diese Konfiguration als Betriebsmodus betrachtet werden /16/. Multimodale Produkte unterscheiden sich daher von einfachen Produkten, indem sie mehrere Betriebsmodi aufweisen, die oft kontextabhängige Verhaltensweisen und Funktionswechsel einschließen. Ihre Funktionsmodelle müssen daher mehrere Anwendungsfälle und Übergänge berücksichtigen sowie dynamische Funktionspfade darstellen, die über statische Funktionshierarchien hinausgehen. Da sich der Kurs „Design for Industry 4.0“ auf das Design intelligenter und komplexer Produkte konzentriert, wurde die Funktionsmodellierung

multimodaler Produkte als geeignete Wahl für die Bewertung der Wirksamkeit von Reflexionen ausgewählt. Reflexionspraktiken können somit anhand ihrer Auswirkungen auf das Verständnis und die Modellierung dieser multimodalen Produkte sinnvoll bewertet werden.

Forschungsfokus und -ziele

Multimodale Produkte sind aufgrund ihrer vielfältigen Betriebsmodi und ihres dynamischen Verhaltens komplex, wodurch Studierenden das Verstehen und Modellieren solcher Produkte erschwert werden. Das Reflection Canvas /4/ (vgl. Abbildung 1) wurde eingeführt, um Studierende in der Reflexionsdurchführung zu unterstützen, sie zur kritischen Selbsteinschätzung ihrer Funktionsmodellierung anzuleiten und metakognitives Denken während des Entwicklungsprozesses zu fördern.

REFLECTION CANVAS – Tool for carrying out structured reflection			
Organisational Level	1. Feedback: Summarize the reflection scenario/ the initial situation.		
	1.1 What happend? Describe the past initial situation to be reflected upon.	Enter the answer here:	
	1.2 What was the challenge in applying the engineering design method Functional Modeling?	Enter the answer here:	
	1.3 How do you feel about the current status of the results achieved?	Enter the answer here:	
Team Level	2. Reflection: Discussion (e.g. difficulties, strategy).		
	Social Dimension	Process Dimension	Goal Dimension
	2.1 What did you learn from the team and individual point of view during the exercise?	2.2 What did you learn by applying the Function Modeling steps? Please address strengths and weaknesses of the method application.	2.3 How did the method application contribute to improving your understanding of the complex system?
	Enter the answer here:	Enter the answer here:	Enter the answer here:
	3. Planning: Alternatives, measures.		
Team Level	Social Dimension	Process Dimension	Goal Dimension
	3.1 What would you change in terms of collaboration during the Functional Modeling? Please specify concrete measures.	3.2 What would you change in terms of the method procedure? Please specify concrete measures.	3.3 What measures would you take to better understand the functions in a complex system in the future?
	Enter the answer here:	Enter the answer here:	Enter the answer here:

Abbildung 1: Vorlage für das Reflection Canvas inklusive Reflexionsleitfragen zur strukturierten Anwendung von Reflexion basierend auf /4/

Die Reflexionen sollen damit in konkrete Strategien oder Modifikationen der Entwicklungsmethode überführt werden, um die nachfolgenden Iterationen der Methodenanwendung zu verbessern. In Abbildung 1 wird die verwendete Vorlage des Reflection Canvas, gegliedert in die drei Stufen Feedback, Reflexion und Planung, inklusive der Reflexionsleitfragen, exemplarisch dargestellt.

Ziel der Studie ist es, die Anwendbarkeit und Wirksamkeit des Reflection Canvas zur Verbesserung des Verständnisses und der Anwendung ausgewählter Methoden für die Funktionsmodellierung für multimodale Produkte durch Studierende zu evaluieren. Ausgehend von dieser Zielsetzung wurden folgende Forschungsfragen (FF) abgeleitet:

- **FF1:** Wie wirksam unterstützt das Reflection Canvas die Studierenden im Reflexionsprozess (Feedback, Reflexion und Planung) hinsichtlich der Anwendung und Ergebnisbewertung bei der Funktionsmodellierung für multimodale Produkte?
- **FF2:** Wie wirksam unterstützt das Reflection Canvas Studierende erforderliche Anpassungen der Methoden für die Funktionsmodellierung zu planen?

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde eine experimentelle Studie mit 87 Studierenden des Masterstudiengangs Intelligent Manufacturing in der englischsprachigen Lehrveranstaltung „Design for Industry 4.0“ durchgeführt. Der detaillierte Aufbau der Studie wird im nächsten Abschnitt erläutert; in diesem Beitrag wird lediglich ein Ausschnitt der Ergebnisse aus Gruppe A präsentiert.

Aufbau und Ablauf der experimentellen Studie

Die Studie untersuchte die Anwendung von Reflexion im Rahmen der methodischen Funktionsmodellierung multimodaler Produkte und deren Einfluss auf die Entwicklungsergebnisse. Die Teilnehmer setzten sich aus 87 Masterstudierenden des ersten und zweiten Semesters des englischsprachigen Studiengangs Intelligent Manufacturing im Modul *Design for Industry 4.0* zusammen. Als Grundlage diente eine 30-minütige Einführungsvorlesung, die sich auf die Eigenschaften komplexer Produkte, das Konzept multimodaler Abläufe und die Einführung einer ausgewählten Methode zur Funktionsmodellierung konzentrierte. Hierzu wurde der Ansatz von Pahl und Beitz /11/ mit Liu's „Merging Methode“ /16/ kombiniert, um Funktionsstrukturen für multimodale Produkte entwickeln und darstellen zu können. Die kombinierte Funktionsmodellierung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- **Schritte 1–4:** Erstellen Sie unabhängig voneinander Funktionsstrukturen für jeden Modus unter Verwendung der Funktionsmodellierungsmethode von /11/.
- **Schritt 5:** Führen Sie die einzelnen Funktionsstrukturen zusammen und führen Sie eine Funktionssynthese durch.

- **Schritt 6:** Bestimmen Sie die erforderlichen Funktionen und deren Übergänge für jeden Modus.
- **Schritt 7:** Führen Sie Schaltelemente ein und definieren Sie die entsprechende Steuerungslogik.

Diese Entwicklungsmethode wurde anhand eines praxisbezogenen Beispiels, der Funktionsmodellierung eines Elektrofahrzeugs, erläutert, um das Verständnis der Studierenden für den Modellierungsprozess zu verbessern. Im Anschluss an den Einführungsvortrag wurden die Teilnehmenden in drei Gruppen eingeteilt: *Gruppe A* (Experimentalgruppe: Reflexion mit Reflection Canvas), *Gruppe B* (Kontrollgruppe: Reflexion ohne Reflection Canvas) und *Gruppe C* (Baselinegruppe: Keine Reflexion). Jede Gruppe wurde in Unterteams mit je drei Teammitgliedern unterteilt, die gemeinsam an den zugewiesenen Aufgaben arbeiteten. Gruppe A und Gruppe B bestanden jeweils aus 10 Teams (30 Studierende pro Gruppe), während Gruppe C aus 9 Teams mit insgesamt 27 Studierenden bestand. Alle Gruppen führten zwei Übungseinheiten zur Funktionsmodellierung durch: erstens die Modellierung der Funktionen einer „bewegungsgesteuerten solarbetriebenen Straßenlaterne“ und zweitens die Modellierung der Funktionen eines „automatischen Händetrockners“. In Abbildung 2 wird ein Beispiel zur Modellierung der Funktionen einer bewegungsgesteuerten solarbetriebenen Straßenlaterne aus Übung 1 dargestellt.

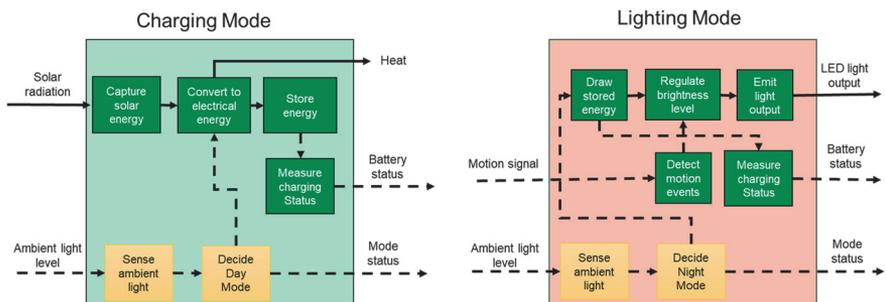


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der Modellierung der Funktionen einer bewegungsgesteuerten solarbetriebenen Straßenlaterne (Übung 1).

Für jede Übung erhielten die Studierenden die ersten funktionalen Anforderungen und ein strukturiertes siebenstufiges Modellierungsvorgehen. Um die Erledigung der Aufgabe zu erleichtern, wurde eine Vorlage in Form von PowerPoint-Folien zur Verfügung gestellt, wobei jede Folie einem Schritt des Modellierungsvorgehens entsprach und erforderliche Entwicklungselemente und Vorlagen enthielt. Eine Übersicht zum Ablauf und zu den eingesetzten Hilfsmitteln während der Studie ist in Tabelle 1 dargestellt. Für jede Übungseinheit standen 25 Minuten zur Verfügung, in denen die Studierenden ihre Ergebnisse entweder am Ende der vorgegebenen Zeit oder nach Abschluss der Übung hochladen konnten. Entscheidend war, dass die Reflexion in den drei Gruppen unterschiedlich eingesetzt wurde, um ihre Auswirkungen auf das Lernen und die Ergebnisqualität zu bewerten. Nach jeder

Übung nahm Gruppe A an einer Reflexionssession teil, die mit Hilfe eines strukturierten Reflexionsrahmens (Reflection Canvas) im Team durchgeführt wurde. Für jede Reflexionssession standen ca. 15 bis 20 Minuten zur Verfügung. Gruppe B reflektierte ohne das Canvas, während Gruppe C keine Reflexion durchführte. Diese Abfolge wurde nach beiden Übungseinheiten zur Funktionsmodellierung wiederholt, sodass zwei Reflexionsrunden entstanden: eine nach der Modellierungsaufgabe für solarbetriebene Straßenlaternen und eine weitere nach der Modellierungsaufgabe für automatische Händetrockner.

Tabelle 1: Übersicht zum Ablauf und den Hilfsmitteln der experimentellen Studie

	Gruppe	Ü1	R1	Ü2	R2	Hilfsmittel
Reflexion mit RC	A	0 ₁	X ₁	0 ₁	X ₂	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Handout zur Erläuterung des RC ▪ Vorlage für RC ▪ Fragebogen für RC
Reflexion ohne RC	B	0 ₁	Y ₁	0 ₂	Y ₂	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Handout ▪ Leere Vorlage für Reflexion ▪ Fragebogen für Reflexion
Keine Reflexion	C	0 ₁	-	0 ₂	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Informationen oder Hilfsmittel
Bearbeitungsdauer		25 min.	15-20 min.	25 min.	15-20 min.	
<i>Legende: RC = Reflection Canvas, Ü = Übungseinheit, R = Reflexionssession</i>						

Methodik für die Datenerhebung und -analyse

Um FF1 zu beantworten, wurde ein kombinierter Methodenansatz angewendet. Zunächst wurde ein Fragebogen verteilt, um die Meinung der Studierenden dazu einzuholen, wie wirksam das Reflection Canvas die Reflexion unterstützt hat. Parallel dazu wurden die schriftlichen Antworten jedes Teams im Canvas für beide Übungen analysiert. Die Analyse konzentrierte sich darauf, herauszufinden, welche Aspekte des Reflexionszyklus – Feedback, Reflexion und Planung – behandelt wurden und über welche konkreten Inhalte die Studierenden in jedem Aspekt reflektiert haben. Anschließend wurden die Antworten aus den Übungen 1 und 2 verglichen, um Veränderungen in der Tiefe, dem Fokus und der Vollständigkeit der Reflexion zu beobachten und so zu beurteilen, wie sich die Reflexionspraktiken und -fähigkeiten der Studierenden durch die wiederholte Verwendung des Canvas weiterentwickelt haben. Tabelle 2 fasst die Methodik zur Datenanalyse für FF1 und FF2 zusammen.

Um die FF2 zu beantworten, wurden die in jeder Übung erstellten Funktionsmodelle systematisch bewertet. Jeder Schritt der Funktionsmodellierung wurde anhand von Kriterien wie Vollständigkeit, Korrektheit und Strukturierung bewertet, um die Qualität der Methodenausführung zu beurteilen. Darüber hinaus wurde der Schritt „Planung“ des Reflection Canvas aus Übung 1 auf Übereinstimmung mit dem in Übung 2 entwickelten Funktionsmodell analysiert, um festzustellen, ob die von den Studierenden geplanten Verbesserungen in die tatsächliche Modellierungspraxis umgesetzt wurden. Schließlich wurden die Unterschiede zwischen den Funktionsmodellen beider Übungen untersucht, um Hinweise auf Anpassungen bei der Funktionsmodellierung durch die Studierenden zu erhalten.

Tabelle 2: Übersicht für die Methodik zur Datenanalyse

Forschungsfragen	Methodik zur Datenanalyse
FF1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Analyse der Umfrageergebnisse zur Wahrnehmung der Wirksamkeit des Canvas durch die Studierenden ▪ Überprüfung der Dokumentationen jedes Teams im Canvas hinsichtlich Feedback, Reflexion und Planung ▪ Vergleich der Antworten im Canvas aus Übung 1 und Übung 2 hinsichtlich der Veränderungen in Bezug auf Tiefe und Schwerpunkt
FF2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewertung jedes Funktionsmodells hinsichtlich Vollständigkeit, Korrektheit und Strukturierung ▪ Überprüfung der Übereinstimmung zwischen den Planungsaussagen aus Übung 1 und dem Funktionsmodell aus Übung 2 ▪ Feststellung von Unterschieden zwischen den Modellen aus Übung 1 und Übung 2, um Verbesserungs- oder Anpassungsmöglichkeiten zu identifizieren

Ausschnitt aus den Ergebnissen des Experiments

In diesem Beitrag wird ausschließlich ein Ausschnitt aus den Ergebnissen der Studie vorgestellt. In Abbildung 3 werden die Ergebnisse der Fragebogenauswertung ($n = 28$) zur Anwendbarkeit und Wirksamkeit des Reflection Canvas (Experimentalgruppe A) präsentiert.

Die erste Auswertung oben links in Abbildung 3 zeigt, dass die Teilnehmenden bisher nur wenige Erfahrungen in der Nutzung von Reflexion gesammelt haben (arithmetisches Mittel = 2,57). Wie in der Auswertung oben rechts in Abbildung 3 zu sehen, war es für den Großteil vergleichsweise leicht, das Reflection Canvas zu verstehen und anzuwenden (arithmetisches Mittel = 3,21).

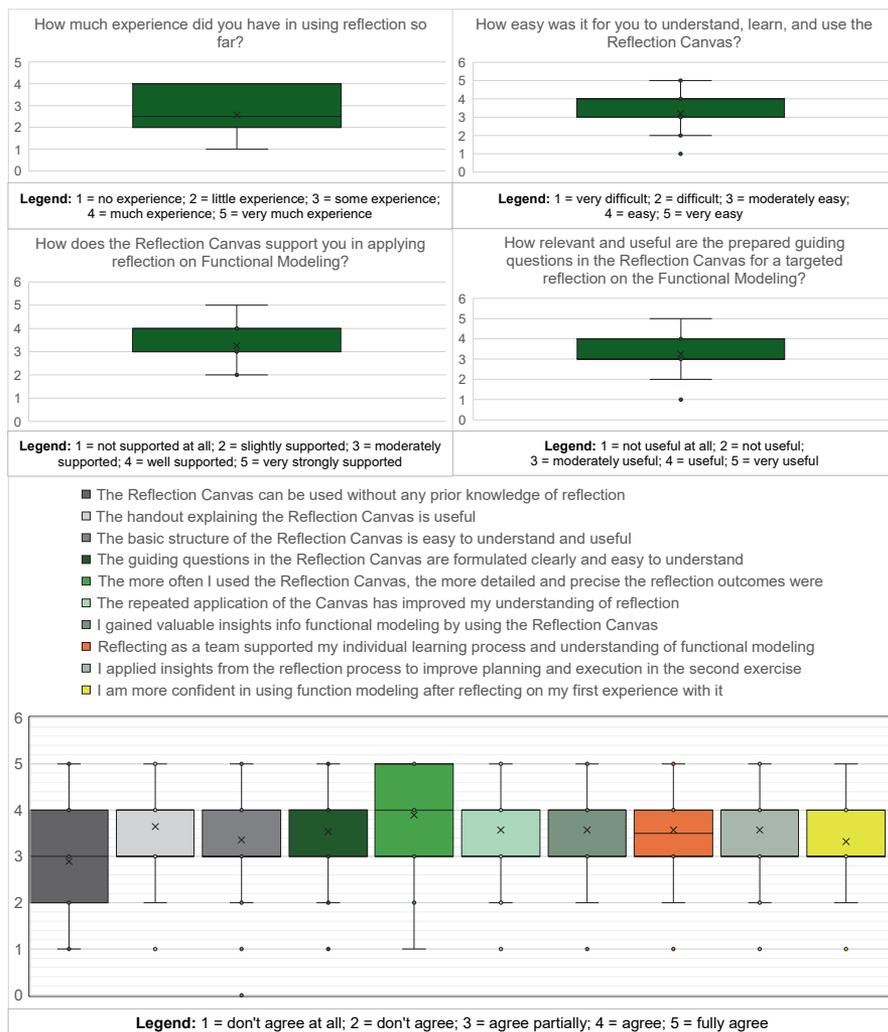


Abbildung 3: Ausschnitt aus den Ergebnissen des Fragebogens zur Anwendbarkeit des Reflection Canvas der Experimentalgruppe (Gruppe A)

Des Weiteren wird bestätigt, dass das Reflection Canvas die Teilnehmenden bei der Anwendung von Reflexion im Rahmen der Funktionsmodellierung unterstützt (arithmetisches Mittel = 3,25). Ebenso bewertet der Großteil der Studierenden die bereitgestellten Leitfragen im Reflection Canvas als nützlich für eine zielgerichtete Reflexion (arithmetisches Mittel = 3,25). Im unteren Teil der Abbildung 3 werden die Ergebnisse der zehn weiteren Statements dargestellt. Hier ist hervorzuheben, dass

die Mehrheit (arithmetisches Mittel = 3,89) bewertet, dass sich die Frequenz der Anwendung des Canvas auf die Ergebnistiefe und -qualität der Reflexion auswirkt. Ein weiterer Aspekt, der hervorgehoben werden sollte, ist, dass die Mehrheit bewertet, dass die Reflexion im Team den individuellen Lernprozess und das Verständnis für die Entwicklungsmethode Funktionsmodellierung unterstützt (arithmetisches Mittel = 3,57). Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass das Reflection Canvas unerfahrene Studierende im Reflexionsprozess unterstützt und wertvolle Einblicke in die Funktionsmodellierung bietet. Des Weiteren ist die mehrfache Anwendung der Reflexion entscheidend, um präzisere und detailliertere Reflexionsergebnisse zu erzielen. Die geplanten Maßnahmen (Schritt 3: Planung) aus der ersten Reflexionsiteration führen bereits zu einer Verbesserung der Planung und Durchführung der zweiten Methodenanwendung (Übung 2 zur Funktionsmodellierung) und damit zu einem Lerneffekt.

Die Analyse für FF2 ist noch nicht abgeschlossen. Um die Effektivität des Reflection Canvas zu evaluieren, werden die Ergebnisse der Funktionsmodellierung aus beiden durchgeführten Übungen von jedem Team verglichen, um die Verbesserung der Methodenanwendung zu beurteilen. Dabei wird geprüft, ob die Teams mehrere Betriebsmodi korrekt identifiziert, übergeordnete Funktionen definiert, Inputs und Outputs spezifiziert, Subfunktionen abgeleitet, kohärente Funktionsstrukturen entwickelt und Übergangsfunktionen zwischen den Modi identifiziert haben. Diese Veränderungen in der Modellqualität werden anschließend mit den im Canvas dokumentierten Reflexionen verglichen, um festzustellen, ob die geplanten Verbesserungen und Erkenntnisse in die Praxis umgesetzt wurden. Durch die Verknüpfung der Reflexionsabsichten der Studierenden (geplante Methoden Anpassungen) mit beobachtbaren Veränderungen in ihren Modellierungsergebnissen zielt die Analyse darauf ab, Schlussfolgerungen darüber zu ziehen, inwieweit strukturierte Reflexion die Methoden Anpassung und die Kompetenzentwicklung unterstützt.

Schlussfolgerungen und Erkenntnisse

Strukturierte Reflexion unterstützt Studierende dabei, Anpassungspotenziale von Entwicklungsmethoden zu identifizieren. Um zu analysieren, wie wirksam eine Entwicklungsmethode ist, sollte der Reflexionsprozess (Planung, Durchführung, Analyse, Anpassung) in den Methodenbewertungsprozess integriert werden. Dabei sollten zum einen die Anwendbarkeit und zum anderen die konkreten Effekte der Methode bewertet werden. Durch die iterative Anwendung von Reflexion mit Hilfe des Reflection Canvas können Herausforderungen identifiziert, eine schrittweise Anpassung der Entwicklungsmethode auf verschiedenen Ebenen (Organisational-, Individual- oder Teamebene) und in unterschiedlichen Dimensionen (sozial-, prozess- oder zielbezogen) erfolgen. Die konkreten Maßnahmen zur Methoden Anpassung werden im dritten Schritt (Planung) des Canvas definiert und in der nachfolgenden Methodenanwendung umgesetzt, was zu einer Verbesserung der Entwicklungsmethode und zur Stärkung der Methodenkompetenz der

Studierenden führen kann. Die detaillierten Effekte sollen in der zukünftigen Forschung näher untersucht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über eine experimentelle Studie, die Reflexion als Hilfsmittel nutzt, um Studierenden Methodenwissen effektiver zu vermitteln und um in diesem Kontext die Wirksamkeit und Anwendbarkeit des Reflection Canvas zu bewerten. Es wird das Studiendesign erläutert, die angewendete Entwicklungsmethode vorgestellt und ein Ausschnitt der Ergebnisse präsentiert. Des Weiteren geben erste Auswertungen Aufschluss darüber, wie effektiv das Reflection Canvas Studierende bei der strukturierten Reflexion in den Phasen Feedback, Reflexion und Planung (FF1) unterstützt. Diese ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Canvas insbesondere unerfahrenen Studierenden hilft, den Reflexionsprozess zu durchlaufen. Die Analyse zur Wirksamkeit des Reflection Canvas hinsichtlich der Verbesserung der Fähigkeit von Studierenden, die Methode Funktionsmodellierung anzuwenden (FF2), ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Daher lassen sich für FF2 noch keine Schlussfolgerungen ziehen. Zukünftige Forschung wird sich auf die Vervollständigung der Analyse konzentrieren, um beide Forschungsfragen umfassend zu beantworten und eine fundierte Diskussion der Ergebnisse und ihrer Implikationen zu ermöglichen. Die ersten Auswertungen zeigen, dass das Reflection Canvas den unerfahrenen Studierenden hilft, die Reflexion strukturiert durchzuführen. Durch die iterative Anwendung der Entwicklungsmethode und die darauffolgenden Reflexionen soll der Lernprozess schrittweise unterstützt werden und dadurch die Methoden- und Reflexionskompetenzen der Studierenden gestärkt werden. In der weiteren Forschung sollen die restlichen Ergebnisse der Studie ausgewertet und interpretiert werden, um FF1 und FF2 vollumfänglich beantworten zu können. Da es sich in diesem Beitrag hauptsächlich um die Vorstellung der experimentellen Studie und um einen Ausschnitt der Auswertungen handelt, ist in der weiteren Forschung eine Erweiterung der Ergebnispräsentation und der Schlussfolgerungen unerlässlich.

