

Institutsmitteilung 2022



IMW
TU Clausthal

Institutsmitteilung 2022 (Nr. 47)



Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 47
(Dezember 2022)

Herausgeber:

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

Redaktion und Layout:

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

Anschrift:

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

Tel: (0 53 23) 72-22 70

Fax: (0 53 23) 72-35 01

E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de

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

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Rückkehr zum Lehrbetrieb in Präsenz

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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
---------------	---

A: Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

<i>Springorum, J. F.; Schäfer, G.</i> Einfluss der Schmierung auf die Gestaltfestigkeit der Passverzahnung.....	5
<i>Klügel, N.; Lohrengel, A.</i> Untersuchungen am stirnseitig verschraubten Freilauf.....	13
<i>Duchâteau, F.; Lohrengel, A.</i> Einfluss von oberflächennahen Parametern auf die Lebensdauer von Klemmrollenfreiläufen	27
<i>Krahl, S.; Lohrengel, A.</i> Bestimmung von Anwendungsreibungswerten stirnseitig befestigter Freiläufe.....	35

B: Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

<i>Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.</i> Reflexion in der Produktentwicklung - Strukturierte Reflexion mithilfe des Reflection Canvas	47
<i>Schumacher, T.; Inkermann, D.</i> Erzeugung von SysML-Stereotypen zur Beschreibung logischer Systemarchitekturen im Model-based Systems Engineering	59
<i>Bauer, R.; Inkermann, D.</i> Ansätze und Verfahren zur Prognose der Lebensdauer von Systemen.....	69
<i>Quanz, M.; Lohrengel, A.</i> Grundlegende Konstruktionsrichtlinien für das Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM).....	79

C: Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Rehmet, R.; Lohrengel, A.</i> Entwicklung von anwendungsangepassten akustischen Absorbern unter Nutzung von Simulationstechnik.....	87
<i>Stök, M.; Schäfer, G.; Lohrengel A.</i> Messung der Relativbewegung zwischen einer Achse und Nabe	93
<i>Heinrich, C.; Gansel, R.; Schäfer, G., Barton, S.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.</i> DFG SPP 2305: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff als sensorintegriertes Maschinenelement.....	101

D: Hochschule und Kontakte

<i>Losch, M.; Meyer, J.; Lohrengel, A.; Inkermann, D.</i> CAD-Umstellung am IMW.....	109
<i>Schäfer, G.; Wächter, M.</i> 50 Jahre Institutsmitteilung	113
<i>Krahl, S.; Wächter, M.</i> 20. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik an der TU Clausthal.....	119

Ausstattung etc.

Das Institut und seine technische Ausrüstung	123
Veröffentlichungen des Institutes seit 2013	127
Erschienenene Institutsmitteilungen seit 2010.....	141
Autoren	143
Anfahrt	145

Vorwort

Liebe Freundinnen und Freunde des Instituts für Maschinenwesen,

nach zwei Jahren Pandemie haben wir alle erwartet, dass es 2022 nun bergauf geht und das Leben und Arbeiten sich wieder normalisieren. Wir haben erlebt, wie wichtig der persönliche Austausch mit Kolleg:innen auf Tagungen und Projekttreffen ist und wie wertvoll die Lehre in Präsenz ist. Gleichzeitig hat uns der Ukrainekrieg und die daraus resultierende Energiekrise vor neue Herausforderungen gestellt. Wo es im Hochschulbetrieb möglich ist, soll massiv Energie eingespart werden, was bei uns im Harz bei aktuell herrschenden zweistelligen Minusgraden nicht immer einfach ist.

Trotz dieser Herausforderungen freuen wir uns die jetzt fünfzigjährige Tradition der Institutsmitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen weiterzuführen. Vor Ihnen liegt die 47. Auflage der Institutsmitteilung. Vor 50 Jahren, 1972, wurde die erste Auflage von Professor A. Kuske herausgegeben. Der Rückblick, siehe Artikel auf S. 113, zeigt die spannende Entwicklung des Instituts auf. Die historische Bedeutung des Instituts ist uns in diesem Jahr auch im Kleinen verdeutlicht worden. Der Umbau der Büroräume im 1. OG nach Berufung von David Inkermann hat uns Einblicke in die unterschiedlichen Nutzungen der Räume gegeben und wird konstruktiv kritisch durch den Denkmalschutz begleitet.

Im Rückblick auf das Jahr 2022 möchten wir hier einige Highlights hervorheben.

Ein Highlight war das KT Kolloquium, welches 2022 in der frisch renovierten Aula der TU Clausthal stattfand. Weitere Details zur Tagung können Sie dem Bericht auf S. 119 entnehmen. Wir haben uns über das positive Feedback sehr gefreut.

Im Bereich der Forschung gibt es auch erfreuliche Meldungen. Im nächsten Jahr werden wir zusammen mit den Kollegen der TU Dresden ein weiteres Projekt zur Untersuchung kunststoffummantelter Seile beginnen.

Für einen eingereichten DFG-Antrag haben wir ebenfalls eine Zusage erhalten. In dem Projekt sollen Druckkamlagerungen erstmals im Bereich sehr hoher Hertzscher Pressungen eingesetzt und erforscht werden.