Danksagungen

In diesem Artikel wurden mit Hilfe generativer Modelle (ChatGPT, Version GPT-5.1) sprachliche und grammatikalische Überarbeitungen (z.B. Korrektur, Kürzung sowie Anpassung von Texten) vorgenommen.

Literatur

- /1/ Reymen, I. M.; Hammer, D. K.: Structured reflection for improving design processes. In: DS 30 – Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002, S. 887–892.
- /2/ Adams, R. S.; Turns, J.; Atman, C. J.: Educating effective engineering designers: The role of reflective practice. In: Design Studies, Jg. 24 (2003), Nr. 3, S. 275–294.

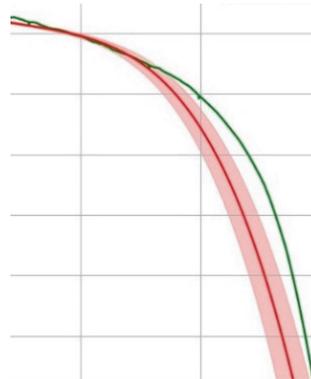
- /3/ Jagtap, S.; Warell, A.; Hiort, V.; Motte, D.; Larsson, A.: Design methods and factors influencing their uptake in product development companies: a review. In: DS 77 – Proceedings of the DESIGN 2014, 13th International Design Conference, 2014.
- /4/ Ammersdörfer, T.; Tartler, D.; Kauffeld, S.; Inkerman, D.: Reflection Canvas – An Approach to Structure Reflection Activities in Engineering Design. In: DS 118 – Proceedings of NordDesign 2022, Copenhagen, Denmark, 16.–18.08.2022, S. 1–12.
- /5/ Gericke, K.; Eckert, C.; Stacey, M.: What do we need to say about a design method? In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17), The Design Society, 2017.
- /6/ Jobst, B.; Thoring, K.; Badke-Schaub, P.: Introducing a tool to support reflection through sketching and prototyping during the design process. In: Proceedings of the International Design Conference (DESIGN 2020), Bd. 1, 2020, S. 207–214. DOI: 10.1017/dsd.2020.263
- /7/ Pecquet, N.: Reflexion impliziter Anteile bei der Konzeptbewertung in frühen Phasen des Innovationsprozesses. In: DFX 2006 – Proceedings of the 17th Symposium on Design for X, Neukirchen/Erlangen, 12.–13.10.2006.
- /8/ West, M. A.: Reflexivity, revolution, and innovation in work teams. In: Beyerlein, M. M.; Johnson, D.; Beyerlein, S. T. (Hrsg.): Product Development Teams, Vol. 150, Stanford, CT: JAI Press, 2000, S. 1–29.
- /9/ Tisdale, T.: Selbstreflexion, Bewußtsein und Handlungsregulation (Fortschritte der psychologischen Forschung). Weinheim: Beltz, Psychologie-Verl.-Union, 1998. ISBN 978-3-621-27421-0.
- /10/ Lavrsen, J. C.; Carbon, C. C.; Daalhuizen, J.: Developing design mindset: how individual and contextual factors influence the development of design mindset through method teaching. In: Journal of Engineering Design, Jg. 36 (2025), Nr. 3, S. 325–354.
- /11/ Pahl, G.; Beitz, W.: Engineering Design – A Systematic Approach. Springer, 2013.
- /12/ Borza, J.: FAST diagrams: The foundation for creating effective function models. In: General Dynamics Land Systems, Nr. 1, 2011.
- /13/ Hubka, V.; Eder, W. E.: Theory of Technical Systems – A Total Concept Theory for Engineering Design. Springer, 2012.
- /14/ Gericke, K.; Eisenbart, B.: The integrated function modeling framework and its relation to function structures. In: AI EDAM, Jg. 31 (2017), Nr. 4, S. 436–457.
- /15/ Zhao, M.; Chen, Y.; Chen, L.; Xie, Y.: A state–behavior–function model for functional modeling of multi-state systems. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C – Journal of Mechanical Engineering Science, Jg. 233 (2019), Nr. 7, S. 2302–2317.
- /16/ Liu, C.; Hildre, H. P.; Zhang, H.; Rølvåg, T.: Conceptual design of multi-modal products. In: Research in Engineering Design, Jg. 26 (2015), Nr. 3, S. 219–234.

Transfer Learning mittels Bayes-Inferenz: Anwendung und Potenziale in der Degradationsprognose

Bauer, R.; Inkermann, D.

Transfer Learning ist ein vielversprechendes Werkzeug für die Degradationsmodellierung unter Datenmangel in frühen Entwicklungsphasen, da Informationen aus Referenzsystemen in die Modellierung einbezogen werden. In diesem Beitrag soll die Bayes-Inferenz als Verfahren des Transfer Learning am Beispiel von Lithium-Ionen-Batterien angewendet und hinsichtlich Prognosegenauigkeit und Verbesserungspotenzialen untersucht werden.

Transfer Learning is a promising tool for degradation modelling under a lack of data in early stages of the development process, as information from reference systems be included for modelling. In this article, transfer learning using Bayesian inference will be applied to lithium-ion batteries and its prognostic accuracy and improvement potentials will be examined.



Einleitung

Die Degradationsmodellierung (DM) ermöglicht in frühen Entwicklungsphasen eine optimale Anpassung der Produktarchitekturen und die Auswahl geeigneter Lebenszyklusstrategien für Komponenten /1/. Allerdings fehlen häufig Daten, um die DM frühzeitig durchführen zu können. Daher müssen Informationen aus Referenzsystemen verwendet werden /2/. Anwendungsfälle und Systemeigenschaften unterscheiden sich dabei meistens zwischen den Referenz- und Zieldaten, was zu einer unsicheren Degradationsprognose führt.

Transfer Learning

Ein vielversprechender Ansatz zur Übertragung vorhandener Informationen auf ähnliche, aber nicht identische Probleme ist das Transfer Learning (TL). Dabei kommen Methoden des Maschinellen Lernens (ML) zum Einsatz, welche Referenzmodelle und deren zugrundeliegende Daten verwenden /3/. TL erkennt gemeinsame Eigenschaften oder Muster in Daten, um neue Modelle zu erstellen, die präzise Ergebnisse für ein breiteres Spektrum spezifischer Probleme liefern als Modelle, die ohne TL erstellt wurden. Dies erfordert eine ausreichende Ähnlichkeit der Eigenschaften der Domänen, die für die TL-basierte Modellierung verwendet

werden /4/. Für die DM werden Domänen aus den betrachteten Systemen und Anwendungsfällen abgeleitet, wie schematisch in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Bildung von Domänen für ML-basierte Degradationsprognosen

Domäne	System	Use Case
Domäne 1		
Domäne 2		
Domäne 3		
Domäne 4		

Vorteile von TL gegenüber anderen ML-Methoden sind der deutlich geringere Datenbedarf und die Möglichkeit, Modelle auf ähnliche Domänen zu übertragen /3/.

Degradation von Lithium-Ionen-Batterien

Mit Eigenschaften wie hoher Energiedichte und langer Lebensdauer sind Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) zum bedeutenden Energiespeicher u. a. in elektronischen Geräten, Elektrofahrzeugen und der Luftfahrt geworden /5/. Batteriedegradation entsteht durch Schadensmechanismen wie chemische Reaktionen, Ioneninterkationen und externe Belastungen. Diese Mechanismen führen zu einem Kapazitätsverlust C_{loss} , der die Leistungsfähigkeit der LIB beeinträchtigt. Ein Hauptschädigungsmechanismen ist das Wachstum einer Passivierungsschicht auf der Oberfläche der negativen Elektrode. Diese wird in der Regel als Festelektrolyt-Interphasen-Schicht (SEI-Schicht) bezeichnet /6/. In /7/ wurde ermittelt, wie häufig Einflussfaktoren der Batteriedegradation als Variablen in empirischen Modellen auftreten und wie diese in berücksichtigt werden (multiplikativ, exponentiell usw.). Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Häufigkeit der Variablen und ihre mathematische Darstellung in empirischen Modellen wird durch den jeweiligen Radius der Kreise und die Pfeilstärken angezeigt. α und β sind meist aus Messwerten bestimmte Konstanten, x_i ist der jeweilige Einflussfaktor als Variable.

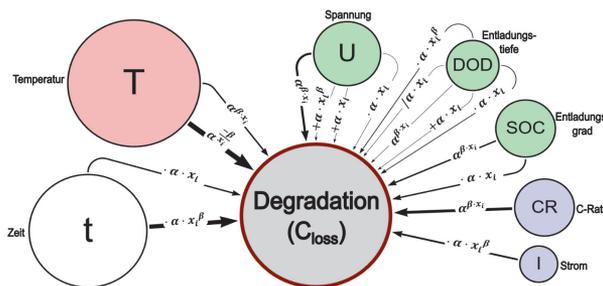


Abbildung 1: Einflussfaktoren der Batteriedegradation /7/

Die Degradationsmodellierung von LIBs unter Verwendung von TL anstelle etablierter empirischer Methoden hat den Vorteil, dass keine neuen Messdaten für neue Anwendungen oder für Variationen der Batterieeigenschaften generiert werden müssen, sondern stattdessen öffentlich zugängliche Daten von Referenzdomänen verwendet werden können.

Bayes-Inferenz

Meistens werden für TL ML-basierte Methoden verwendet. Diese haben allerdings den Nachteil, dass die Ergebnisse nur schwer interpretierbar sind. Soll zum Beispiel die Degradationskurve eines Zielsystems prognostiziert werden, geben ML-Verfahren ohne spezifische Anpassungen nur Rohdaten einer solchen Degradationsprognose aus. Parameter eines Degradationsmodells werden nicht ermittelt. Auch wird keine Unsicherheit der Prognose angegeben. Für weiterführende Untersuchungen ist allerdings die Ausgabe von Degradationsfunktionen und Prognoseunsicherheiten erforderlich, da solche Ergebnisse als Grundlage verwendet werden können, um beispielsweise physikbasierte Ansatzfunktionen zur Verbesserung der Prognose zu implementieren.

In diesem Beitrag soll die Bayes-Inferenz als Methode des TL angewendet werden. Damit lassen sich sowohl Unsicherheiten als auch Parameter von Ansatzfunktionen zur Degradationsprognose auf Grundlage von Referenzdaten und initialen Degradationsdaten des Zielsystems berechnen. Im Allgemeinen basiert die Bayes-Inferenz auf dem Bayesschen Wahrscheinlichkeitssatz. Die Analyse der Modellparameter und die Vorhersagen bei den neuen, noch nicht getesteten Daten basieren auf der posterioren Verteilung der Referenzdaten. Details zur Durchführung der Bayes-Inferenz sollen hier nicht erläutert werden, sind aber in /8/ beschrieben.

Ziele des Beitrags

In diesem Beitrag sollen die Hypothesen überprüft werden, dass die Bayes-Inferenz als TL-Methode genutzt werden kann, um präzise Degradationsprognosen vorzunehmen und zudem eine gute Grundlage für die Entwicklung physikbasierter TL-Verfahren bietet. Solche Verfahren stellen eine Lücke im aktuellen Stand der Forschung dar. Um diese Hypothesen zu prüfen, sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden.

- Wie präzise sind mittels Bayes-Inferenz erstellte Degradationsmodelle?
- Wie unterscheiden sich die Ergebnisse, wenn sich einerseits nur die Anwendungsfälle unterscheiden und andererseits auch unterschiedliche LIBs berücksichtigt werden?
- Welche Verbesserungspotenziale und Möglichkeiten zur Integration physikbasierter Ansätze bieten TL-Prognosen mittels Bayes-Inferenz?

Datenbasis zur Batteriedegradation

Für die DM wurde zunächst eine MIT-Datenbank /9/ verwendet, die Degradationsdaten von 124 LIBs mit einer Nennkapazität von 1,1 Ah enthält. Die LIBs wurden bei einer Temperatur von 30 °C unter unterschiedlichen Lade-, aber identischen Entladebedingungen zyklisch betrieben. Insgesamt wurden 72 verschiedene Ladevarianten für jeweils zwei LIBs angewendet. Alle Zellen wurden mit einem konstanten Strom von 4,4 A entladen, bis die Batteriespannung 2,0 V erreichte, und dann unter konstanter Spannung weitergeladen, bis der Ladestrom unter 22 mA lag. Der Datensatz umfasst Messungen von Strom, Spannung, Kapazität, Innenwiderstand und Temperatur während des Ladezyklus. Dieser Datensatz eignet sich zur Bewertung von TL mittels Bayes-Inferenz für identische Systeme unter verschiedenen Anwendungsfällen.

Um die Bayes-Inferenz auch für verschiedene Systeme zu testen, wurde eine zusätzliche Datenbank der NASA /10/ verwendet, die Datensätze von 38 LIBs mit einer Nennkapazität von 2 Ah enthält. Die LIBs wurden bei verschiedenen Temperaturen (4 °C, 24 °C, 43 °C) betrieben. Das Laden erfolgte bei 1,5 A, bis die Batteriespannung 4,2 V erreichte, und wurde unter konstanter Spannung fortgesetzt, bis der Ladestrom auf 20 mA abfiel. Für die Entladung wurden insgesamt 10 unterschiedliche Profile für Entladung und Temperaturen getestet. Die Datensätze umfassen Messungen des Anschlussstroms, der Spannung und der Temperatur während eines Zyklus sowie Messungen der Entladekapazität und Impedanz von Zyklus zu Zyklus.

Implementierung von Transfer Learning mittels Bayes-Inferenz

Für die Degradationsmodellierung wurde eine Kombination aus Convolutional Neural Network (CNN) und Bayesscher Inferenz gewählt. Das Verfahren ist analog zu /8/ aufgebaut und dort detailliert beschrieben. Mittels zu definierender Referenzdaten aus den Datensätzen /9, 10/ wird zunächst das CNN trainiert und damit Referenzmodelle für die Zykluslebensdauer erstellt. Diese Referenzmodelle, die Referenzdaten und initiale Degradationsdaten des ausgewählten Zielsystems werden anschließend als Eingabe der Bayes-Inferenz genutzt. Die DM wurde unter Verwendung der ersten 30 % der Degradationszyklen der Ziel-LIBs durchgeführt. Für die Bayessche Inferenz wurde dabei anstelle der Exponentialfunktion aus /8/ eine Polynomfunktion 4. Ordnung als Ansatzfunktion verwendet. Dies führte zu besseren Ergebnissen für den MIT-Datensatz.

Die in /8/ vorgeschlagene Kombination aus CNN und Bayesscher Inferenz wurde in Python implementiert. Da in /8/ kein Code bereitgestellt ist, wurde die Implementierung unabhängig entwickelt, folgt jedoch eng der dort skizzierten Struktur, um den Entwicklungsaufwand zu reduzieren. Einige Parameter, wie die Anzahl der CNN-Trainingsepochen und die verwendeten Datensätze, unterscheiden sich (diese Arbeit verwendet zusätzlich Daten aus /10/ neben /9/), was zu geringfügigen Code-Abweichungen führt. PyTorch wurde für das CNN und die

quantitative Ähnlichkeitsanalyse der Degradationsdaten verwendet, scikit-learn für die Datenaufbereitung, SciPy und NumPy für die Bayessche Inferenz und weitere Schritte zur Datenaufbereitung. Die Gesamtprogrammstruktur folgt /8/ und wird daher nicht im Detail erläutert.

Ergebnisse für verschiedene Anwendungsfälle

Um die implementierte TL-Methode zu trainieren, wurden 45 LIBs aus der MIT-Datenbank ausgewählt und in 14 Ziel- und 31 Trainingsdatensätze unterteilt. Ähnlich wie in /8/ wurden nur die ersten 30% der Degradationszyklen der Referenzdaten zum Trainieren des CNN-Modells verwendet. Das CNN wurde zur Vorhersage der Zykluslebensdauer der 14 Ziel-LIBs verwendet. Um die Genauigkeit des CNN-Modells zu bewerten und mit anderen Veröffentlichungen zu vergleichen, wurden der mittlere absolute Fehler (MAE), der mittlere quadratische Fehler (RMSE), der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) und das Bestimmtheitsmaß (R^2) zwischen den Prognosen und den tatsächlichen Werten ermittelt. Einzelheiten zur Berechnung sind in /8/ zu finden. Abbildung 2 zeigt die Prognoseergebnisse (Testdaten) im Vergleich zur tatsächlichen Lebensdauer der Zieldaten (Ideal Fit).

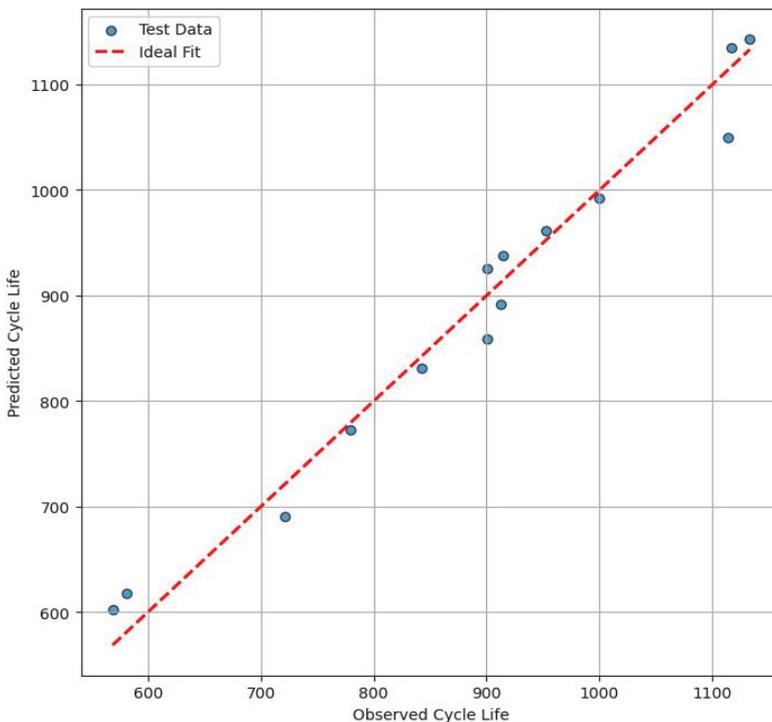


Abbildung 2: Prognoseergebnisse des CNN-Modells für die MIT-Daten

Die DM mittels Bayes-Inferenz wurde unter Verwendung der ersten 30% der Degradationszyklen der Ziel-LIBs durchgeführt. Für die meisten LIBs wurden genaue Ergebnisse erzielt. Beispielsweise wurden die in Tabelle 2 zusammengefassten Genauigkeitsparameter für den in Abbildung 3 vorhergesagten Degradationsverlauf berechnet.

Tabelle 2: Genauigkeitsmaße der DM für die MIT-Daten

MAE	RMSE	MAPE	R ²
0.0134 Ah	0.0196 Ah	1.502%	0.9587

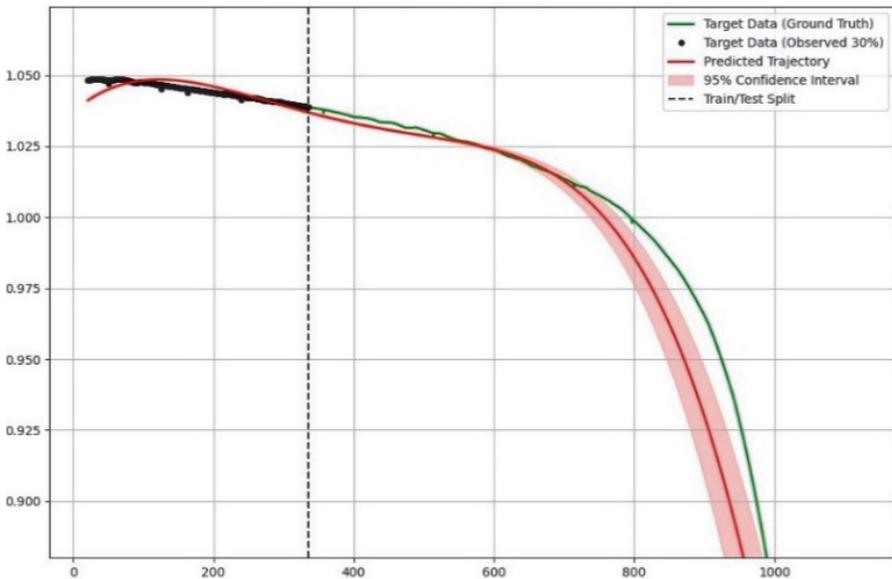


Abbildung 3: Degradationsprognose mittels Bayes-Inferenz für die MIT-Daten

Bei einigen anderen Ziel-LIBs wurden jedoch niedrigere Genauigkeitswerte von etwa $R^2=0,8$ erreicht. Wenn die initialen Zieldaten weniger Ähnlichkeit mit den Referenzdaten aufweisen, kann dies zu ungenaueren Ergebnissen führen.

Ergebnisse für verschiedene Batterien und Anwendungsfälle

Um zu testen, ob das implementierte Degradationsmodell für verschiedene Systeme und Anwendungsfälle geeignet ist, wurde es auf den Datensatz der NASA angewendet. Das CNN Basismodell wurde zusätzlich mit NASA-Daten aus 12 LIBs (Few-Shot) trainiert, indem das CNN mit einer 100-mal niedrigeren Lernrate als beim Vortraining mit MIT-Daten feinabgestimmt wurde. Dadurch werden die Modellpara-

meter des CNN nur in seinen letzten Schichten optimiert und nicht grundlegend an die zusätzlichen Daten angepasst. Basierend auf dem feinabgestimmten Modell wurde die Lebensdauer von 6 Ziel-LIBs vorhergesagt. Abbildung 4 zeigt die Vorhersage im Vergleich zur realen Lebensdauer der Zieldaten. Es gab erhebliche Abweichungen, aber es wurden auch präzise Vorhersageergebnisse erzielt.

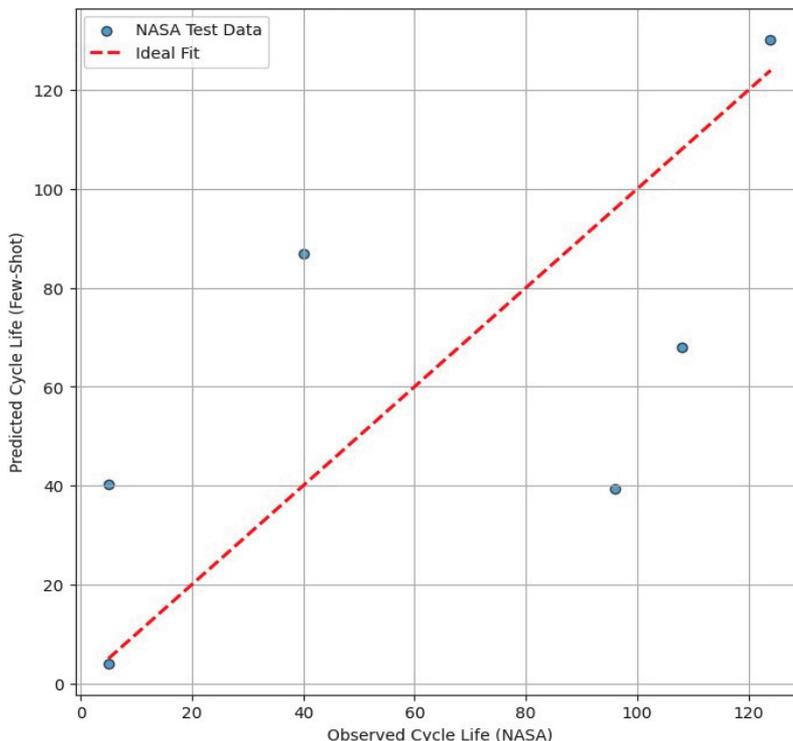


Abbildung 4: Prognoseergebnisse des CNN-Modells für die NASA-Daten

Um den Degradationsverlauf vorherzusagen, wurde erneut TL unter Verwendung der ersten 30 % der Degradationszyklen der Ziel-LIBs durchgeführt. Für den vorhergesagten Degradationsverlauf einer Ziel-LIB in Abbildung 5 wurden $R^2=0,7765$ und $MAPE=3,879\%$ erreicht.

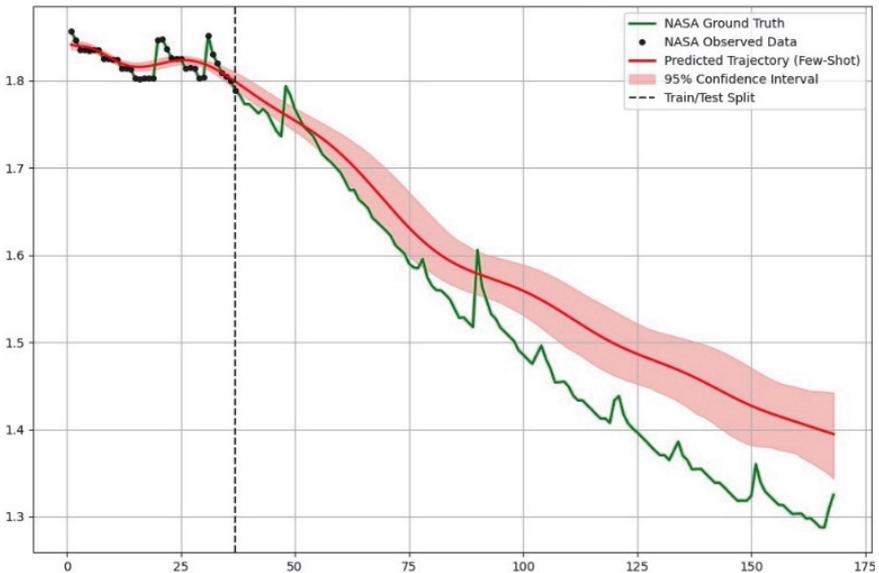


Abbildung 5: Degradationsprognose mittels Bayes-Inferenz für die NASA-Daten

Der Degradationsverlauf in Abbildung 5 zeigt im Vergleich zu Abbildung 3 die erheblichen Unterschiede zwischen den Daten des MIT und denen der NASA. Daher führt die Feinabstimmung des implementierten Degradationsmodells für die LIBs der NASA zu weniger genauen Ergebnissen als für die Daten des MIT.

Bewertung der Ergebnisse und Potenziale

TL-basierte Degradationsprognosen für LIBs aus /8, 11-13/ werden als Referenz für die Genauigkeitsbewertung der hier vorgestellten Ergebnisse verwendet. MAPE wurde als Bewertungsparameter für die Beurteilung der Genauigkeit der mit Bayes-Inferenz vorhergesagten Degradationspfade gewählt, da die anderen Genauigkeitsparameter in /8, 11-13/ nicht immer angegeben sind. Die Referenzmodelle wurden auf verschiedenen Anwendungsfälle angewendet, jedoch nur mit Daten aus gleichen Systemen trainiert. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Trainingsmethoden für unterschiedliche Batterien wurden nicht durchgeführt. Die berechneten Werte für die Prognosegenauigkeit beziehen sich immer auf bestimmte LIBs aus den verwendeten Datensätzen. Da die eigene Beispiel-LIB zufällig ausgewählt wurde und nicht die LIB mit den bestmöglichen Ergebnissen, wurden die weniger genauen Ergebnisse der Vergleichsmodelle als Referenz verwendet. Diese sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Genauigkeitsparameter der Degradationsprognosen

TL-Verfahren	Use Case	System	MAPE
Erstelltes	variabel	gleich	1.50%
aus /11/	variabel	gleich	1.44%
aus /12/	variabel	gleich	1.55%
aus /13/	variabel	gleich	1.71%
aus /8/	variabel	gleich	0.79%
Erstelltes	variabel	variabel	3.88%

Ein Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 3 zeigt, dass das implementierte Modell ähnlich genau ist wie andere präzise TL-basierte Degradationsmodelle. Das als Referenz verwendete Modell aus /8/ weist teilweise bessere Werte für die Genauigkeit auf (z. B. MAPE, RMSE, MAE), während einige Parameter ähnlich gut sind (z. B. R^2). Um die Ergebnisse aus /8/ zu erreichen, sind geringfügige Optimierungen des erstellten Modells erforderlich, z. B. hinsichtlich Parameter wie der Lernrate oder der Anzahl der Trainingsepochen. Das erstellte Degradationsmodell liefert teilweise gute, aber weniger präzise Ergebnisse für verschiedene Systeme und Anwendungsfälle. Für einige LIBs sind hier die Prognoseergebnisse ungenau.

Weitere Leistungsverbesserungen des vorgestellten TL-Ansatzes mittels Bayes-Inferenz sind möglich, beispielsweise durch Optimierung der Modellparameter (z. B. Lernrate) oder geringfügige strukturelle Anpassungen (z. B. Anzahl der CNN-Schichten). Weiterhin kann das CNN-Basismodell auch durch andere Verfahren ersetzt werden. So handelt es sich bei CNNs um ML-Methoden, bei denen wichtige Einflussgrößen und Muster der Degradation (Features) automatisch bestimmt werden und bei der anschließenden Degradationsprognose einen hohen Einfluss haben. Es gibt jedoch auch ML-Verfahren, z.B. Random Forests, bei welchen die Featureextraktion manuell vorzunehmen ist. In weiterführenden Forschungsarbeiten sollen Untersuchungen dazu vorgenommen werden, welche Vor- und Nachteile ein Basismodell mit manueller Featureextraktion bietet und welche zusätzlichen Anforderungen sich daraus ergeben. Weiterhin erfolgt die TL-basierte Degradationsprognose mittels Bayes-Inferenz auf Grundlage einer Ansatzfunktion samt zu ermittelnder Parameter. Hier bietet sich im Gegensatz zu ML-basierten TL-Verfahren eine unmittelbare Möglichkeit, ein physikbasiertes Modell zu implementieren. Hier soll zukünftig geprüft werden, ob und wie sich die Leistungsfähigkeit des vorgestellten TL-Verfahrens verbessern lässt, wenn die Ansatzfunktion der Bayes-Inferenz aus mathematischen Gleichungen zur Beschreibung der Degradationsmechanismen der Zielsysteme gebildet wird und damit auf physikalischen Zusammenhängen beruht. Dabei soll auch untersucht werden, in wie weit sich bei einer solchen physikbasierten Bayes-Inferenz der Bedarf an initialen Degradationsdaten des Zielsystems reduzieren lässt, ohne die Prognosegenauigkeit zu senken. Es soll erforscht werden, ob nur Informationen des Zielsystems zu den Einflussgrößen der Degradation ohne initiale Degradationsdaten genügen, um die physikbasierte Ansatzfunktion der Bayes-Inferenz anzupassen.

Damit bietet das vorgestellte TL-Verfahren eine sehr gute Grundlage für umfassende weiterführende Untersuchungen und Verbesserungen.

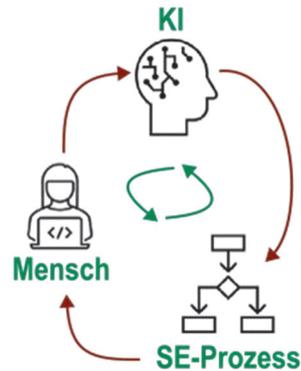
Literatur

- /1/ van den Bogaard, J. A.: Product lifecycle optimization using dynamic degradation models. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2006. DOI 10.6100/IR600023
- /2/ 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
- /3/ Weiss, K.; Khoshgoftaar, T. M.; Wang, D.: A survey of transfer learning. In: Journal of Big Data Vol. 3, 2016, Nr. 9. DOI 10.1186/s40537-016-0043-6
- /4/ 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
- /5/ Wang, F., Zhai, Z., Zhao, Z. et al.: Physics-informed neural network for lithium-ion battery degradation stable modeling and prognosis. In: Nature Communication Vol. 15, 2024, Nr. 4332. DOI 10.1038/s41467-024-48779-z
- /6/ Rechkemmer, S.: Lifetime modeling and model-based lifetime optimization of Li-ion batteries for use in electric two-wheelers. Stuttgart, Universität Stuttgart, 2020. DOI 10.18419/opus-10979
- /7/ Bauer, R.; Inkermann, D.: Analysis of degradation models for modelling the lifetime heterogeneity of complex systems. In: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X, 2022. DOI 10.35199/dfx2022.16
- /8/ 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(1), 2022, Nr. 100008. DOI 10.1016/j.geits.2022.100008
- /9/ Severson, K. A.; Attia, P. M.; Jin, N. et al.: Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. In: Nature Energy Vol. 4, 2019, S. 383–391. DOI 10.48550/arXiv.2110.09687
- /10/ Saha, B.; Goebel, K.: Battery Data Set. Moffet Field, NASA Ames Research Center, 2007. <https://phm-datasets.s3.amazonaws.com/NASA/5.+Battery+Data+Set.zip>
- /11/ 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(D), 2025, Nr. 124766. DOI 10.1016/j.apenergy.2024.124766
- /12/ 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, Nr. 100293. DOI 10.1016/j.etrans.2023.100293
- /13/ 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, Nr. 235534. DOI 10.1016/j.jpowsour.2024.235534

Kollaboration von Mensch und KI zur Unterstützung von Systems Engineering-Prozessen

Schumacher, T.; Inkeremann, D.

Dieser Beitrag untersucht die Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) zur Unterstützung von Prozessen im Systems Engineering (SE). Auf Basis einer Literaturrecherche werden SE-Prozesse und die korrespondierenden Entwicklungstätigkeiten identifiziert, die mithilfe von KI unterstützt werden können. Zudem wird der konkrete Nutzen von KI für die jeweiligen Entwicklungstätigkeiten bestimmt. Außerdem analysiert dieser Beitrag die Kollaboration zwischen Mensch und KI bei der Ausführung von Entwicklungstätigkeiten und unterscheidet vier Stufen der KI-Autonomie.



This article investigates the application of artificial intelligence (AI) approaches to support systems engineering (SE) processes. To this end, a literature review is used to identify SE processes and their corresponding engineering activities that can be supported by AI. Additionally, specific benefits of AI for each respective engineering activity are determined. This article also examines the collaboration between humans and AI while executing an engineering activity, categorizing it into four levels of AI autonomy.

Einleitung und Forschungsfragen

Systems Engineering (SE) ist ein interdisziplinärer Ansatz zur Unterstützung der Entwicklung und Realisierung technischer Systeme. SE betrachtet die Produktentwicklung als Problemlösungsprozess, indem ausgehend von den Kundenbedarfen und den erwarteten Systemfunktionen (*Problem*) ein geeigneter Systementwurf (*Lösung*) erzeugt wird. Außerdem fördert SE die interdisziplinäre Entwicklung, indem der Entwicklungsprozess vom Konzept über die Herstellung bis zur Verwendung des Systems strukturiert wird (*Systems Engineering Vorgehensweise*) und SE die Betrachtung des zu entwickelnden Systems aus unterschiedlichen Perspektiven ermöglicht. Außerdem sind während der Problemlösung die Prinzipien des *Systems Thinkings* zu berücksichtigen. //1/ Abbildung 1 visualisiert die eingeführten Elemente des Systems Engineerings und setzt diese in einen gemeinsamen Kontext. Die Operationalisierung von Systems Engineering erfordert die Einführung von Prozessen, Methoden und Werkzeugen, die sowohl die *technische Systementwicklung* als auch das *Projektmanagement* während der Entwicklung definieren und unterstützen.

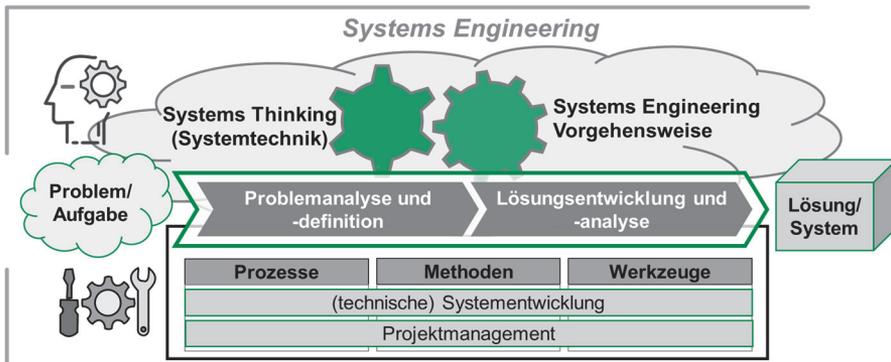


Abbildung 1: Grundverständnis und Elemente des Systems Engineering /2/

Eine Übersicht der notwendigen Prozesse zeigt Abbildung 2 auf Basis der ISO/IEC/IEEE 15288 /3/. Hierbei greift /3/ den Bedarf an Prozessen zur Ausführung der Systementwicklung (*technische Prozesse*) und des Projektmanagements (*technische Managementprozesse*) auf und detailliert diese anhand konkreter Prozessbeschreibungen. Außerdem ergänzt die Norm *Vertrags- und organisatorische Unterstützungsprozesse* als weitere Prozesskategorie, die zur erfolgreichen Ausführung des Entwicklungsprojekts erforderlich sind. Grundsätzlich ist bei der Einführung von Prozessen im Systems Engineering zu beachten, dass die eingeführte Norm durch die Zusammenführung verschiedener Best Practices einen guten Überblick bietet. Es ist jedoch erforderlich, die Prozesse stets an organisationspezifische Anforderungen sowie an externe, beispielsweise rechtliche, Randbedingungen anzupassen. Außerdem bedarf die Ausführung dieser SE-Prozesse konkrete Entwicklungstätigkeiten, wie bspw. die Definition der Systemschnittstellen als Teil der Architekturgestaltung.

In der aktuellen SE-Fachliteratur werden vermehrt Ansätze der Künstlichen Intelligenz diskutiert und vorgestellt, um die Ausführung verschiedener SE-Prozesse zu unterstützen, siehe bspw. /4/. Daher verfolgt dieser Beitrag die Zielstellung, anhand einer Literaturrecherche den Einsatz von KI zur Unterstützung von SE-Prozessen zu untersuchen. Hierbei wird folgende übergeordnete Forschungsfrage untersucht: *Welche SE-Prozesse können durch den Einsatz von KI unterstützt werden und was ist der konkrete Nutzen?* Ausgehend von dieser Forschungsfrage wurden folgende detailliertere Fragestellung abgeleitet:

- RQ1: Welche SE-Prozesse können durch KI unterstützt werden?
- RQ2: Bei welchen konkreten Entwicklungstätigkeiten kann KI den jeweiligen SE-Prozess unterstützen?
- RQ3: Welche Vorteile/Nutzen bietet die KI-Unterstützung?

Außerdem untersucht dieser Beitrag unterschiedliche Autonomiegrade Künstlicher Intelligenz bei der Ausführung von Entwicklungstätigkeiten. Hierbei wird insbesondere die Kollaboration zwischen Mensch und KI untersucht.

Technische Prozesse		Technische Management-Prozesse		Vertragsprozesse			
1	Geschäfts- oder Auftragsanalyse	8	Integration	1	Projektplanung	1	Beschaffung
2	Definition der Stakeholder-Bedarfe und -Anforderungen	9	Verifikation	2	Projektbewertung und -steuerung	2	Liederung
3	Definition der Systemanforderungen	10	Übergabe	3	Entscheidungsmanagement	Organisatorische Unterstützungsprozesse	
4	Architekturgestaltung	11	Validierung	4	Risikomanagement	1	Lebenszyklusmodell-Management
5	Entwurf	12	Betrieb	5	Konfigurationsmanagement	2	Infrastrukturmanagement
6	Systemanalyse	13	Wartung	6	Informationsmanagement	3	Portfoliomanagement
7	Umsetzung	14	Entsorgung	7	Messung	4	Personalmanagement
				8	Qualitätssicherung	5	Qualitätsmanagement
						6	Wissensmanagement

Abbildung 2: Systemlebenszyklusprozesse nach /3/

Der nachfolgende Abschnitt erläutert zunächst die Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche und beantwortet grundlegend die aufgeworfenen Forschungsfragen.

Literaturrecherche: KI zur Unterstützung von SE-Prozessen

Die durchgeführte Literaturrecherche soll den Nutzen von KI bei der Ausführung von SE-Prozessen untersuchen. Tabelle 1 stellt das Ergebnis der Studie dar, indem die identifizierten SE-Prozesse und die konkreten Entwicklungstätigkeiten, bei denen KI unterstützen kann, sowie der resultierende Nutzen zusammengefasst werden. Grundlage für die Literaturstudie ist folgender Suchstring, der innerhalb von Google Scholar als Titel-Search angewendet wurde: *"Systems Engineering" AND "Artificial Intelligence" OR "AI"*.

Table 1: Ergebnis Literaturrecherche zum Einsatz von KI zur Unterstützung von SE-Prozessen

SE-Prozess (RQ1)	Entwicklungstätigkeiten (RQ2)	Vorteile/Nutzen (RQ3)	Ref.
Anforderungs-entwicklung	Anforderungen erfassen und formulieren; Anforderungen priorisieren und zusammenfassen; Qualitätsprüfung der Anforderungen (Mehrdeutigkeit, Inkonsistenzen); Analyse von Trace-Links und Änderungsauswirkungen	Schnellere Erhebung von Anforderungen; höhere Anforderungsqualität; frühe Fehlerentdeckung; bessere Nachverfolgbarkeit	/5/ /6/ /7/ /8/ /9/
(Modellbasierte) Architektur-entwicklung	Überführung natürlicher Sprache, Skizzen, Abbildungen in Modelle; Mustererkennung; Modellanalysen; Konsistenzprüfungen	Geringere Einstiegshürde; schnelleres Modellieren; konsistente Reviews; Modellwiederverwendung	/6/ /7/ /9/ /10/
System-entwurf	Bewertung von Entwurfsalternativen; generatives Design; Sensitivitäts-/ Robustheitsanalyse	Schnellere Auflösung von Zielkonflikten (Leistung/ Gewicht/ Kosten/ Energie); Schnellere Entscheidungsfindung	/8/ /11/ /13/
Integration	Kompatibilitätsprüfungen von Schnittstellen; Integrationsreihenfolge/-planung	Weniger Integrationsfehler; reduzierter Zeitaufwand; frühere Fehlerentdeckung; robustere Schnittstellen	/11/ /12/
Konfigurations-/ Änderungsmanagement	Change-Impact-Prognose; Versionierung von Cls, Daten und Modellen; Wahrung und Prüfung der Traceability	Bessere Compliance und Auditierbarkeit; sichere Updates/Rollbacks; bessere Impact-sichtbarkeit	/11/ /12/
Verifikation, Validierung & Absicherung	Generierte Testfälle, priorisierte Testfälle; Überprüfung von Modellen und Spezifikationen	Frühere Fehlerfindung; höhere Abdeckung mit weniger Tests; stärkere Evidenz/Vertrauen	/6/ /14/ /15/

Die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse zeigen grundsätzlich auf, dass in der aktuellen Literatur KI überwiegend zur Unterstützung technischer SE-Prozesse eingesetzt wird, wie Anforderungs- und Architekturentwicklung sowie Integration und Verifizierung. Dabei unterstützt KI nicht die Ausführung des jeweiligen SE-Prozesses selbst, sondern wird zur Ausführung konkreter Entwicklungstätigkeiten eingesetzt, die zur Bearbeitung des SE-Prozesses beitragen, wie bspw. die Bewertung verschiedener Entwurfsalternativen innerhalb des Systementwurfs. Die Literaturanalyse zeigt jedoch auch auf, dass ebenfalls technische Managementprozesse, wie das Konfigurationsmanagement, mit KI unterstützt werden können. Dabei kann KI bspw. die durchgängige Versionierung von Konfigurations-Items (CIs), Daten und Modellen unterstützen, um somit die Fehlerhäufigkeit bei Updates zu reduzieren. Daher lässt sich grundlegend schlussfolgern, dass durch den Einsatz von KI die Ausführung konkreter Entwicklungstätigkeiten im Systems Engineering unterstützt werden kann und somit sowohl die Entwicklungseffizienz als auch die Entwicklungsqualität potenziell gesteigert werden können. Die dargestellten Ergebnisse können jedoch nicht als abschließend betrachtet werden, da die Literaturanalyse durch weitere Veröffentlichungen angereichert werden könnte und sich die verfügbaren KI-Technologien derzeit stark weiterentwickeln.

Die Anwendung von KI im Systems Engineering birgt auch Herausforderungen und Risiken. Erste Analysen zeigen, dass die automatisierte Erstellung von Systementwürfen oder Dokumentationen oft nicht alle Designaspekte, wie Herstellbarkeit, Rückverfolgbarkeit oder Konformität, berücksichtigt, was zu höheren Entwicklungsaufwänden in den folgenden Entwicklungsphasen führen kann /4,16/. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bspw. die Entwicklung eines Systementwurfs immer als iterativer Prozess zu betrachten ist. Dies ist auch bei einer KI unterstützenden Entwicklung des Systementwurfs zutreffend. Diese Iterationen können sowohl eigenständig durch die KI als auch in Kooperation mit Entwicklern durchgeführt werden. Daher untersucht der folgende Abschnitt verschiedene Stufen der KI-Autonomie bei der Bearbeitung von Entwicklungstätigkeiten.

Autonomiestufen Künstlicher Intelligenz

Die durchgeführte Literaturstudie zeigt auf, dass KI bei vielfältigen Entwicklungstätigkeiten unterstützen kann. Dabei wird zunehmend deutlich, dass KI nicht nur als isolierte Automatisierungstechnologie dient, sondern zunehmend als aktiver Partner in die Ausführung von Entwicklungstätigkeiten integriert wird. Aktuelle Studien untersuchen daher die Zusammenarbeitsformen zwischen Mensch und KI-System und beschreiben dies als *Co-Creation*. Hierbei tragen menschliche Entwickler:innen und KI-Systeme gemeinsam unter verschiedenen Kooperationsstrategien (menschengeführt, maschinengeführt oder ausgewogen) zur Generierung, Bewertung und Auswahl von Designalternativen bei /17/. Hierzu lassen sich vier Stufen der KI-Autonomie unterscheiden /18/:

1. **Menschbasiertes Engineering.** Alle Entwicklungsschritte werden von den Entwickler:innen manuell durchgeführt. KI-Systeme dienen lediglich als passive Artefaktmanipulatoren, z.B. manuelle CAD-Modellierung. Die Planung, Analyse, Synthese und Entscheidungsfindung bleiben vollständig menschengesteuert.
2. **Erweiterte Engineering-Aufgaben.** Die Entwickler:innen behalten die Verantwortung für die Aufgabenplanung und Entwicklungsentscheidungen, während KI die definierten Teilaufgaben wie die regelbasierte Dimensionierung oder die automatisierte Überprüfung übernimmt. Die Automatisierung dieser Aufgaben kann sich auf vor- oder nachgelagerte Aufgaben auswirken; die Interpretation und Kontrolle verbleiben jedoch beim Menschen.
3. **Autonome Entwicklungsunterstützung.** Die Entwickler:innen definieren Ziele und Einschränkungen, während die KI die jeweiligen Teilaufgaben selbstständig plant und ausführt. Beispiele hierfür sind die LLM-basierte Analyse von Anforderungen zur Identifizierung von Lücken oder Inkonsistenzen. Das KI-System liefert kontextbezogene Rückmeldungen und Erklärungen, doch die endgültige Entscheidungsgewalt verbleibt beim Menschen.
4. **Mensch-KI-Co-Design.** Menschen und KI tragen gemeinsam zur Planung, Synthese, Analyse und Entscheidungsfindung bei. Generative KI-Systeme schlagen Architekturvarianten vor, bewerten deren Leistungsfähigkeit und erläutern Zielkonflikte, während adaptive KI-Assistenten Intentionen interpretieren und ihr Verhalten dynamisch anpassen. Die Verantwortung ist in dieser Autonomiestufe zwischen Mensch und KI verteilt.

Die eingeführten Autonomiestufen der KI veranschaulichen, wie sich die Initiative von menschlicher Dominanz schrittweise zu geteilter Kontrolle verlagert. Mit zunehmender Autonomie werden vorwärts- und rückwärtsgerichtete Aufgaben zunehmend miteinander verknüpft, und die KI entwickelt sich von einem passiven Aufgabenausführer zu einem aktiven, mitdenkenden Partner.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag analysiert die Anwendung von KI zur Unterstützung von Systems Engineering-Prozessen und unterscheidet vier Kollaborationsformen zwischen Mensch und KI. Hierzu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, in der SE-Prozesse identifiziert und die konkrete KI-Unterstützung analysiert wurden. Außerdem werden die Vorteile bzw. der Nutzen der KI-Unterstützung für den jeweiligen SE-Prozess benannt. Anhand der Literaturanalyse konnte identifiziert werden, dass KI-Systeme sowohl die technische Systementwicklung als auch das Projektmanagement unterstützen können, indem konkrete Entwicklungstätigkeiten bei der Ausführung von SE-Prozessen teilweise oder vollständig automatisiert von

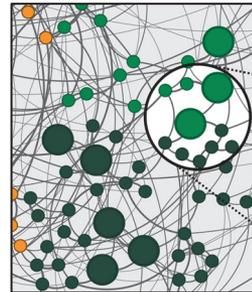
KI-Systemen ausgeführt werden. Um den Grad der KI-Autonomie zu bestimmen und zukünftig in der Produktentwicklung zu berücksichtigen, wurden vier Stufen der KI-Autonomie erläutert. Beginnend bei einer menschenbasierten Entwicklung, bei der die Verantwortung vollständig bei den Entwickler:innen liegt und die KI nur Artefaktanpassungen durchführt, bis hin zum Mensch-KI-Co-Design, in dem die Entwicklungsverantwortung und -tätigkeiten zwischen Menschen und KI verteilt sind. Zukünftige Forschungsarbeiten sollen insbesondere unterschiedliche Kollaborationsformen zwischen Mensch und KI bei der Ausführung von SE-Prozessen auf Grundlage der eingeführten Autonomiestufen untersuchen.

Literatur

- /1/ Walden, D.D.; Roedler, G.J.; Forsberg, K.; Hamelin, R.D.; Shortell, T.M.: Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities, 4. Edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2015, ISBN 9781118999400
- /2/ Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.; Müller, J., et al. Supporting Systems Engineering Activities by Artifact-oriented Description and Selection of Methods, Proceedings of the Design Society, 2023, 3, 3245-3254. doi:10.1017/pds.2023.325
- /3/ ISO/IEC/IEEE: Systems and software engineering - System life cycle processes, ISO 15288, Düsseldorf, 2015
- /4/ Choudhury, M.M.; Eisenbart, B.; Kuys, B.: Artificial Intelligence (AI) in the Design Process – a Review and Analysis on Generative AI Perspectives, Proc. of the Design Society 5:631–40, 2025, DOI:10.1017/pds.2025.10077.
- /5/ Siddique, I.: Harnessing Artificial Intelligence for Systems Engineering: Promises and Pitfalls, European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2022, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4885910>
- /6/ Berardinelli, L et al.: Model Driven Engineering, Artificial Intelligence, and DevOps for Software and Systems Engineering: A Systematic Mapping Study of Synergies and Challenges, ACM Trans. Softw. Eng. Methodol., 2025, <https://doi.org/10.1145/3759454>
- /7/ Poulsen, V. V.; Guertler, M.; Eisenbart, B.; Sick, N.: Advancing systems engineering with artificial intelligence: a review on the future potential, challenges and pathways, Proceedings of the Design Society, 5, 359–368, 2025, DOI:10.1017/pds.2025.10050
- /8/ John, A.; Oosthuizen, R.; Fanta, G.: Artificial Intelligence Integration in Systems Engineering: Navigating Opportunities and Risks Across The System Lifecycle, SAIE34, Vanderbijlpark, South Africa, DOI:10.52202/078172-0039.
- /9/ Cotter, M.; Markina-Khusid, A.; Gadewadikar, J.; Hadjimichael, M.: Applications of Artificial Intelligence to Model Based Systems Engineering: Initial Case Studies, IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2025, pp. 1-7, 2025, DOI: 10.1109/AERO63441.2025.11068562.
- /10/ Hagedorn, T.; Bone, M.; Kruse, B.; Grosse, I.; Blackburn, M.: Knowledge Representation with Ontologies and Semantic Web Technologies to Promote Augmented and Artificial Intelligence in Systems Engineering, INSIGHT, 15-20, 2020, <https://doi.org/10.1002/inst.12279>
- /11/ Adeyeye, O.; Akanbi, I.: Artificial Intelligence For Systems Engineering Complexity: A Review On The Use Of Ai And Machine Learning Algorithms, Computer Science & IT Research Journal, 5, 787-808, 2024, DOI:10.51594/csitrj.v5i4.1026.

- /12/ Yu, Y.; Lakemond, N.; Holmberg, G.: AI in the Context of Complex Intelligent Systems: Engineering Management Consequences, IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 71, pp. 6512-6525, 2024, DOI: 10.1109/TEM.2023.3268340
- /13/ Schneider, B.; Riedel, O.; Bauer, W.: Review: Model-based Systems Engineering and Artificial Intelligence for Engineering of Sustainable Systems – What contribution can systems engineering and artificial intelligence provide for the engineering of sustainable systems as of today?, Schriftenreihe der WGAB, S. 37-59, 2022, https://doi.org/10.30844/WGAB_2022_3
- /14/ Lockett, J. et al.: Systems Engineering Processes to Test AI Right (SEPTAR), IEEE Autotestcon, National Harbor, USA, 2024, pp. 1-10, DOI: 10.1109/AU-TOTESTCON47465.2024.10697513.
- /15/ Raz, A.K.; Blasch, E.P.; Chang, K.: A Systems Engineering Perspective on AI Test and Evaluation: Explainability and Counterfactuals, ISIF Perspectives On Information Fusion, 7, pp. 13 – 19, 2024
- /16/ Yüksel, N.; Börklü, H.R.; Sezer, H.K.; Canyurt, O.E.: Review of Artificial Intelligence Applications in Engineering Design Perspective. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 118, 2023, DOI:10.1016/j.engappai.2022.105697.
- /17/ Ma, K. et al.: Human-AI Collaboration Among Engineering and Design Professionals: Three Strategies of Generative AI Use, Int. Conf. on Design Theory and Methodology (DTM), Washington, DC, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2024.
- /18/ Inkermann, D.: Rethinking design methods in the age of AI - Consequences for practice, education, and research, Design Conference, Dubrovnik, 2026 (Status: in review)

Überprüfung von Schnittstellenkompatibilitäten unter Anwendung von Wissensgraphen



Stephan, R.; Inkermann, D.

Um die Funktionalitäten komplexer mechatronischer Produkte gewährleisten zu können, müssen unter anderem die Schnittstellen zwischen Subsystemen vor der domänenspezifischen Entwicklung ausreichend definiert werden. Dies ist oftmals nur mithilfe von Wissen aus den jeweiligen Entwicklungsabteilungen möglich, weshalb zunächst eine Festlegung der Architektur und erst im Anschluss eine detaillierte Schnittstellendefinition erfolgt (Bottom-Up-Ansatz). Dies führt häufig zu Schnittstelleninkompatibilitäten zwischen Subsystemen, die mit Hilfe von Wissensgraphen überprüft werden können. Ein Wissensgraph ist eine strukturierte Darstellung von Daten als Knoten (grüne Kreise im Titelbild) und Beziehungen zwischen Daten als Kanten (graue Linien im Titelbild), die maschinell analysiert werden können.

In order to ensure the functionality of complex mechatronic products, the interfaces between subsystems must be sufficiently defined prior to domain-specific development. This is often only possible with the help of knowledge from the respective development departments, which is why the architecture is first defined and only then is a detailed interface definition carried out (bottom-up approach). This leads to interface incompatibilities between subsystems, which can be checked using knowledge graphs. A knowledge graph is a structured representation of data as nodes (green circles in the title image) and relationships between data as edges (gray lines in the title image) that can be analyzed by computers.

Einführung und Problemstellung

In der Literatur wird Systems Engineering meist Top-down-Vorgehen beschrieben /1/. Im Zuge der Architekturdefinition als eine Hauptaktivität im Systems Engineering /2/, wird das System of Interest (Sol) in unterschiedliche Subsysteme unterteilt, welche im weiteren Verlauf ausdetailliert und parallel entwickelt werden, wie in Abbildung 1 zu erkennen. Dies erfolgt, um die Komplexität mechatronischer Produkte besser handhaben zu können und stellt sicher, dass Verantwortlichkeiten besser zugeordnet werden können. Da die Subsysteme miteinander interagieren, müssen eindeutige Schnittstellen definiert werden. Eine Schnittstelle ist definiert als eine gemeinsame Grenze zwischen zwei Funktionseinheiten, definiert durch verschiedene Merkmale in Bezug auf die Funktionen, den physikalischen Signalaustausch und andere Eigenschaften (ISO/IEC 199) /3/. Bei der Fahrzeugentwicklung werden beispielsweise sieben Subsysteme definiert, die das

Fahrzeug bilden. Zwischen dem Fahrsystem und dem Energiesystem, zwei Teilsysteme des Fahrzeugs, bestehen unter anderem eine Vielzahl von Verbindungen, um die Funktion der Rekuperation zu realisieren. Dabei werden Informationen, beispielsweise über den Batteriezustand oder die Ladegeschwindigkeit, sowie Energie zwischen den Subsystemen ausgetauscht. Bei der Definition von Schnittstellen wird genau festgelegt, welche Anzahl, welche Art und welche Richtung des Austauschs vorliegen. Allgemein kann zwischen einem Austausch von Material, Energie, Information sowie einer physischen Verbindung unterschieden werden /4/. Sind die Schnittstellen nicht korrekt definiert, führt dies zu Problemen bei der Integration der entwickelten Subsysteme /5/. Dies kann sich in physischen Inkompatibilitäten, zum Beispiel in nicht aufeinander abgestimmten Bohrungen, oder in unterschiedlich verwendeten Datenformaten für den Informationsaustausch äußern. Somit ist es essentiell, Schnittstellen frühzeitig zu definieren, da so eine reibungslose Integration nach der Entwicklung garantiert werden kann /6/. Die Festlegung von Schnittstellen im Zuge der Architekturdefinition ist zudem wichtig, weil so sichergestellt werden kann, dass das Gesamtsystem mit der Umwelt sowie mit Subsystemen korrekt verbunden ist /7/.

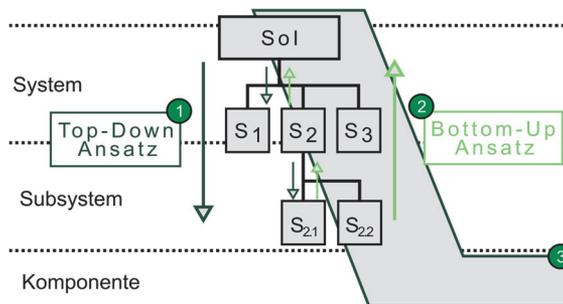


Abbildung 1: Vorgehensweisen im Systems Engineering Top-Down vs. Bottom-Up

Zu Beginn der Architekturdefinition werden die Schnittstellen festgelegt. Um diese detailliert zu beschreiben, bedarf es Expertenwissen aus den jeweiligen Entwicklungsabteilungen und -domänen. Somit wird die Architektur der Subsysteme parallel entwickelt (Definition von Funktionen und Komponenten auf unterster Detaillierungsebene), und genaue Eigenschaften der Schnittstellen werden erst spät mit anderen Entwicklungsabteilungen abgestimmt. Als Folge der Anwendung dieses Bottom-Up-Vorgehens (siehe Nr. 2 in Abbildung 1) liegen häufig Schnittstelleninkompatibilitäten zwischen Subsystemen vor. Werden diese erst in nachfolgenden Aktivitäten, zum Beispiel im Systementwurf, festgestellt, entstehen Nacharbeiten und Änderungen an der Architektur, die mit Kosten verbunden sind.

Model-based Systems Engineering (MBSE) bezeichnet die Anwendung formalisierter Modelle im Zuge des Systems Engineerings. Neben anderen Entwicklungsaktivitäten kann das MBSE auch für die Architekturdefinition und somit für die Schnittstellendefinition verwendet werden. Der Vorteil dabei ist, dass die Schnittstellen in formalisierter Form vorliegen und damit das Potenzial für einen

automatischen Abgleich bieten, um die Kompatibilität zu überprüfen. Um beliebig viele Schnittstellen mit einer Vielzahl von Parametern abgleichen zu können, benötigt es einen automatischen und robusten Ansatz, der mithilfe von Wissensgraphen realisiert werden kann.

Zielstellung des Beitrags

Ziel des Beitrages ist es, eine strukturierte Übersicht relevanter Schnittstelleneigenschaften zu erstellen, die im Zuge des MBSE für den Überprüfung auf mögliche Inkompatibilitäten verwendet werden können. Folgende Fragestellungen werden dazu in diesem Beitrag adressiert:

- Welche Verbindungstypen zwischen Subsystemen können durch Schnittstellen definiert werden?
- Welche in der Architekturdefinition festgelegten Schnittstelleneigenschaften sind für eine Überprüfung auf Inkompatibilitäten relevant?

Um diese Forschungsfragen zu adressieren, werden zunächst die Grundlagen verschiedener Verbindungstypen zwischen Subsystemen aufgezeigt. Darauf basierend werden in der Architekturentwicklung relevante Schnittstelleneigenschaften definiert. Anschließend werden die SysML-Elemente für einen Schnittstellenabgleich festgelegt. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf die Anwendung von Wissensgraphen für den Schnittstellenabgleich.

Schnittstelleneigenschaften für den Schnittstellenabgleich

Um einen möglichst vollständigen Abgleich der Schnittstelleneigenschaften zu ermöglichen, werden zunächst die grundsätzlichen Verbindungstypen zwischen Subsystemen betrachtet. Unter Berücksichtigung jener lassen sich im Anschluss die im Zuge der Schnittstellendefinition relevanten Eigenschaften festlegen. Wilms et al. (2019) definierten auf Grundlage von Literatur grundlegende Verbindungstypen und assoziierte Begriffe, die in Tabelle 2 aufgelistet sind /8/. Daraus abgeleitet sind in der zweiten Spalte die zu modellierenden Eigenschaften im Zuge der Schnittstellendefinition. Diese Eigenschaften sind zunächst sehr abstrakt definiert und reichen nicht aus, um einen vollständigen Schnittstellenabgleich durchführen zu können. Obwohl von zwei Schnittstellen, zum Beispiel die Austauschart und die Richtung des Austauschs, korrekt modelliert sind, kann nicht darauf geschlossen werden, dass diese in der Integration korrekt miteinander interagieren, da weiterführende Eigenschaften wie das Austauschmedium fehlen. Daher wurden in Tabelle 2 auf Basis von Tabelle 1 die Eigenschaften definiert, die im Zuge der Schnittstellendefinition im MBSE detailliert werden müssen. Es zeigt sich, dass in der Definition von Schnittstellen unterschiedliche Abstraktionsebenen berücksichtigt werden müssen. Dabei kann grundsätzlich zwischen der Black-Box- und der White-Box-Perspektive unterschieden werden /8/. In der Black-Box-Perspektive werden

nur die Subsysteme und die Schnittstellen zwischen den Subsystemen modelliert, wobei in der White-Box-Perspektive die Sicht durch Komponenten, die die Schnittstellen umsetzen, erweitert wird.

Tabelle 1: Verbindungstypen nach /8/ und abgeleitete Eigenschaften für die Schnittstellenmodellierung im MBSE

Verbindungstyp nach /8/	Zu modellierender Schnittstellenaspekt
Materialaustausch	Richtung und Austausch von Material
Räumliche Beziehung oder physikalische Verbindung	Physische Verbindung
Übertragung von Lasten, Kräften oder Drehmomenten	Richtung und Austausch von Energie
Translatorische oder rotatorische Bewegung	Physische Verbindung, Richtung und Austausch von Energie
Vibrationen und Akustik	Richtung und Austausch von Energie
Magnetfeld	Richtung und Austausch von Energie
Thermische Beziehung	Richtung und Austausch von Energie und Material
Elektrisches oder elektromagnetisches Feld	Richtung und Austausch von Energie
Elektrische Erde	Richtung und Austausch von Energie
Elektrische Leistung	Richtung und Austausch von Energie
Informations- oder Steuersignale	Richtung und Austausch von Information

Schnittstellenmodellierung im MBSE

Nachdem grundsätzliche Eigenschaften der Schnittstellenmodellierung auf Basis von Verbindungstypen abgeleitet wurden, sollen im nächsten Schritt unter Einbezug weiterführender Literatur zur Schnittstellenmodellierung im MBSE relevante SysML-Elemente für einen Schnittstellenabgleich herausgearbeitet werden. Fosse et al. (2012) schlagen einen Ansatz zur modellbasierten Definition von Schnittstellen sowie relevante Eigenschaften von Schnittstellen vor /7/. Shames et al. (2016) entwickelten einen Ansatz zur Schnittstellenmodellierung, der auf unterschiedlichen Modellierungsebenen basiert. Hierbei wurde ebenfalls eine Übersicht von Eigenschaften erstellt, die für die Modellierung mit der Systems Modelling Language (SysML) im MBSE relevant sind. /3/. Basierend auf Tabelle 1 sowie den eingeführten Eigenschaften und assoziierten SysML-Elementen, ist in Tabelle 2 die Übersicht von SysML-Elementen für den Schnittstellenabgleich aufgezeigt.

Tabelle 2: Schnittstelleneigenschaften und SysML-Elemente, nach /3, 7, 8/

Schnittstelleneigenschaft	Erläuterung	SysML Element
Verbindungstyp	Die Art der Verbindung (Physisch, Austausch)	Stereotyp Flow-/ ProxyPort
Art & Richtung des Austauschs	Austauschart (Material, Energie, Information) und Richtung des Austauschs	Flow zwischen Block Port & Property Port
Medium der Schnittstelle	Realisierung der Schnittstelle, z.B. als Kabel oder drahtlose Verbindung, Möglichkeit zur Ergänzung von Funktionen-	Stereotyp FullPort
Limitation der Schnittstelle	Limitationen des Austauschs z.B. eine maximale Anzahl an Drehmoment	Constraints
Nutzungsbedingungen & -szenarios	Funktionen, in denen die Schnittstelle, oder Teilfunktionen davon, Anwendung finden.	Tagged Values, Sequenzmodellierung

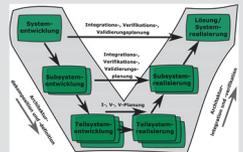
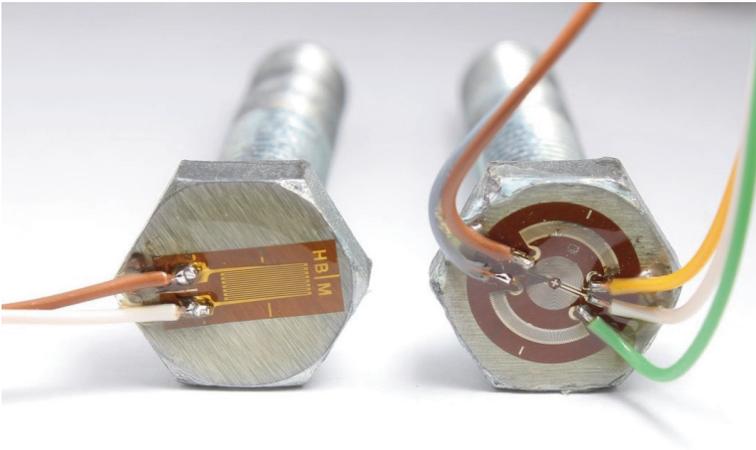
Beim Schnittstellenabgleich im Rahmen der Architekturdefinition werden die in der logischen Sicht festgelegten Eigenschaften verglichen. Entscheidend für diesen Vergleich sind der Verbindungstyp und die Verbindungsrichtung zwischen Block-Port und Property-Port sowie der Stereotyp des Ports, siehe Tabelle 2. Die zusätzliche Inbetrachtung des Port-Namen, des Freitexts zur Beschreibung des Ports und des Elementtyps, an welchem der Port modelliert wurde, sorgt dafür, dass der Abgleich robuster durchgeführt werden kann. Ein paarweiser Abgleich aller Eigenschaften jeder Schnittstelle ist manuell extrem aufwendig. Algorithmen könnten zwar Elemente wie den Verbindungstyp oder den Stereotyp des Ports vergleichen, da hier eine Menge an Alternativen vorliegt (Flow, Proxy, Full-Port), jedoch nicht andere Eigenschaften wie den Namen des Ports oder den Freitext. Frei formulierte Angaben wie Port-Name oder Beschreibungen können selbst bei inhaltlicher Kompatibilität unterschiedlich modelliert sein. Semantische Gleichheit kann also vorliegen, obwohl andere Modellelemente oder Freitexte verwendet wurden. Daher reicht ein syntaktischer Abgleich nicht aus, und es muss semantisch überprüft werden, ob die modellierten Elemente die gleiche Bedeutung haben, was durch den Einsatz von Wissensgraphen erreicht werden kann. Ein Wissensgraph besteht aus Entitäten und deren Beziehungen zueinander, die als Knoten und Kanten dargestellt werden /9/. Die Informationen werden als Tripel bestehend aus Subjekt, Prädikat und Objekt im Turtle-Format gespeichert /10/. Die in Tabelle 2 definierten SysML-Elemente können als Tripel gespeichert und im Anschluss mit Hilfe von Large Language Models (LLMs) analysiert werden, um freie Texte und kontextuelle Bedeutungen zu vergleichen. So können die Eigenschaften der Schnittstellen miteinander automatisiert semantisch verglichen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Um die Schnittstellenkompatibilität von Subsystemen zu gewährleisten, müssen unter anderem die Eigenschaften der Schnittstellen miteinander verglichen werden. Dazu wurden auf Grundlage der Literatur zunächst Eigenschaften auf Basis von Verbindungstypen zwischen Subsystemen definiert und somit die erste Forschungsfrage beantwortet. Diese wurden anschließend durch Modellierungsansätzen im MBSE ergänzt, um eine Liste von SysML-Elementen zu erhalten, die für einen Schnittstellenabgleich verwendet werden können, was die zweite Forschungsfrage beantwortet. Der Ansatz ist dadurch limitiert, dass er zwar die zu vergleichenden Elemente definiert, jedoch nicht Aufschluss darüber gibt, wann eine Inkompatibilität vorliegt und wann nicht. Daher soll in den nachfolgenden Forschungsaktivitäten anhand praxisnaher Daten mittels Wissensgraphen diese Überprüfung angewendet werden, um zunächst die Funktionalität und Vollständigkeit der SysML-Elemente zu überprüfen. Anschließend sollen Regeln zur Sicherstellung der Kompatibilität definiert und getestet werden.

Literatur

- /1/ INCOSE: INCOSE systems engineering handbook, John Wiley & Sons, 2023
- /2/ ISO 15288:2023, IEEE, 2023, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2023.10123367>
- /3/ Shames, P.; Sarrel, M.; Friedenthal, S.: A Representative Application of a Layered Interface Modeling Pattern, INCOSE International Symposium Bd. 26, Nr. 1, Seite 138–159, 2016, <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2016.00151.x>
- /4/ Bender, B.; Gericke, K.(Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2021, ISBN 978-3-662-57302-0
- /5/ Wilms, R. ; Kronsbein, P. ; Inkermann, D. ; Huth, T. ; Reik, M. ; Vietor, T.: USING A CROSS-DOMAIN PRODUCT MODEL TO SUPPORT ENGINEERING CHANGE MANAGEMENT, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, S. 1165–1174, 2020 <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.90>
- /6/ Madni, A.; Purohit, S.: Economic Analysis of Model-Based Systems Engineering, Systems Bd. 7, Nr. 1, S. 12, 2019, <https://doi.org/10.3390/systems7010012>
- /7/ Fosse, E.; Delp, C. L.: Systems engineering interfaces: A model based approach, IEEE Aerospace Conference, Big Sky MT, IEEE, 2013, <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6497322>
- /8/ Wilms, R.; Cemmasson, V. F.; Inkermann, D.; Reik, M.; Vietor, T.: Identifying Cross-Domain Linkage Types to Support Engineering Change Management and Requirements Engineering, Procedia CIRP Bd. 84, S. 719–724, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.224>
- /9/ Hogan, A.; Blomqvist, E.; Cochez, M.; D'amato, C.; Melo, G.; Gutierrez, C.; Kirrane, S.; Gayo, J. E. L.; u. a.: Knowledge Graphs, ACM Computing Surveys, Bd. 54, Nr. 4, Seite 1–37, 2022, <https://doi.org/10.1145/3447772>
- /10/ Färber, M.; Bartscherer, F.; Menne, C.; Rettinger, A.: Linked data quality of DBpedia, Freebase, OpenCyc, Wikidata, and YAGO, Semantic Web Bd. 9, Nr. 1, Seite 77–129, 2017 <https://doi.org/10.3233/SW-170275>



Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik



Vom Batch zur Pilotanlage: Heißluft/Heißdampfverfahren zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen

Vo Dan, K.; Lohrengel, A.

Der Artikel beschreibt die Entwicklung der Pilotanlage für das Heißluft/Heißdampfverfahren zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen. Das Vorhaben wird vom Biotechnikum der Universität Göttingen in Kooperation mit dem Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal durchgeführt und durch die Initiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert. Ausgangspunkt ist der Bedarf an ökologischen Dämmmaterialien und der Einsatz natürlicher bzw. naturnaher Bindemittel, die höhere Aushärtetemperaturen als herkömmliche synthetische Bindemittel erfordern.



The article describes the development of a prototype for the hot-air/hot-steam process used to manufacture wood-fiber insulation boards. The project is being carried out by the Biotechnikum of the University of Göttingen in cooperation with the Institute of Mechanical Engineering at Clausthal University of Technology and is funded by the “Zukunft Bau” initiative of the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development. It is driven by the need for ecological insulation materials and the use of natural or bio-based binders, which require higher temperatures than conventional synthetic binders.

Einleitung

Nachhaltigkeit ist im modernen Bauwesen zu einem zentralen Leitmotiv geworden. Die Verwendung regenerativer Ressourcen und ökologischer Baustoffe gewinnt zunehmend an Bedeutung. Im Bereich der Gebäudedämmung rücken Holzfaserdämmstoffe zunehmend in den Fokus als vielversprechende Alternative zu konventionellen Produkten. Obwohl diese Materialien inzwischen am Markt etabliert sind, erfolgt ihre industrielle Herstellung heute noch überwiegend mit synthetischen Isocyanat-Bindemitteln wie pMDI (polymeres Diphenylmethandiisocyanat). Diese synthetischen Bindemittel geraten vermehrt in die Kritik, da sie weder aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, noch biologisch abbaubar sind. Zudem gelten Isocyanate wie pMDI als gesundheitsschädlich [1].

Um vollständig nachhaltige Holzfaserdämmstoffe zu ermöglichen, sollen künftig natürliche oder naturnahe Bindemittel eingesetzt werden, beispielsweise tierische oder pflanzliche Proteine wie Lignin. Allerdings benötigen diese Bindemittel zur

Aushärtung deutlich höhere Temperaturen als synthetische Varianten. Mit den aktuell eingesetzten industriellen Verfahren, die meist auf Dampf-Luft-Gemischen beruhen, ist dies bislang nicht realisierbar.

Im Rahmen mehrerer aufeinander aufbauender Projekte, gefördert durch die Initiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), wird das neue Heißluft/Heißdampfverfahren nach /4/ weitergehend untersucht und in Prototypanlagen erprobt, die höhere Prozesstemperaturen erlauben. Ziel der Projekte ist es, die industrielle Anwendbarkeit des Verfahrens nachzuweisen.

Funktionsweise des Heißluft/Heißdampfverfahrens

In der Industrie wird zur Herstellung der Holzfaserplatten in erster Linie mit einem Dampf-Luft-Gemisch gearbeitet. Die Problematik damit besteht darin, dass gesättigter Dampf bei Normdruck physikalisch auf 100 °C begrenzt ist. Für synthetische Bindemittel ist dies ausreichend, jedoch erfordern natürliche Bindemittel eine höhere Aushärtungstemperatur. Das patentierte Heißluft/Heißdampfverfahren kombiniert eine Heißluft-Vorwärmphase mit einem Heißdampf-Impuls. Dabei wird zunächst das Faservlies mit heißer Luft aufgeheizt und anschließend mit einem kurzen Dampfstoß beaufschlagt. Der Dampf kondensiert dadurch im kühleren Faserverbund und gibt dort schlagartig Energie in Form von Kondensationswärme ab. Das Ergebnis ist ein sprunghafter Temperaturanstieg in der Faserplatte. Die Abbildung 1 verdeutlicht dieses Phänomen. In Batch-Versuchen an 40 mm dicken Holzfaserplatten aus Fichtenfasern mit einer Abmessung von 50 x 50 cm und einer Rohdichte von ca. 200kg/m³ wurde die Temperatur im Platteninneren mit Temperaturfühlern gemessen.

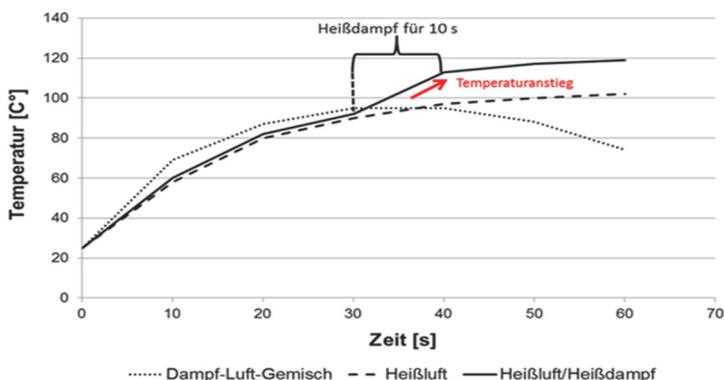


Abbildung 1: Thermische Verläufe verschiedener Herstellungsverfahren für Holzfasern im Batch-Verfahren /5/

Dabei wurden drei Verfahren verglichen: Dampf-Luft-Gemisch, reine Heißluft sowie die Kombination aus Heißluft und Heißdampf. Aus Abbildung 1 ist zu erkennen, dass das Dampf-Luft-Gemisch den Kern innerhalb von etwa 30 s auf 95 °C erwärmt, diese Temperatur jedoch nicht überschreitet. Anschließend sinkt sie durch die zunehmende Feuchte im Inneren wieder ab. Reine Heißluft erreicht unter optimalen Bedingungen etwas über 100 °C und benötigt dafür rund 50 s. Für Heißluft/Heißdampf wurde nach 30 s Heißluft ein Heißdampfstoß zugegeben. Dadurch steigt die Kerntemperatur rapide bis auf etwa 120 °C an. In den Pilotanlagen wird ebenfalls angestrebt, den Plattenkern zunächst mit Heißluft auf etwa 100 °C zu erhitzen bevor der Heißdampf hinzukommt. Eine Temperatur von 120°C ist nach /2, 3/ für die Aushärtung der natürlichen Bindemittel ausreichend.

Vom Batch zur voll-kontinuierlichen Prototypanlage

Um das Heißluft/Heißdampfverfahren zu erproben wurden die ersten Versuche im Batch-Verfahren durchgeführt: In einer geschlossenen Kammer wurden Holzfasern aufgelegt, mechanisch zusammengepresst und von unten nacheinander mit Heißluft und anschließend Heißdampf behandelt. Oben befindet sich eine Ablufthaube, die die aufsteigende Luft-/Dampfströme absaugt. Die Abbildung 2 zeigt die Prinzipskizze des Batch-Verfahrens. Auf dieser Basis wurde das Konzept auf eine semi-kontinuierliche Anlage überführt. Eine Prinzipskizze der semi-kontinuierlichen Anlage ist in Abbildung 3 zu sehen.

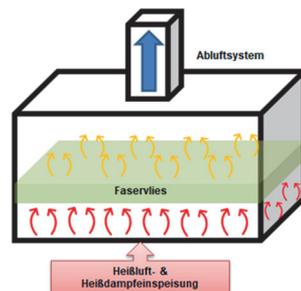


Abbildung 2: Prinzipskizze des Batch-Verfahrens /6/

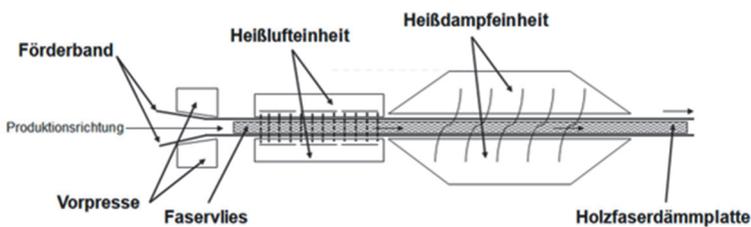


Abbildung 3: Prinzipskizze der semi-kontinuierlichen Anlage /5/

Hier werden die Fasern nach dem Mischen, Beleimen und Vorbereiten gleichmäßig zu einer lockeren Matte auf das Formband gestreut und händisch in die Vorpresse übergeben, die aus zwei zusammenlaufenden Formbändern besteht. Dadurch wird die Fasermatte auf die Zieldicke verdichtet. Anschließend durchläuft die vorgepresste Fasermatte erst die Heißlufteinheit und dann die Heißdampfeinheit. Diese bestehen aus Luft- bzw. Dampfplantzen, die unmittelbar hinter der Vorpresse ober- und unterhalb der Matte an den Förderbändern befestigt sind.

Für den Übergang in den vollkontinuierlichen Prozess wurde vor der Vorpresse ein Faserbunker installiert. Ein Kratzer lockert die Fasern auf, während zwei Streuwalzen das Material dosieren und gleichmäßig auf das Einlaufband verteilen. Eine regelbare Bandgeschwindigkeit im Bunker sorgt für einen konstanten Massenstrom zum Formband der Vorpresse. Bunker und Vorpresse sind dabei aufeinander abgestimmt. Maßgebliche Parameter sind Bandgeschwindigkeiten, Streumenge, Drehzahl der Streuwalzen und Verdichtungsverhältnis, die in Vorversuchen ermittelt wurden. Bei kontinuierlicher Beschickung des Bunkers lässt sich so eine endlose Holzfasermatte mit 50 cm Breite und einer einstellbaren Dicke zwischen 30 und 60 mm erzeugen. Im Anschluss erfolgt die Behandlung analog zur semi-kontinuierlichen Anlage in der Heißluft- und Heißdampfeinheit. Die Prinzipskizze der voll-kontinuierlichen Anlage ist in Abbildung 4 abgebildet.

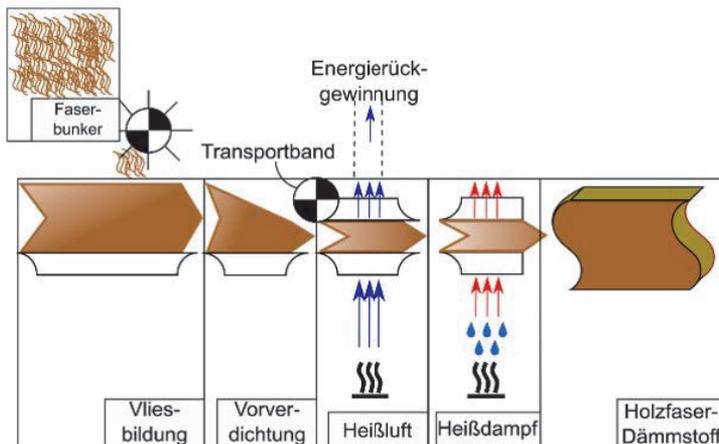


Abbildung 4: Prinzipskizze der voll-kontinuierlichen Anlage /7/

Zusammenfassung und Ausblick

Die erste Hälfte des aktuellen Projekts konzentrierte sich auf die Vorschaltung eines Faserbunkers und dessen Abstimmung mit der Vorpresse. Diese Arbeiten sind weitgehend abgeschlossen und die Anlage produziert nun kontinuierlich auslaufende Platten. Ein aktueller Anlagenaufbau sowie eine hergestellte Platte sind in Abbildung 5 dargestellt.

Im weiteren Projektverlauf stehen neben kleineren Prozessoptimierungen vor allem zwei Punkte im Fokus. Erstens ist die Implementierung einer Inline-/Echtzeitmesstechnik zur Überwachung zentraler Größen wie Kerntemperatur und Dichte über Länge und Breite der Platte. Auf dieser Basis wird eine automatische Regelung der Prozessparameter (z. B. Bandgeschwindigkeit, Zonentemperaturen, Luft-/Dampfvolumenströme) umgesetzt. Zweitens ist der Aufbau einer Versuchsdatenbank der Pilotanlage, in der Prozess- und Ergebnisdaten systematisch erfasst werden. Diese Daten dienen als Grundlage für ein mittlernendes KI-Modell, das Eigenschaften verschiedener Holzfaserplatten vorhersagen und künftig Sollwerte bzw. Optimierungsvorschläge für den Betrieb ableiten soll.



Abbildung 5: Aktueller Anlagenaufbau und damit hergestellte Holzfaserdämmplatte

Danksagung

Die Arbeiten entstanden im Rahmen mehrerer aufeinander aufbauender Projekte der Initiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Das aktuell geförderte Projekt trägt die Nummer: 10.08.18.7-24.07. Die Autoren danken für die Förderung und fachliche Begleitung. Ein besonderer Dank gilt zudem unserem Projektpartner an der Universität Göttingen, namentlich Herrn Arne Beulshausen und Herrn Prof. Dr. Markus Euring vom Biotechnikum.

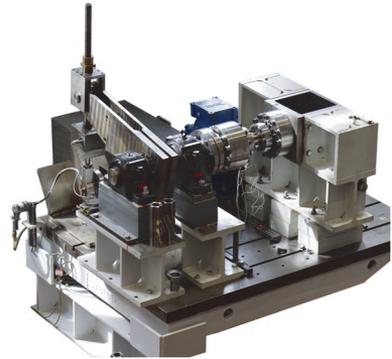
Literatur

- /1/ Yang, X.; Zhang, Y.P.; Chen, D.; Chen, W.G.; Wang, R.: Eye irritation caused by formaldehyde as an indoor air pollutant – A controlled human exposure experiment. *Biomedical and Environmental Sciences (BES)*, 14(3), S. 229–236, 2001.
- /2/ Bouajila, J.; Dole, P.; Joly, C.; Limare, A.: Some laws of a lignin plasticization. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(2), S. 1445–1451, 2006.
- /3/ Nada, A.; Abou Yousef, H.; El-Gohary, S.: Thermal degradation of hydrolyzed and oxidized lignins. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 68(1), S. 265–273, 2002.
- /4/ Kharazipour, A.; Euring, M.: Verfahren zur Herstellung von Holz- und/oder Verbundwerkstoffen. Angemeldet durch Georg-August-Universität Stiftung des öffentlichen Rechts am 28.02.2013. Veröffentlichungsnr: WO2013127947A1. Prioritätsdaten: DE102012101716.6 01.03.2012.
- /5/ Euring, M.; Kirsch, A.; Kharazipour, A.: Hot-Air/Hot-Steam process for the production of Laccase-Mediator-System bound wood fiber insulation boards. *BioResources*, 10(2), S. 3541–3552, 2015. DOI: 10.15376/biores.10.2.3541-3552.
- /6/ Beulshausen, A.; Rehmet, R.: Vorstellung des Projektes „Innovatives Heißluft/Heißdampfverfahren zur Herstellung natürlich gebundener Holzfaserdämmstoffe“. Projekttag Zukunft Bau, Präsentation (PowerPoint), 2022.
- /7/ Rehmet, R.; Beulshausen, A.: Übersichtsschema der zu entwickelnden vollkontinuierlichen Fertigungsanlage zur Holzfaserdämmstoffherstellung im Heißluft-/Heißdampfverfahren. Grafik im Projekt „Zukunft Bau“, BBSR (Projekt 1008187-2407), 2023.

Erweiterung eines Prüfstands für Torsionswechsellastversuche unter Temperatur- und Öleinfluss

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

Einer der Schwerpunkte des Instituts für Maschinenwesen ist die experimentelle Prüfung von Maschinenelementen. Dafür stehen diverse Prüfstände zur Verfügung. Der Artikel stellt die Erweiterung eines Prüfstands zur Untersuchung von Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen unter schwelender oder wechselnder Torsion bei Öl- und Temperatureinfluss vor.



One of the main research areas at the Institute of Mechanical Engineering is the experimental testing of machine elements. Various test benches are available for this purpose. This article describes an upgrade to a test bench designed to investigate the behavior of shafts and shaft-hub connections under pulsating or alternating torsion when subjected to oil and temperature.

Einleitung

Am Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal stehen diverse Prüfstände für die Untersuchung der Wirkung von mechanischen Belastungen auf Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen zur Verfügung. In diversen Leistungsklassen bis zu einem Gesamtdrehmoment von 500 kNm können wechselnde Torsionsmomente eingestellt werden. Im DFG Schwerpunktprogramm 2305 /1/ wird im Teilprojekt „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ eine zur Drehmomentüberwachung sensorische Zahnwelle untersucht. Dazu kam in der ersten Förderperiode ein Prüfstand mit einem maximal nutzbaren Torsionsmoment von 30 kNm zum Einsatz (vgl. /2/). Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Torsionswechsellasten durchgeführt, um die Integration und die Sensorfunktion von Werkstoffsensoren in der Zahnwelle zu untersuchen.

Für die zweite Förderphase des Projekts sind Untersuchungen unter realitätsnahen Einsatzbedingungen vorgesehen. Durch die Umlaufschmierung sind Zahnwellen im Getriebe dem Einfluss von Temperatur und Öl ausgesetzt. Diese äußeren Einflüsse sollen in den Prüfstand integriert werden, um die Funktionszuverlässigkeit der sensorintegrierenden Zahnwelle untersuchen und validieren zu können.

Bisheriger Prüfaufbau

Der bisherige Prüfaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine rotierende Exzenter­scheibe führt eine Hubbewegung aus, die über die Gewindespindel an einen Hebelarm übertragen wird. Der Hebelarm übersetzt die Hubbewegung in eine Drehbewegung, die zur Aufbringung des Torsionsmoments genutzt wird. Die Höhe der Torsionsmomentamplitude wird weggesteuert durch die gewählte Exzenter­scheibe eingestellt. Das Torsionsmoment kann dabei schwellend oder wechselnd aufgebracht werden, da sich die Torsionsmittellast über die Gewindespindel einstellen lässt. Für die Erfassung der Bauteiltemperatur steht ein 8-kanaliges Temperaturerfassungssystem zur Verfügung. Bei Bedarf kann die Probe durch eine externe Luftkühlung gekühlt werden.

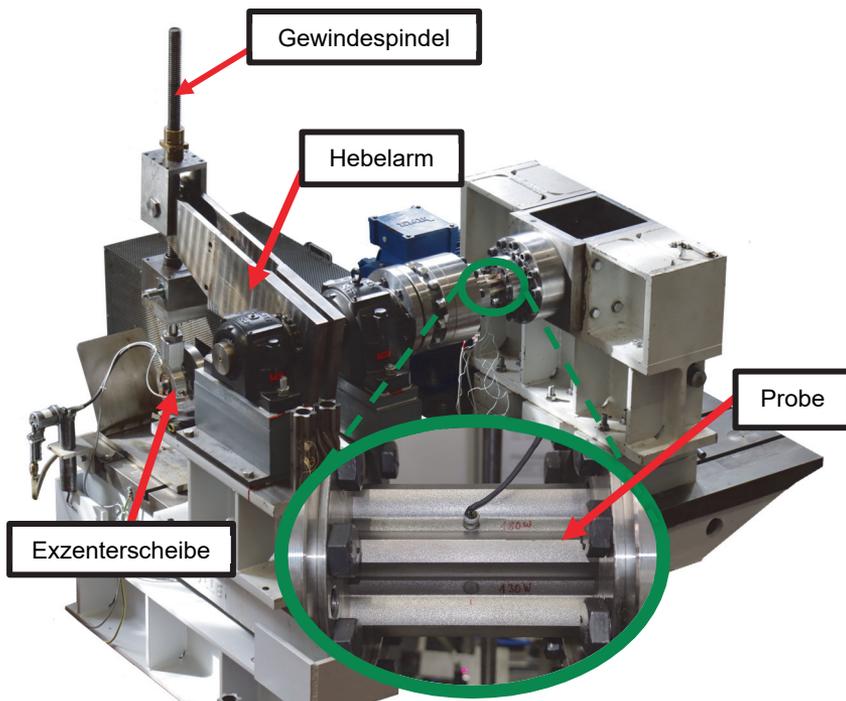


Abbildung 1: Prüfstand für Torsionswechsellasten bis zu 30 kNm, nach [3]

Erweiterungen des bisherigen Prüfaufbaus

Um den Öl- und Temperatureinfluss auf die Funktionszuverlässigkeit untersuchen zu können, wurde der Prüfstand konstruktiv erweitert, sodass ein Kryostat angeschlossen und eine Ölumlaufschmierung integriert werden kann. Über den Kryostaten kann das Öl sowohl geheizt, als auch gekühlt werden. Eine Regelung der Öltemperatur ist durch einen externen Temperaturfühler im Schmierölkreislauf realisiert.

In Abbildung 2 ist ein Querschnitt durch den Prüfaufbau dargestellt. Zwei Naben (grau-blau) und zwei Deckel (blau) fixieren die Zahnwelle (hellgrau) im Prüfstand. Über zwei Spannelemente (rot) kann die Passung der Zahnwelle eingestellt werden, falls eine Spielpassung zwischen Welle und Nabe vorliegt. Über die Hülse (dunkelgrau) zwischen den beiden verzahnten Naben wird das temperierte Öl ein- und ausgeleitet.

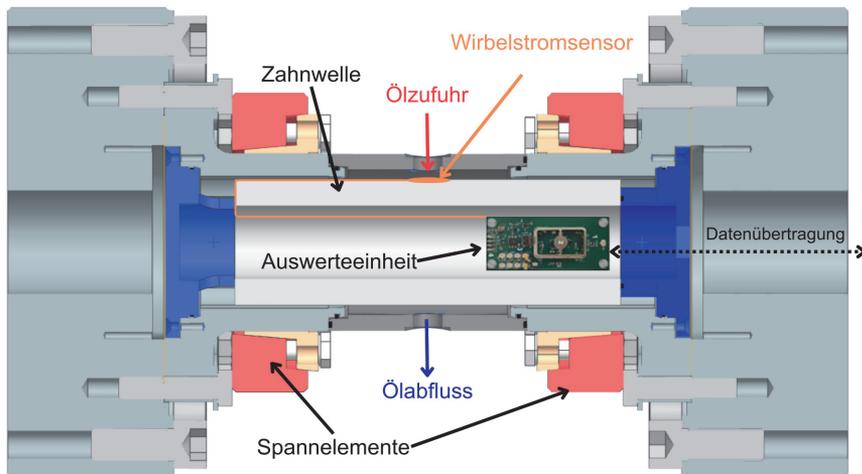


Abbildung 2: Querschnitt durch den Prüfaufbau

Die Besonderheit im Teilprojekt der lastsensitiven Zahnwelle stellt die Integration einer Auswerteelektronik in die Zahnwelle dar. An die Auswerteelektronik sind Wirbelstromsensoren angeschlossen, die auf der Oberfläche der Zahnwelle auf den Werkstoffensoren befestigt werden. Über das Kopfspiel können die Kabel in die Zahnwelle geführt werden, sodass eine direkte Kabelverbindung (orange) besteht. Diese Verbindung und die Elektronikkomponenten im Inneren der Zahnwelle werden zusätzlich durch einen Silikonwerkstoff abgedichtet (nicht dargestellt), um den Kontakt mit dem Schmieröl zu vermeiden. Über den rechten Stahldeckel kann eine kabelgebundene oder drahtlose Datenübertragung aus der Zahnwelle erfolgen. Der

Deckel hat dazu eine zentrale Bohrung, die im Rahmen der Versuchsreihen mit Verschlüssen aus unterschiedlichen Werkstoffen abgedichtet wird.

Zusammenfassung

Durch die Erweiterung des Torsionswechsellastprüfstands um eine temperierte Ölumlaufschmierung ist es möglich, Zahnwellen und andere Welle-Nabe-Verbindungen mit einem Torsionsmoment von bis zu 30 kNm unter Einfluss von Öl und Temperatur zu untersuchen. Gleichzeitig ist die Anbringung von Sensoren auf der Probengeometrie und deren Anschluss möglich.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ mit der Projektnummer 466760574. Das Projekt ist Teil des DFG Schwerpunktprogramms 2305 mit der Projektnummer 441853410.

Literatur

- /1/ „Sensorintegrierende Maschinenelemente – Wegbereiter der flächendeckenden Digitalisierung“. Zugegriffen: 25. November 2025. <https://www.spp2305.de/>
- /2/ Gansel, R.; Quanz, M.; Heinrich, C.; Zwoch, S.; Schäfer, G.; Barton, S.; Maier, H. J.; Lohrengel, A.: „Design and development of a load-sensitive autonomous splined shaft with material sensors, integrated evaluation unit, wireless data transmission and energy harvesting“, *Forschung im Ingenieurwesen*, Bd. 89, Nr. 145, 2025, DOI: 10.1007/s10010-025-00909-9.
- /3/ 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.

Hysteretische Dämpfung in metallischen Legierungen infolge innerer Reibung

Alkountar, E.; Lohrengel, A.

Die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften neu entwickelter metallischer Legierungen wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts am IMW mittels eines Rapid-Tests auf einem neu konzipierten Prüfstand im Akustiklabor des Instituts durchgeführt. Zur Validierung der Ergebnisse und zur Erweiterung der experimentellen Grundlagen wurde eine ergänzende Messmethode benötigt, die die Bestimmung der Dämpfung infolge innerer Reibung an genormten metallischen Flachzugproben ermöglicht. Hierzu wurde ein statischer Hysteresetest durchgeführt, bei dem der pro Lastwechsel dissipierte Energieverlust ermittelt wurde. Dieser Energieverlust diente als Grundlage zur Berechnung eines äquivalenten logarithmischen Dekrements, einer dimensionslosen Kennzahl zur Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens, die in diesem Zusammenhang aus dem quasistatischen Hystereseverhalten des Materials abgeleitet wird. In diesem Artikel werden die verwendete Mess- und Auswertemethode detailliert vorgestellt und erste experimentelle Ergebnisse präsentiert.



The investigation of the damping properties of newly developed metallic alloys was carried out within the framework of a research project at the IMW using a rapid test on a newly designed test rig in the institute's acoustics laboratory. To validate the results and to expand the experimental basis, an additional measurement method was required that enables the determination of damping due to internal friction in standardized metallic flat tensile specimens. For this purpose, a static hysteresis test was conducted, in which the energy dissipated per loading cycle was determined. This energy loss served as the basis for calculating an equivalent logarithmic decrement, a dimensionless parameter characterizing the material's damping behavior, which in this context is derived from the quasistatic hysteresis response of the material. This article presents the applied measurement and evaluation methodology in detail and provides initial experimental results.

Einleitung

Frühere Untersuchungen am IMW der TU Clausthal zur CuAlMn-Legierung nutzten frei ausklingende Schwingungen, um die Dämpfungseigenschaften über das logarithmische Dekrement zu bestimmen. Die Auslenkungs- und Geschwindigkeitssignale wurden dabei mithilfe eines Laservibrometers erfasst, sodass die Abnahme aufeinanderfolgender Amplituden bzw.

Geschwindigkeitsmaxima ausgewertet werden konnte. Dieses Rapid-Test-Verfahren ermöglichte eine schnelle Charakterisierung großer Probenmengen und lieferte erste aussagekräftige Ergebnisse zu den dämpfungstechnischen Eigenschaften der Legierung /1/.

Für weiterführende und erweiterte Untersuchungen ist es sinnvoll, Versuche an genormten Proben derselben Legierung durchzuführen. Bei zyklischer Wechselbeanspruchung kann die Energiedissipation eines Materials direkt aus der Fläche der entstehenden Hystereseschleife bestimmt werden. Diese dissipierte Energie stellt ein Maß für die innere Reibung dar und beschreibt damit die Dämpfungseigenschaften des Werkstoffs. Aus der dissipierten Energie W_{diss} und der im Zyklus gespeicherten Energie W_{stored} lässt sich der Verlustfaktor η bestimmen, der über folgende Beziehung definiert ist /2/:

$$\eta = \frac{W_{diss}}{2\pi W_{stored}} \quad (1)$$

In der vorliegenden Arbeit werden quasistatische Hysteresenversuche durchgeführt, um die Energiedissipation der CuAlMn-Legierung unter weitgehend frequenzfreien Bedingungen zu untersuchen. Die Versuche erfolgen dehnungsgeregelt mit einer sehr niedrigen Verformungsgeschwindigkeit von bis zu 0,015 %/s. Durch diese deutlich reduzierte Belastungsgeschwindigkeit im Vergleich zu üblichen dynamischen Versuchen ist zu erwarten, dass die gemessene Energiedissipation ausschließlich auf die innere Reibung des Materials zurückzuführen ist und nicht durch Frequenz- oder andere dynamische Einflüsse überlagert wird.

Ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen besteht darin, zu analysieren, ob und in welchem Ausmaß die Dämpfungseigenschaften der CuAlMn-Legierung durch die spannungsinduzierte martensitische Phasenumwandlung gesteigert werden können. Diese Umwandlung ist charakteristisch für Legierungen mit Formgedächtniseffekt und führt aufgrund der damit verbundenen mikrostrukturellen Mechanismen potenziell zu einer erhöhten Energiedissipation. Daher ermöglichen die quasistatischen Hysteresenversuche eine gezielte Betrachtung dieses Effekts und dessen Beitrag zur Gesamtdämpfung der Legierung /3/.

Die Ergebnisse dieser quasistatischen Untersuchungen werden anschließend mit den zuvor ermittelten Rapid-Test-Daten vergleichbar gemacht, indem aus dem Verlustfaktor η das entsprechende logarithmische Dekrement δ berechnet wird. Hierzu wird die Beziehung verwendet /4/:

$$\delta = \pi \eta \quad (2)$$

Dadurch können die energetische Betrachtung und das schwingungsbasierte Verfahren miteinander verknüpft und hinsichtlich ihrer Aussagekraft bewertet werden. Der vorliegende Artikel stellt diese Methodik vor und diskutiert erste

Ergebnisse im Hinblick auf eine geeignete Bestimmung der Dämpfung durch innere Reibung.

Abbildung 1 zeigt die im Belastungszyklus gespeicherte Energie im Vergleich zur dissipierten Energie, die durch die Fläche der jeweiligen Hystereseschleife dargestellt wird.

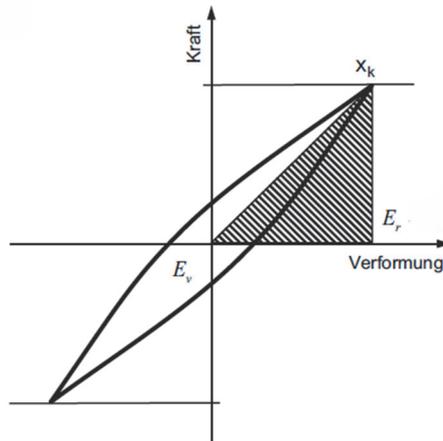


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Hystereseschleife mit der dissipierten Energie E_v und der gespeicherten Energie E_r /4/

Experimenteller Aufbau

Der in dieser Arbeit verwendete Versuchsaufbau basiert auf einem quasistatischen Hysteresenversuch, welcher auf der Resonanzprüfmaschine SWINGLY der Firma Sincotec durchgeführt wurde. Die Untersuchungen erfolgen an genormten Flachzugproben der CuAlMn-Legierung, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Proben werden mittels einer eigens konstruierten Aufnahme befestigt, die es ermöglicht, sowohl Zug- als auch Druckkräfte kontrolliert auf die Probe aufzubringen.

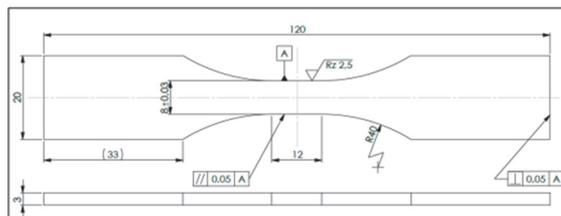


Abbildung 2: Probengeometrie

Zur Erfassung der Dehnung wird ein Clip-On-Extensometer eingesetzt, das während des Versuchs kontinuierlich die Dehnungswerte misst und über den integrierten Messverstärker der SWINGLY-Maschine verarbeitet. Die auf die Probe wirkenden Kräfte werden gleichzeitig über eine Kraftmessdose aufgenommen, die an der oberen Seite der Prüfkörperaufnahme montiert ist. Beide Signale – Dehnung und Kraft – stehen dem Prüfstand damit in Echtzeit zur Verfügung, sodass sowohl kraftgeregelte dynamische Versuche als auch dehnungsgeregelte Versuche durchgeführt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich der dehnungsgeregelte quasistatische Hysteresenversuch genutzt, um frequenzabhängige Einflüsse auszuschließen und die reine Energiedissipation infolge innerer Reibung zu untersuchen. Abbildung 3 zeigt die eingespannte Probengeometrie während des Versuchs.

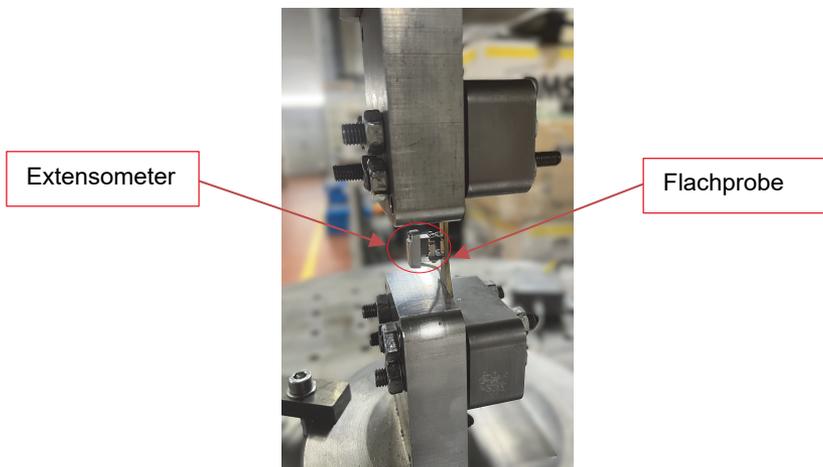


Abbildung 3: Eingespannte Probe im Prüfstand

Das Messsystem der SWINGLY-Maschine stellt die während der Versuche aufgezeichneten Daten als CSV-Dateien bereit. Diese Messdaten werden anschließend mit einem selbst entwickelten Python-Auswerteskript verarbeitet, aus dem die relevanten energetischen Kenngrößen und die entsprechenden logarithmischen Dekrement-Werte berechnet werden.

Versuchsdurchführung

In dieser Arbeit steht die Energiedissipation im Bereich kleiner elastischer Verformungen im Fokus, die bei konventionellen metallischen Werkstoffen üblicherweise nur einen vernachlässigbaren Beitrag liefert. Da jedoch die CuAlMn-Gedächtnislegierung untersucht wird, ist aufgrund spannungsinduzierter martensitischer Phasenumwandlungen bereits bei geringen Dehnungen eine

erhöhte Dissipation zu erwarten. Zum Vergleich wurden sowohl Proben einer Referenzkupferlegierung ohne Gedächtniseffekte als auch Proben der CuAlMn-Legierung geprüft. Die Belastung erfolgte dabei zyklisch ausschließlich in Zugrichtung, eine Druckbelastung wurde nicht aufgebracht.

Die Versuche wurden mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 %/s durchgeführt, wobei verschiedene Dehnungsamplituden bis zu einer maximalen Gesamtdehnung von 0,21 % angefahren wurden. Dieser Bereich umfasst laut Literatur (vgl. Abbildung 4) den Dehnungsbereich, in dem die Dämpfungseigenschaften der CuAlMn-Legierung einen deutlichen Anstieg zeigen.

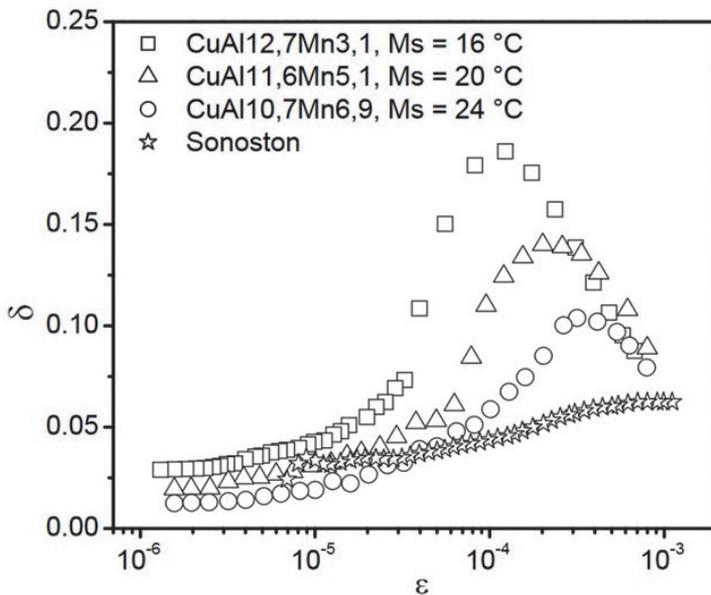


Abbildung 4: Vergleich des Dämpfungsverhaltens von Sonoston mit dem verschiedener CuAlMn-Legierungen in Abhängigkeit von der Dehnung /3/

Für jede Dehnungsamplitude wurden insgesamt zwölf Zyklen durchlaufen. Die Wahl dieser Zyklusanzahl basiert auf praktischer Erfahrung und gewährleistet eine ausreichende Stabilisierung der Messwerte, da typischerweise drei bis vier Zyklen benötigt werden, um stationäre Verhältnisse zu erreichen. Der erste und der letzte Zyklus werden nicht ausgewertet, da in diesen aufgrund der Maschinenregelung beim Auf- bzw. Abfahren regelmäßig deutliche Abweichungen auftreten. Die gewählte Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 %/s stellt einen optimalen Kompromiss zwischen Regelgüte und Versuchszeit dar: Sie ermöglicht eine zuverlässige Ansteuerung der kleinen Dehnungsamplituden und verhindert gleichzeitig die Ungenauigkeiten, die bei höheren Geschwindigkeiten insbesondere

im niedrigen Dehnungsbereich auftreten. Daher wird in dieser Arbeit ausschließlich diese Geschwindigkeit verwendet, da sie im gesamten untersuchten Bereich reproduzierbare und belastbare Messergebnisse liefert.

Auswertung

Für die Auswertung wurden drei Proben untersucht: eine Referenzkupferlegierung ohne Gedächtniseffekte sowie zwei Varianten der CuAlMn-Legierung (V075 und V091). Alle Proben wurden bei einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 %/s zyklisch belastet. Für jede Dehnungsamplitude wurden zwölf vollständige Zyklen durchgeführt.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse in Form des logarithmischen Dekrements zusammengefasst. Die angegebenen Werte stellen Mittelwerte der Zyklen 5 bis 11 dar, da die Hystereseschleifen der Proben nach den ersten Zyklen ein stabiles Verhalten erreichen. Durch diese Auswahl werden zudem Abweichungen in den ersten und letzten Zyklen, die typischerweise durch die Maschinenregelung entstehen, ausgeschlossen.

Tabelle 1: Gemittelttes logarithmisches Dekrement für verschiedene Dehnungsamplituden

Dehnungsamplitude ϵ_a	Logarithmisches Dekrement δ		
	Referenzkupferlegierung	V075	V091
0,06%	0,0006	0,0307	0,0360
0,09%	0,0004	0,0330	0,0527
0,12%	0,0006	0,0338	0,0650
0,15%	0,0006	0,0347	0,0760
0,18%	0,0009	0,0373	0,0863
0,21%	0,0029	0,0387	0,0936

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied im Energieverlust bzw. in der inneren Reibung während der elastischen Verformung zwischen der Referenzkupferlegierung und der CuAlMn-Gedächtnislegierung. Eine mögliche Ursache für diesen erhöhten Energieverlust in der CuAlMn-Legierung ist die spannungsinduzierte martensitische Phasenumwandlung, die bereits bei geringen Dehnungen auftreten kann. Die Werte des logarithmischen Dekrements der

Gedächtnislegierung liegen dabei um mehr als eine Größenordnung über denen der Referenzlegierung. Abbildung 5 veranschaulicht diesen Effekt.

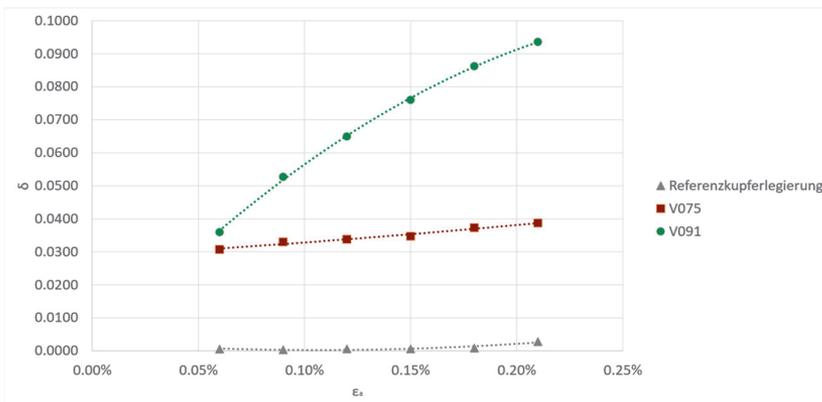


Abbildung 5: Gemitteltetes logarithmisches Dekrement für verschiedene Dehnungsamplituden

Die Streuung der Messwerte sowie die Reproduzierbarkeit während der zyklischen Belastung wurden anhand der Standardabweichungen bewertet (Tabelle 2). Dabei wird sichtbar, in welchem Umfang die Messwerte innerhalb eines Versuchs und bei den verschiedenen Dehnungsamplituden variieren. Diese Analyse liefert Hinweise darauf, ob für zukünftige Untersuchungen Anpassungen erforderlich sind – etwa zur Reduzierung des Messfehlers oder zur Minimierung einzelner Ausreißer.

Tabelle 2: Standardabweichungen der einzelnen Versuche

Dehnungsamplitude ϵ_a	Standardabweichung		
	Referenzkupferlegierung	V075	V091
0,06%	0,0005	0,0020	0,0027
0,09%	0,0003	0,0017	0,0022
0,12%	0,0009	0,0024	0,0032
0,15%	0,0006	0,0028	0,0040
0,18%	0,0004	0,0017	0,0036
0,21%	0,0009	0,0024	0,0019

Es ist auffällig, dass die Standardabweichungen der Referenzkupferlegierung vergleichsweise hoch ausfallen. Dies weist darauf hin, dass die logarithmischen Dekremente auch im stabilisierten Bereich der Hystereseschleife einzelne Ausreißer aufweisen und somit eine geringere Wiederholbarkeit zeigen. Für zukünftige Untersuchungen sollte daher geprüft werden, inwiefern eine Anpassung des Verformungsgradienten oder des untersuchten Dehnungsbereichs zu einer Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Messstabilität beitragen kann.

Fazit

Die ersten Ergebnisse der vorgestellten Messmethode zeigen Konsistenz und stimmen qualitativ mit den in der Literatur berichteten Beobachtungen überein. Für eine belastbare Bewertung der Methode ist jedoch die Wiederholbarkeit weiter zu untersuchen und zu verbessern. Dies betrifft sowohl die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse innerhalb eines Versuchs – insbesondere über verschiedene Hystereseschleifen hinweg – als auch zwischen unterschiedlichen Proben desselben Materials unter identischen Prüfbedingungen.

Die Untersuchung der CuAlMn-Gedächtnislegierung bleibt aufgrund ihres ausgeprägten Formgedächtniseffekts bei definierten Prüftemperaturen von besonderem Interesse. Dadurch kann der Temperatureinfluss auf die Dämpfungseigenschaften sowie auf die Phasenumwandlung detaillierter analysiert werden. Hierfür erscheint die Konstruktion und Integration einer temperierten Prüfkammer für die SWINGLY-Maschine sinnvoll. Zudem sollten Proben unterschiedlicher Zusammensetzung nach der Fertigung einer zusätzlichen Materialcharakterisierung unterzogen werden, um insbesondere die Martensitstarttemperatur zu bestimmen. Diese Aspekte müssen in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden, um eine verbesserte Vergleichbarkeit mit vorhandener Literatur sowie eine fundierte Bewertung im Kontext der Legierungsentwicklung zu ermöglichen.

Literatur

- /1/ E. Alkountar und A. Lohrengel, „Analyse der Dämpfungseigenschaften von metallischen Legierungen: Abhängigkeit von elastischer Dehnung und Frequenz,“ IMW Institutsmitteilung, 2024.
- /2/ F. Jian, Z. Ding, Y. Wu, H. Bai, Y. Shao und B. Zi, „Energy Dissipation Characteristics and Parameter Identification of Symmetrically Coated Damping Structure of Pipelines under Different Temperature Environment,“ Symmetry, 2020.
- /3/ S. Vogelgesang, Martensitisch umwandelnde Cu-Al-Mn-Legierungen mit gezielt eingestellter, hoher Dämpfung für isotherme Anwendungen, 2007.
- /4/ T. Kuttner und A. Rohnen, Praxis der Schwingungsmessung, Springer Vieweg, 2019.

Spalthöhenmessung mittels LIF und Turbulenzmessungen mittels PIV an einem Tribometer

Hanse, M.; Heinrich, C.; Ballmann, A.; Lohrengel, A.

In Zukunft sollen Schmier-spalthöhen und Turbulenzen an Druckkämmen vermessen werden, um das IMW-eigene Simulationsprogramm für Druckkämme zu validieren. Die Spalthöhenmessung mithilfe von LIF (Laser-induzierte Fluoreszenz) und Turbulenzmessung mittels PIV (Particle Image Velocimetry) wurde hierfür zunächst an einem Interferometer erprobt.



In the future, lubrication gap heights and turbulence at thrust cones should be measured in order to validate the IMW's simulation core. Gap height measurement using LIF (laser-induced fluorescence) and turbulence measurement using PIV (particle image velocimetry) were initially tested on an interferometer for this purpose.

Spalthöhenmessung

Interferometrie ist das traditionelle und verbreitetste Verfahren zur Spalthöhenmessung an elastohydrodynamischen (EHD) Kontakten. Bei der Interferometrie wird der EHD-Kontakt mit Licht beschienen. Um den Kontakt zu beleuchten, muss ein Kontaktpartner transparent sein, beim Tribometer ist dies die Glasplatte (3) welche auf der Stahlkugel (7) läuft, siehe Abbildung 1. Das Licht wird sowohl an der Unterseite des durchsichtigen Körpers, als auch an der Stahloberseite des anderen Kontaktpartners reflektiert. Der Abstand zwischen diesen Reflektionsflächen ist die zu vermessende Schmier-spalthöhe. Trifft das Licht nun auf den Kamerasensor, ergeben sich je nach Schmier-spalthöhe (also je nach Wellenlängenunterschied des reflektierten Lichts) farbige Interferenzringe. Vom Interferenzmuster kann auf die Spalthöhe geschlossen werden.

In Cardiff wurden zum Abgleich von Simulationen bei niedrigen Geschwindigkeiten (höhere Geschwindigkeiten mit stärkeren Vibrationen konnten bei der damaligen Kameratechnik nicht realisiert werden) Spalthöhenmessungen mithilfe Interferometrie durchgeführt (siehe Abbildung 2), /1/.

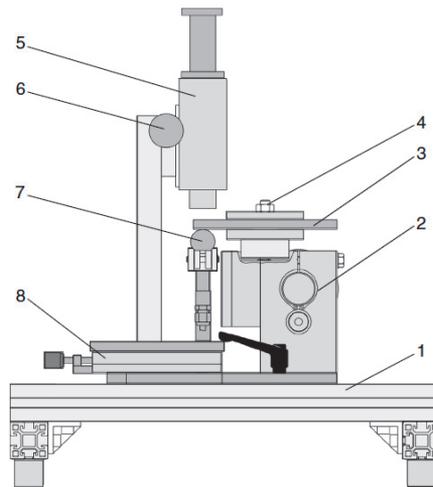


Abbildung 1: Aufbau des Tribometers, /2/

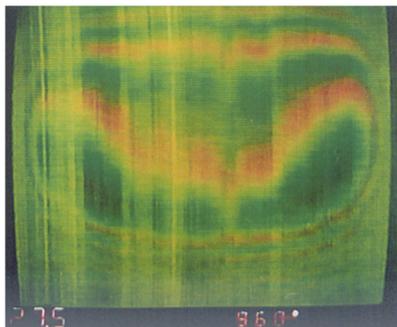


Abbildung 2: Mit Interferometrie gemessene Druckkamm-Spalthöhe /1/

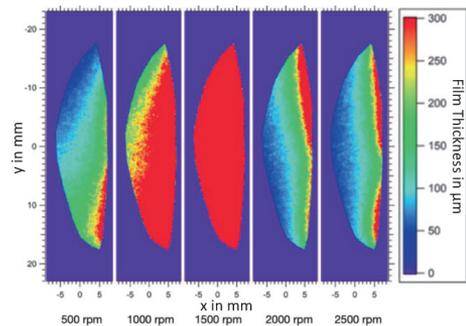


Abbildung 3: Mit LIF gemessene Druckkamm-Spalthöhe /3/

Wird weißes Licht verwendet, können mittels Interferometrie Schmier-spalthöhen bis zu 1 µm gemessen werden, bei duochromatischem (zweifarbigen) Licht kann der Bereich auf bis zu 2 µm erhöht werden. Im Stand der Technik werden jedoch Druckkämme mit Spalthöhen im Bereich von 1,5 µm bis 20 µm verwendet. Bei größeren Schmier-spalten überlagern sich die Lichtwellen bei der Interferometrie so stark, dass keine Interferenzringe mehr sichtbar sind /4/. Eine Alternative bietet die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF). Diese wird in der Druckkammtechnik von /3/,/5/ zur Spalthöhenmessung auf dem von /6/,/7/ entwickelten Prüfstand verwendet; Ergebnisse mit vergleichsweise hohen Schmier-spalten (bis zu 300 µm) sind in Abbildung 3 dargestellt.

Dem Schmiermittel werden zur LIF fluoreszierende Farbstoffe beigemischt. Diese Farbstoffe nehmen das einfallende Laserlicht (in Abbildung 4 blau) auf und geben Licht größerer Wellenlänge (grün) ab. Die Intensität des rückgestrahlten Lichts hängt von den Farbstoffeigenschaften, der Farbstoffmenge und der Anregungsintensität des Lasers ab. Die Farbstoffeigenschaften und die Anregungsintensität sind über den Versuchen konstant. Die Farbstoffmenge im Schmier-spalt hängt von dessen Höhe ab. Über diesen Zusammenhang kann die Schmier-spalthöhe aus einer Lichtintensitätskarte vermessen werden. Der Prüfaufbau (Abbildung 4) ähnelt dem der Interferometrie, als Lichtquelle wird jedoch ein Laser verwendet, dessen Wellenlänge dem Absorptionspeak des Farbstoffs entspricht. Ein dichroitischer Spiegel wird verwendet, um das Licht auf die Probe zu reflektieren und das vom Farbstoff emittierte Licht zur Kamera durchzulassen. Der dichroitische Spiegel wird somit genutzt, um das Licht selektiv nach der Wellenlänge zu trennen. Exciter-Filter und Barrier-Filter sind dafür zuständig, das Laserlicht zur Probe bzw. nur langwelliges Licht oberhalb der Laser-Wellenlänge zur Kamera durchzulassen, also das Licht, welches von dem fluoreszierenden Stoff emittiert wird /8/.

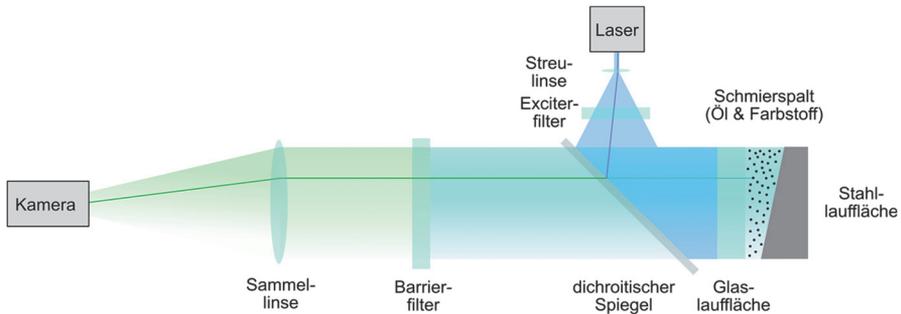


Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau zur Schmier-spalthöhenmessung mittels LIF

Vorteil dieser Prüftechnik ist die vergleichsweise einfache Kalibrierung und Umrechnung der aufgenommenen Lichtintensitätskarten zu Schmier-spalthöhenverteilungen. In /9/ wurden bspw. Spalthöhen von 200 nm bis hin zu 25 µm gemessen, was den messbaren Bereich der Interferometrie deutlich übersteigt; die hohe Robustheit gegenüber optischen Eigenschaften wird hervorgehoben.

Turbulenzmessung

Bei Reynoldszahlen $Re = \rho V h / \eta$ (Dichte ρ , Geschwindigkeit V , charakteristische Länge h (Schmier-spalthöhe), dynamische Viskosität η) über einer Grenzreynoldszahl kommt es zu Turbulenz. Diese äußert sich durch eine leichte Erhöhung der Tragfähigkeit und einen starken Anstieg der Reibung (~80% höher als bei laminarer Strömung /10/).

Kerr /6/,/11/ führte CFD- und experimentelle Turbulenzuntersuchungen an Druckkämmen bis zu Umfangsgeschwindigkeiten von 47 m/s durch. Der Versuchsaufbau mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ist in Abbildung 5 zu sehen.

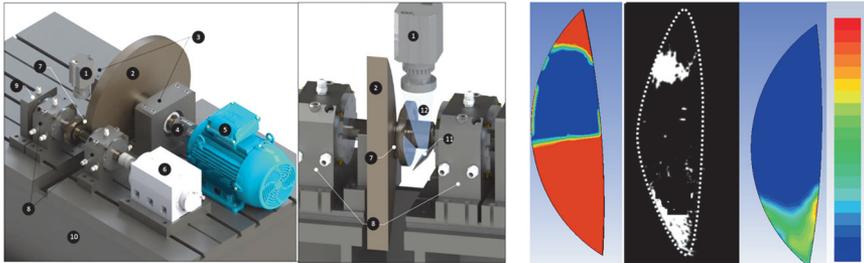


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Turbulenz und Kavitation, (1) High-Speed-Kamera; (2) Anlaufring und (7) Druckkamm mit Acrylglas-Fenstern, /6/

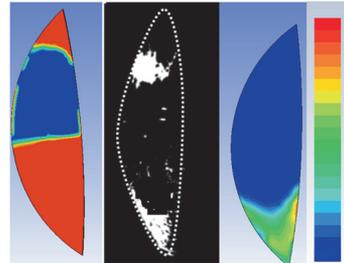


Abbildung 6: Links: Kavitation im blauen Bereich; Rechts: dimensionslose Turbulenzintensität, Turbulenz im Einlaufbereich (grün, unten); Mitte: aufbereitetes binäres Foto mit Kavitationsbereich (oben) und Turbulenzbereich (unten) in weiß dargestellt, /6/

Die Untersuchungen /6/,/11/ zeigen, dass Kavitation im Auslaufbereich des Druckkamms auftritt, während sich Turbulenzen vor allem im Einlaufbereich des Kontakts befinden, siehe Abbildung 6. Mit steigender Drehgeschwindigkeit vergrößert sich das von Turbulenzen betroffene Gebiet. Die CFD-Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der Turbulenz im Einlaufbereich bei den betrachteten Geschwindigkeiten und Lasten auf die Tragfähigkeit des Druckkamms gering ist /6/,/11/.

Zur experimentellen Untersuchung von Turbulenzwirbeln können verschiedene bspw. in /12/ beschriebene Techniken zur Sichtbarmachung von Strömungen verwendet werden. Eine effektive Methode zur Darstellung von Wirbeln ist das Einstreuen von Partikeln in das Fluid. Die zugegebenen Tracer-Partikel werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Hierbei werden zwei Bilder kurz hintereinander aufgenommen. Beide Bilder zeigen dieselben Partikel an unterschiedlichen Orten. Über die Abstände, die die Partikel zwischen den Aufnahmen aufweisen, kann auf das Strömungsfeld (Richtung und Geschwindigkeit) geschlossen werden. Diese Technik wird als Particle Image Velocimetry (PIV) bezeichnet.

Umsetzung am Tribometer

Am Institut für Maschinenwesen wurden in Vorarbeit auf einem Tribometer (Umfangsgeschwindigkeit von 0,5 m/s) die Machbarkeit von PIV Messungen gezeigt, indem durch eine Gummilippe eine turbulente Strömung erzeugt und durch eingestreute Partikel sichtbar gemacht wurde. Zwei kurz hintereinander aufgenommene Bilder (Frame 1 und Frame 2) zeigen dieselben Partikel an zwei verschiedenen Positionen. Durch eine Auswertung der Partikel-Abstände zwischen den beiden Frames kann auf das Strömungsfeld geschlossen werden, siehe Abbildung 7.

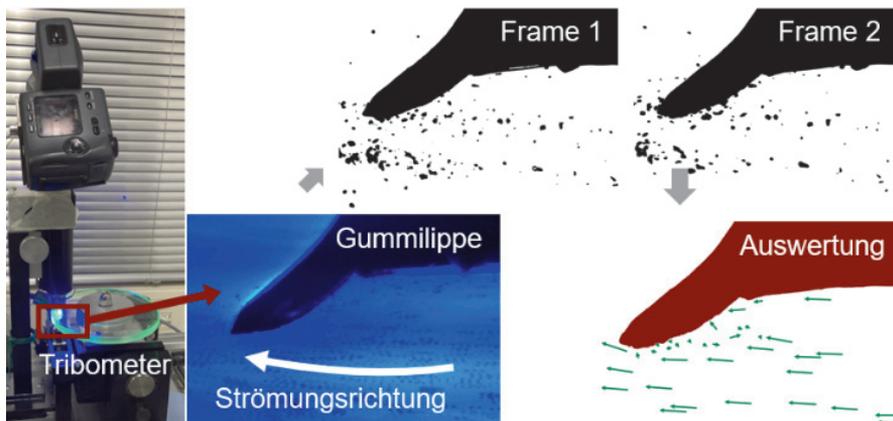


Abbildung 7: PIV am Tribometer des IMWs

In Abbildung 8 ist eine beispielhafte Messung der Schmier-spalthöhe am Kugel-Platte-Kontakt des institutseigenen Tribometers dargestellt. Hierfür wurde zunächst ein Bild im Stillstand aufgenommen, über welches die Verknüpfung von Lichtintensität zu Schmier-spalthöhe (Spalthöhe über Kugelgeometrie berechenbar, in-situ Kalibrierung, siehe /9/) ermöglicht. Anschließend wurde in Bewegung und unter Last das Foto in der Mitte von Abbildung 8 aufgenommen. In dunkel ist der Bereich zu sehen, in dem das Schmiermittel vom Öl verdrängt wurde (Laufspur). In der Mitte ist der Kugel-Platte-Kontakt zu sehen, gekennzeichnet durch einen Übergang von dunkel (geringer Schmier-spalt) zu hell (hoher Schmier-spalt). Die Schmier-spalthöhe (rechte Abbildung) wird über den Zusammenhang aus Lichtintensität und Spalthöhe berechnet. Die Machbarkeit von Schmier-spalthöhenmessungen (im für Druckkämme relevanten Bereich von 0 bis 100 μm) konnte somit gezeigt werden.

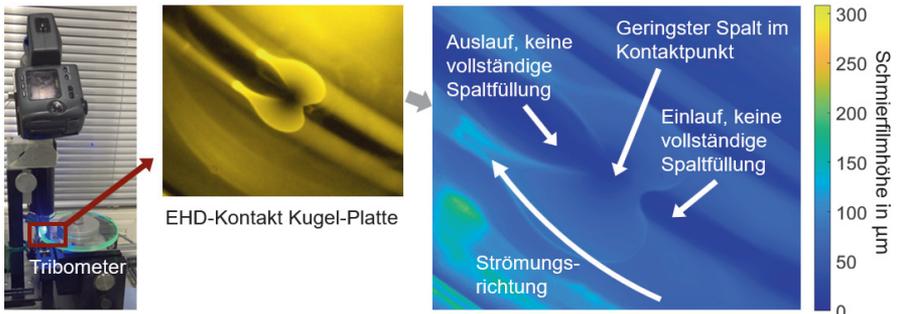


Abbildung 8: LIF Messung am Tribometer des IMWs

Als fluoreszierender Farbstoff wurde Lumilux® Yellow CD 345 nach Vorbild von /13/,/14/,/15/ gewählt. In Abbildung 9 sind die Transmissionsgrade für Borosilikat (Dicke: 10 mm und 20 mm) eingetragen. In hellblau ist das Absorptionsspektrum des Farbstoffes nach /14/ und in grün das Emissionsspektrum nach /13/,/14/,/15/ eingetragen. Beide Bereiche liegen im Transmissionsbereich des Glases. Die unterschiedlichen Emissionsspektren begründen sich in den Unterschieden im verwendeten Öl, der Konzentration des Farbstoffs und der Öl-Temperatur, es wird jedoch ersichtlich, dass der Wellenlängenbereich identisch bleibt. Laser-Spektren sind in dunkelblau gekennzeichnet. Zudem sind, wie oben beschrieben, ein Exciter-Filter, ein Barrier-Filter und ein dichroitischer Spiegel notwendig. Mögliche Transmissionsbereiche der Filter und des Spiegels sind schwarz gefärbt.

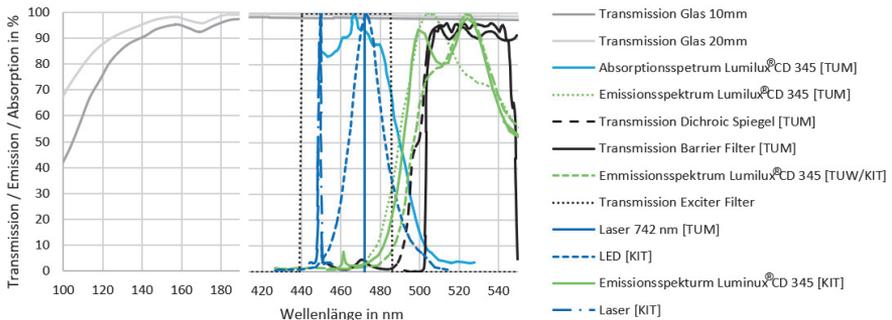


Abbildung 9: Transmission Glas-Druckkamm, Absorptions- und Emissionsspektrum von Lumilux® Yellow CD 345, Filter und Dichroic Spiegel, Laser / LED, nach KIT /13/, TUM /14/ und TUW / KIT /15/

Übertragung auf einen Druckkammprüfstand

Zur Anwendung der Verfahren PIV und LIF auf die Druckkammtechnik muss einer der Druckkämme aus Glas gefertigt werden. Die transparenten Druckkämme aus Glas werden auf der institutseigenen Schleifvorrichtung geschliffen und anschließend analog zu optischen Linsen mit verschiedenen ungebundenen Körnungen und Filzschleifstiften feingeschliffen. In Abbildung 10 ist die Schleifvorrichtung und ein erster grob geschliffener Glas-Druckkamm. In Abbildung 11 das am Glas-Druckkamm erzeugte Profil zu sehen. Hier konnte ein Schrägungswinkel der Lauffläche von 1° erzielt werden.

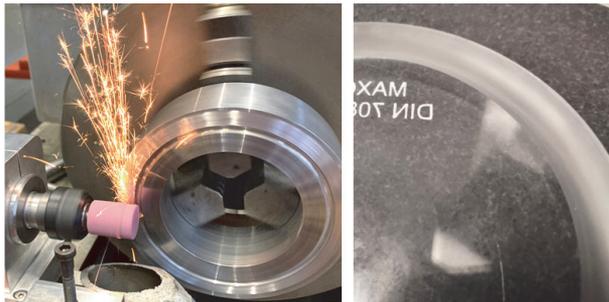


Abbildung 10: Schleifvorrichtung mit Stahlprüfling und geschliffener Glasrohling

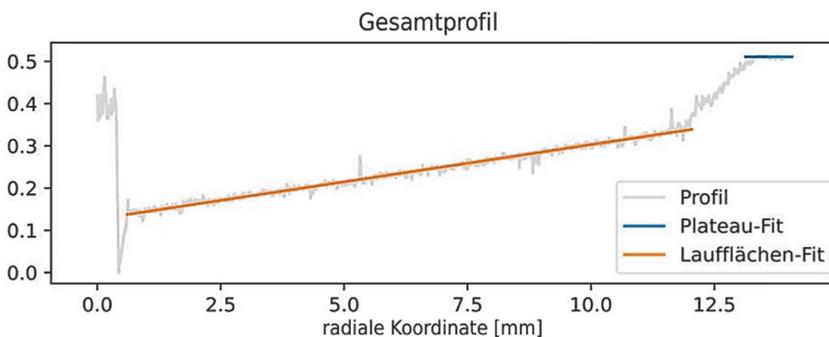


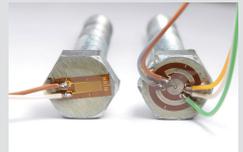
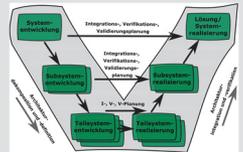
Abbildung 11: Profilmessung Glas-Druckkamm

Zusammenfassung

Durch Voruntersuchung am institutseigenen Tribometer konnte die LIF und PIV für den zukünftigen Einsatz in der Druckkammtechnik erprobt werden. Es konnte gezeigt werden, dass mittels LIF der für Druckkämme relevante Spalthöhenbereich zwischen 0 und $100\ \mu\text{m}$ vermessen werden kann. Zudem konnte mithilfe von PIV eine erste Auswertung von turbulenten Strömungen erfolgen.

Literatur

- /1/ Rudd, L.: Aspects of tribology in thrust cone bearings, Dissertation: University of Wales Cardiff, 1996.
- /2/ Mittasch, P.: Versuchsanleitung TM 260.02 Elasto-Hydrodynamisches Verhalten, Barsbüttel: G.U.N.T. Gerätebau, 2019.
- /3/ Gorman, A.: Laser-Induced-Fluorescence (LIF) Imaging Studies of the Oil-Film Thickness in a Thrust Collar, Masterthesis: Texas A&M University, 2022.
- /4/ Liu, H.; Guo, F.; Guo, L. und Wong, P.: A Dichromatic Interference Intensity Modulation Approach to Measurement of Lubricating Film Thickness, Tribol Lett, pp. 1-11, 2015.
- /5/ Kulatilaka, W.; und Delgado, A.: Laser-Induced Fluorescence (LIF) Imaging Studies of the Oil-Film Thickness in a Thrust Collar; Continuation Proposal, 06 2022.
- /6/ Kerr, T.: Experimental and Numerical Study of Oil Lubrication on a Thrust Collar for Use in an Integrally Geared Compressor, Dissertation: A&M University, 2020.
- /7/ Kerr, T.; Delgado, A. und Childs, D.: Static Stiffness Measurements for a Thrust Collar Used in an Integrally Geared Compressor, ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 11 2019.
- /8/ Sugimura, J.; Hashimoto, M. und Yamamoto, Y.: Study of elasto-hydrodynamic contacts with fluorescence microscope, Tribology Series, Bd. 38, pp. 609 - 617, 2000.
- /9/ Myant, C. und Reddyhoff, T.: Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts, Tribology International 43, pp. 1960 - 1969, 2010.
- /10/ Stachowiak, G. und Batchelor, A.: Engineering Tribology, Elsevier, 2013.
- /11/ Kerr, T. und Delgado A.: Novel Approach for Optical Characterization of Thrust Collar Lubricated Area: Experimental and Numerical Results, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 01 2021.
- /12/ Nietzsche, W.: Strömungsmesstechnik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- /13/ Schweizer, T.; Kubach, H. und Koch, T.: Investigations to characterize the interactions of light radiation, engine operating media and fluorescence tracers for the use of qualitative light-induced fluorescence in engine systems, Automotive and Engine Technology, pp. 275-287, 12 2021.
- /14/ Kirner, C.; Halbhuber, J.; Olivia, A. und Graf, S.: Experimental and simulative research advances in the piston assembly of an internal combustion engine, Tribology International, band 99, pp. 159-168, 07 2016.
- /15/ Zöbinger, N.; Schweizer, T.; Lauer, T.; Kubach, H.; und Koch, T.: Experimental and Numerical Analysis on Two-Phase Induced Low-Speed Pre-Ignition, Energies, 08 2021.



Hochschule und Kontakte

D

Schülerseminar Maschinenbau 2025

Krahl, S.; Hanse, M.; Wruck, S.; Ammersdörfer, T.;
Inkermann, D.; Lohrengel, A.

Erstmals fand am 22. & 23. November 2025 das Schülerseminar Maschinenbau statt. Unter Beteiligung verschiedener Institute (IMW, IMAB, ITR, ISAF, IEI) und mit Unterstützung des zentralen Marketings der TU Clausthal gewannen Schüler:innen im Alter von 15 bis 18 Jahren bei einer Mischung aus praxisnahen Workshops und Vorträgen Einblicke in den Studiengang Maschinenbau und das Berufsbild des Ingenieurs.



The first mechanical engineering seminar for school students took place on November 22 and 23, 2025. With the participation of various institutes (IMW, IMAB, ITR, ISAF, IEI) and the support of Clausthal University of Technology's central marketing department, students aged 15 to 18 gained insights into the mechanical engineering degree program and the engineering profession through a mix of practical workshops and lectures.

Ausgangspunkt

Vor dem Hintergrund der aktuellen Studierendenzahlen bemüht sich der Maschinenbau an der TU Clausthal insbesondere um die Rekrutierung neuer Studieninteressierter. Als eine Maßnahme fand in diesem Jahr erstmals das Schülerseminar Maschinenbau statt, welches durch das IMW und das zentrale Marketing der TU Clausthal geplant und organisiert wurde. Im Zuge des Wochenendseminars gab es unter Beteiligung der Maschinenbauinstitute vielfältige Workshops zu verschiedenen Themen, eine gemeinsame Abendaktion und umfangreiche Informationen zum Studium an der TU Clausthal. Ziel dabei war es, in lockerer Atmosphäre aufzuzeigen wie vielfältig das Maschinenbaustudium an der TU ist und welche Karrieremöglichkeiten sich nach Abschluss des Studiums bieten, um die Zukunftsfähigkeit des Maschinenbaus zu beleuchten.

Von Robotik bis Recycling

Bei bestem Oberharzener Winterwetter startete die Gruppe aus sieben Schüler:innen am Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM) in den Tag. Nach einer Begrüßung durch Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling (ISAF) ging es direkt los mit einem praktischen Workshop zu den Themen Schweißen und Werkstoffprüfung. Am Schweißsimulator konnten alle Teilnehmenden selber MAG oder E-Hand schweißen, bevor es zum hochaktuellen Thema des Wire Arc Additive

Manufacturing (WAAM) eine Vorführung gab. Im Anschluss wurden am IEI durch Mitmachaktionen Fragen wie „Wie funktioniert eigentlich ein Segway?“ oder „Wie schafft es ein Roboter auf zwei Rädern zu balancieren?“ beantwortet, bevor es am späten Nachmittag beim IMAB bei einer Fahrt mit dem Fahrrad sportlich wurde. Gemessen wurde hierbei die Beanspruchung im Fahrradfahrer, um Rückschlüsse auf die Ausnutzung der Werkstofffestigkeit zu erlangen. Nach einem gemeinsamen Pizzaessen im IMW und einer kurzen Hausführung gab es dann noch einen Bastelwettbewerb, bei dem die konstruktive Kreativität der Teilnehmer:innen bei der Entwicklung eines Katapults aus Schaschlikspieß, Klebeband und Gummibändern gefragt war. Sieger wurde ein ca. 15 m weit schießendes Katapult.

Nach Übernachtung und Frühstück in der Akademie des Sports, ging es am Sonntag im IMW frisch gestärkt um das Konzept der Kreislaufwirtschaft. Prof. Dr.-Ing. David Inkmann (IMW) brachte den Studieninteressierten das Leitthema der TU Clausthal - Circular Economy - spielerisch näher. Beim partizipativen Planspiel „FragFritzi!“¹, wurden in der Gruppe die Herausforderungen der praktischen Umsetzung der Kreislaufwirtschaft diskutiert und gemeinsam die Ressourcenintensität für unterschiedliche Alltagsprodukte (z.B. Waschmaschine oder Getränkedose) bestimmt. Anschließend wurden mögliche Lösungsansätze anhand von alltäglichen Produkten („Was passiert mit meinem alten Smartphone und welche Möglichkeiten habe ich es zu entsorgen?“) erarbeitet und spielerisch mit Wurfsäckchen bestimmt, welche Schritte nach der Nutzung eines Produktes erfolgen können (z.B. Produktwiederverwendung oder Komponentenwiederverwendung). Nach einem kurzen Fußmarsch zum ITR stand dann der letzte Workshop des Seminars an: Reibung – Fluch und Segen für Ingenieure. Beide Seiten der Medaille wurden durch die Teilnehmenden selbst analysiert. Einerseits ist zum Beispiel in einem Gleitlager die Minimierung des Reibungswiderstandes wünschenswert, andererseits wird die bewegungshemmende Funktion des Reibungswiderstandes in technischen Anwendungen wie beispielsweise Bremsen und Kupplungen bewusst angewandt. Den Abschluss des Seminars bildete ein Vortrag von Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel (IMW), welcher nochmals die Vorzüge eines Studiums an der TU Clausthal zusammenfasste und die Inhalte des Maschinenbaustudiums und das Berufsbild des Ingenieurs zielgruppengerecht aufzeigte.

Resümee

Das Feedback der Teilnehmer:innen zum Schülerseminar fiel durchweg positiv aus. Gerade die familiäre Atmosphäre wurde als sehr angenehm empfunden und die vielfältigen Eindrücke aus den Workshops, aber auch der persönliche Kontakt zu den Dozenten, Promovierenden und Studierenden werden wohl nachhaltig in Erinnerung bleiben. Die Organisatoren und Ausrichter freuen sich über diese positive Resonanz und sind deshalb motiviert auch im kommenden Jahr ein

¹ Weitere Informationen zu FragFritzi! sind unter <https://frag-fritzi.de/> abrufbar. Es besteht die Möglichkeit, das Spiel auf Anfrage zu spielen. Das Projekt FragFritzi! wurde im Rahmen des Wissenschaftsjahrs 2022 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Schülerseminar Maschinenbau auszurichten. Alle Infos dazu befinden sich ab dem Frühjahr 2026 auf den Webseiten der TU Clausthal.

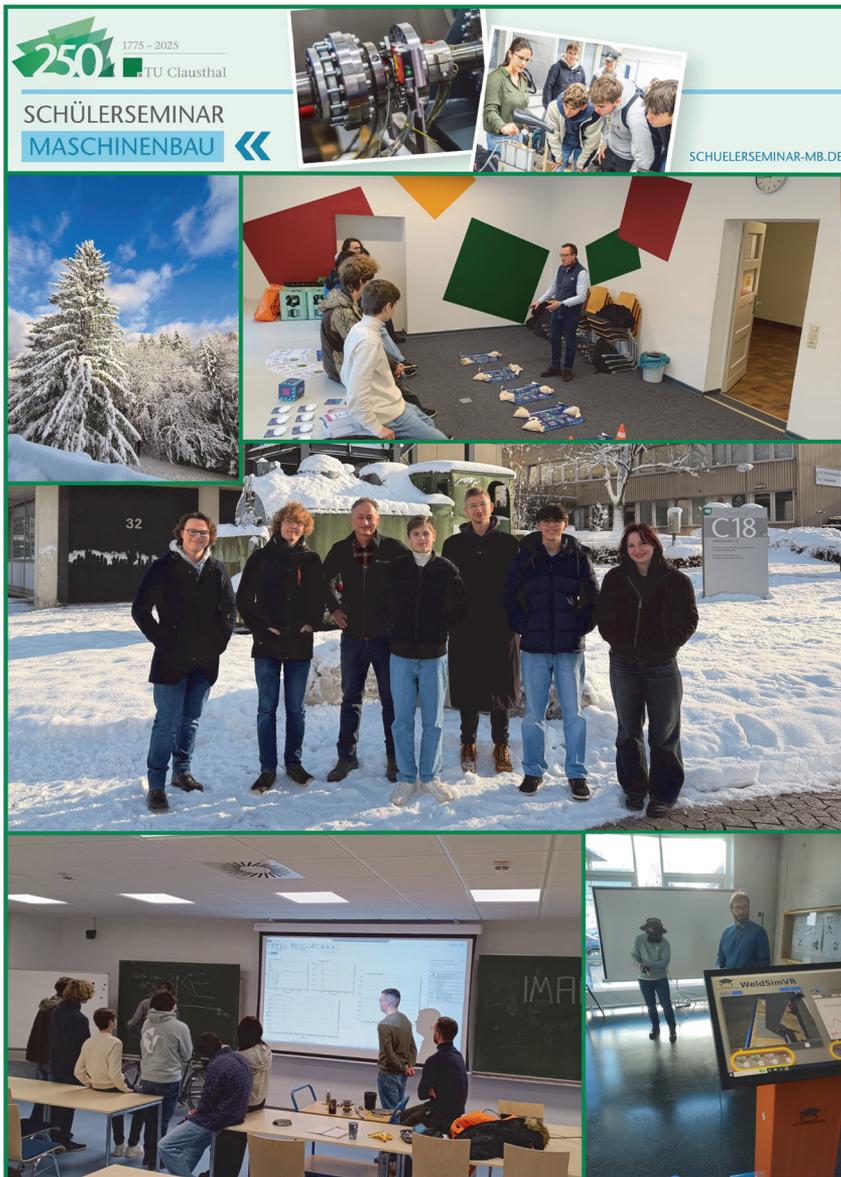


Abbildung 1: Impressionen vom Schülerseminar 2025

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 16 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 zwei Universal-Zug/Druck-Prüfmaschinen (Sincotec 20kN und MTS 100kN), 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 Thermografiekamera TESTO 890 mit hoher Auflösung steht für die zusätzliche Überwachung des Bauprozesses in den AM-Anlagen sowie zur Detektion von Verschleißvorgängen an Maschinenelementen zur Verfügung.

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. Zwei PRUSA-3D-Drucker stehen für das Rapid Prototyping von Komponenten bereit. Für die Simulation und Umsetzung teilautomatisierter Montageschritte werden zwei kollaborative Roboterarme UR5e der Firma Universal Robotics eingesetzt.

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

Veröffentlichungen des Institutes seit 2016

Veröffentlichungen 2025

Heinrich, C.; Lohrengel, A.: Start-up Ridging Failures at Very Large Radii: The Case of Thrust Collars. In: Tribology Transactions, 12.2025. <https://doi.org/10.1080/10402004.2025.2582043>.

Duchâteau, F.; Ochse, G.: FVA-694 II, Einfluss kombinierter Zusatzlasten auf die maximale Hertzsche Pressung beim Klemmrollen- und Klemmkörperfreilauf, Informationstagung, Forschungsreport; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 24.10.2025

Gansel, R.; Quanz, M.; Heinrich, C.; u. a.: Design and Development of a Load-Sensitive Autonomous Splined Shaft with Material Sensors, Integrated Evaluation Unit, Wireless Data Transmission and Energy Harvesting. In: Forschung im Ingenieurwesen 89 (1), 2025. Seite 145. <https://doi.org/10.1007/s10010-025-00909-9>.

Afshari, A.; Tröger, J.-A.; Meyer, J.; Hartmann, S.; Inkermann, D.: Non-Planar 3D Printing Enhancing Design Potentials by Advanced Slicing Algorithms and Path Planning. In: Procedia CIRP 136, 2025. Seiten 284–289, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.050>

Stephan, R.; Schumacher, T.; Inkermann, D.: Fostering Model Reuse in Model-Based Systems Engineering Using Knowledge Graphs. In: Procedia CIRP 136, 2025. Seite 290–295, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.051>

Meyer, J.; Lipšinić, Z.; Li, Z.; Husung, S.; Inkermann, D.; Pavković, N.: Design under Uncertainty – Model-Based Determination of Uncertainties in the Application of Reused Components. In: DS 140: Proceedings of the 36th Symposium Design for X (DFX2025), 2025. Seiten 61–70, <https://doi.org/10.35199/dfx2025.07>

Bhatt, A. N.; Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.: Impact of Problem Brief Characteristics and Influencing Factors on Design Outcomes in a Project-Based Engineering Course. In: Proceedings of the 22nd International Conference on Design Education 17.08.2025, V004T04A002, <https://doi.org/10.1115/DETC2025-168538>

Bhatt, A. N.; Inkermann, D.; Gericke, K.: Investigating Support Strategies for Users in Repair Activity of Household Appliances. In: Proceedings of the Design Society 5, 08.2025. Seiten 2171–2180, <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10231>.

Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.: Supporting Structured Reflection in Engineering Design by Chatbots: Potentials and Concept for a Reflection Chatbot. In: Proceedings of the Design Society 5, August 2025. Seiten 2951–2960, <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10309>

Meyer, J.; Inkermann, D.: Reusing Used Components in New Product Generations - a Systematic Literature Review on Challenges and Future Research. In: Proceedings of the Design Society 5, August 2025. Seiten 2791–2800, <https://doi.org/10.1017/pds.2025.10293>

Quanz, M.; Gansel, R.; Krahl, S.; Schäfer, G.; Barton, S.; Maier, H.; Lohrengel, A.: Positioning of a material sensor in a splined shaft. In: Forschung im Ingenieurwesen, SPP 2305: Sensor-integrating Machine Elements, Bd. 89 (89), 17.08.2025. <https://doi.org/10.1007/s10010-025-00847-6>

Heinrich, C.; Lohrengel, A.: Intracacies of Thrust Collar Simulation. In: Lubricants 13 (5), 05.2025. Seiten 214, <https://doi.org/10.3390/lubricants13050214>

Stök, M.; Lohrengel, A.: Impact of outside Plastic Coated Ropes on Drum Stress in Multilayer Applications. In: 8th International Stuttgarter Ropedays 2025 Conference Proceedings, 21./22.05.2025. Stuttgart, ISBN: 978-3-00-081732-8

Schumacher, T.; Stephan, R.; Inkermann, D.: Development and Implementation of Digital Heterogeneous Models in Model-Based Systems Engineering. In: Procedia CIRP 136, 2025. Seiten 420–425, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.073>.

Bauer, R.; Inkermann, D.: Assessment Concept for Transfer Learning Methods in Context of Lifetime Prognosis of Systems. In: Procedia CIRP 136, 04.2025. Seiten 236–241, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.042>.

Schumacher, T.; Stephan, R.; Inkermann, D.: Digitale Archäologie: Wie alte Daten neue Produkte formen. In: IM + io, 1/2025. Seiten 68–73.

Schumacher, T.; Müller, C.-K.; Inkermann, D.: SysML Process Chains in MBSE: Systematic Literature Review and Future Research Directions. In: Digital Engineering, 02.2025. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100037>.

Pusicha, J.; Stromberg, H.; Quanz, M.; Lohrengel, A.: Towards an Automated Design Evaluation Method for Wire Arc Additive Manufacturing. In: Applied Sciences 15 (2), 18.01.2025. Seite 938, <https://doi.org/10.3390/app15020938>

Veröffentlichungen 2024

Breidohr, M.; Meyer, J.; Ravichandran, H.; Inkermann, D.: Reverse Engineering in der zirkulären Produktentstehung. In: Proceedings of the 35th Symposium Design for X, September 2024, <https://doi.org/10.35199/dfx2024.17>.

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 einsatzspezifischen 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 integrierter 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/NORDDSIGN2024.24

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.; Ammersdörfer, 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, Sierke 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 Mater Eng and Perform 33, 9004–9016, 2024, DOI: 10.1007/s11665-024-09287-9

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

Kirchner, E.; Wallmersperger, T.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.; u.a.: A Review on Sensor Integrating Machine Elements. Advanced Sensor Research 3(4), 1–37 (2024) <https://doi.org/10.1002/adsr.202300113>

Veröffentlichungen 2023

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.; Ammersdörfer, 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

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

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

Stök, M.; Recknagel, T.; Lohrengel, A.; Schmidt, T.: Lebensdauer laufender Drahtseile mit Kunststoffummantelung und deren Eignung für die Mehrlagenwicklung. In: Katterfeld et al.: 30. Internationale Kranfachtagung

(Tagungsband), Magdeburg: Universitätsverlag, 2022; ISBN 978-3-948749-11-8; S. 93-106

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

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

Schumacher, T.; Inkermann, D.: Heterogeneous Models to Support Interdisciplinary Engineering – Mapping Model Elements of SysML and CAD. *Proceedings of 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](https://doi.org/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 – Prototypen-erkenntnisse 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/duublico/73094>; ISBN: 978-3-940402-43-1

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2019

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2018

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2017

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

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

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

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

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

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

Lohrengel, A.; Schulze, M.; 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 Druckkamm lagern. In: 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 5. und 6. Oktober in Duisburg: Interdisziplinäre Produktentwicklung. Essen: Universität Duisburg-Essen, Universitätsbibliothek, 2017. – ISBN 978–3–940402–15–8, S. 59–68

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

Veröffentlichungen 2016

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

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

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

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

Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M.; Stahr, K.: Seiltrommeln mit Faserseilen; DRAHT 6/ Dezember 2015, ISSN 0012-5911; http://www.drahtmagazin.de/draht-fachartikel/seiltrommeln-mit-faserseilen_32114_de

Martinevski, 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 Profilwellen (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

Erschienenene Institutsmittellungen seit 2012

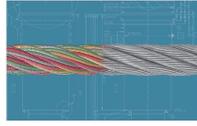
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2013



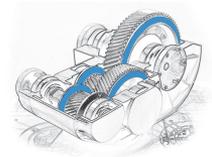
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2014



 TU Clausthal

Institutsmittellung 2015



 TU Clausthal

Institutsmittellung 2016



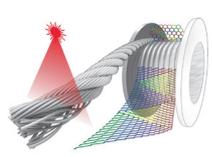
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2017



 TU Clausthal

Institutsmittellung 2018





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

Ballmann, Arne: Jahrgang 2003, studiert Maschinenbau an der TU Clausthal.
arne.ballmann@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

Bhatt, Apoorv Naresh: Jahrgang 1993, studierte Maschinenbau und promovierte am Indian Institute of Science in Bangalore, Indien, in Designtheorie und Pädagogik. Seit November 2024 Postdoktorand am IMW.
bhatt@imw.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 (LUH), seit 06/2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde, LUH, Promotion 10/2025 zum Thema „Lastsensitive Werkstoffsensoren zur prädiktiven Bewertung der Bauteilintegrität“
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

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

Lohregel, 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 am IMW, Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Konstruktionslehre.
lohregel@imw.tu-clausthal.de

Lontsi Nongni, Bristol Bryan: Jahrgang 2001, studiert allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 05/2025 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
lontsi@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

Ravichandran, Daraneesh: Jahrgang 1996, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 04/2023 Studium Master Intelligent Manufacturing an der TU Clausthal.
daraneesh.ravichandran@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 und seit 10/2025 Lehrkraft für besondere Aufgaben (LfbA).
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

Vo Dan, Khanh Toan: Jahrgang 1999, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 04/2025 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
vo.dan@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 auf 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.