Seit September arbeiten wir mit im 7. Energieforschungsprogramm des BMWK und kümmern uns dort, in einem neuen Forschungsprojekt, um die Effizienzsteigerung im Turboantriebsstrang.

Ein weiteres Projekt im Rahmen des Energieforschungsprogramms fokussiert den Einsatz Digitaler Zwillinge für die Lebenszyklusplanung ressourcenintensiver Elektronikprodukte und wird in Zusammenarbeit mit dem ISSE (Professor A. Rausch) bearbeitet.

Eine weitere Zusage haben wir für ein FVA-Projekt im Bereich der Welle-Nabe-Verbindung bekommen. Zusammen mit der TU Dresden, der TU Chemnitz und der Hochschule Zwickau wollen wir erforschen, wie experimentell und simulativ gewonnene Versuchsdaten für den Einsatz in Algorithmen der Künstlichen Intelligenz (KI) zukünftig konditioniert sein müssen.

Mehrjährige gemeinsame Anstrengungen und Vorarbeiten waren nötig, um in 2022 unter der Leitung von Professor Wesling bei der DFG einen Antrag für einen Clausthaler Sonderforschungsbereich zu stellen. Es soll eine Prozesskette für die lichtbogenadditive Fertigung von Strukturbauteilen erforscht werden. Den letzten Schritt der Begutachtung konnten wir mit einer Begehung in Clausthal erfolgreich meistern und hoffen nun auf ein positives Votum aus dem Senat der DFG.

Nach überstandener Pandemie konnten wir die Lehre wieder vollumfänglich in Präsenz durchführen, was gerade bei der Diskussion von konstruktiven Entwürfen viel mehr Spaß macht als eine Onlinekonferenz (siehe Titelbild).

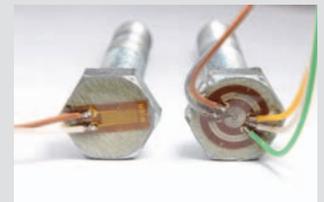
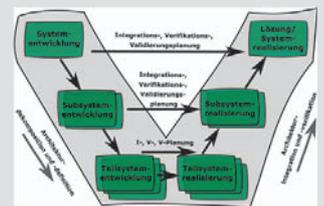
Der Konstruktionswettbewerb wurde in diesem Jahr in Zusammenarbeit mit der Firma Sennheiser durchgeführt und es ging um neue Konzepte für den Transport und das Laden von In-Ear Kopfhörern. Der nächste Wettbewerb ist gerade gestartet und zwar diesmal in Kooperation mit der Firma Sympatec.

Ein weiteres wichtiges Ereignis in 2022 war das Ehemaligentreffen im September am Institut für Maschinenwesen. Neben dem wissenschaftlichen Austausch mit spannenden Vorträgen sorgte der Besuch des PS Speichers in Einbeck für interessante Einblicke in die Geschichte der Mobilität.

Wir als IMW-Team wünschen Ihnen ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes Jahr 2023.



A



Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen



Einfluss der Schmierung auf die Gestaltfestigkeit der Passverzahnung

Springorum, J.F.; Schäfer, G.

Die Dimensionierung von Passverzahnungen muss verschiedene Aspekte berücksichtigen. Dazu gehören neben der Gestaltfestigkeit auch die Verschleißfestigkeit und die dazwischen agierende Reibdauerschädigung. Mit diesem Betrag wird für die Wahl eines geeigneten Festigkeitsnachweises Licht in den Bereich zwischen Gestaltfestigkeit und Reibdauerschädigung gebracht und der Einfluss der Reibbeanspruchung im Kontakt auf die Beanspruchung in der Zahnfußausrundung geklärt.



The dimensioning of splined shaft-hub connections takes account of fatigue strength and wear plus the blended fretting load. Within this paper a detailed view is given on friction and their impact on fatigue strength in the foot root.

Keywords: Involute splines, fracture, fretting, fatigue, lubrication, notch effect, fillet root

Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die Antriebskomponenten von Automobilen im motorischen und generatorischen Betrieb erfordern die Auswahl geeigneter Fertigungs- und Werkstoffkonzepte zur Steigerung der Leistungsdichte und Ressourceneffizienz.

Für die Übertragung des Drehmoments zu den Antriebsrädern kommen Leichtbauwellen (Hohlwellen) zum Einsatz. Die Drehmomentein- und -ausleitung erfolgt dabei über Passverzahnungen/Zahnwellenverbindungen. Diese Elemente sind im Betrieb statischen sowie zyklischen Torsionsbelastungen ausgesetzt. Die Festigkeitseigenschaften der Passverzahnungen, d. h. der Widerstand gegen statische Überlastbrüche sowie die ertragbare Beanspruchung bei zyklischer Belastung, sind neben der Geometrie von den eingestellten Werkstoffeigenschaften abhängig. Bislang ist jedoch unklar, wie sich beispielsweise eine, für den Verschleißschutz empfehlenswerte Ölschmierung und der dadurch modifizierte Reibungszustand im Flankenkontakt auf die statischen und die zyklischen Festigkeitseigenschaften der Passverzahnungen auswirkt.

Stand der Technik

Die Leichtbauwellen sind im Betrieb einerseits hohen statischen Belastungen ausgesetzt, z. B. durch Misuse-Fälle (Knallstart etc.), und müssen zudem die Funktionsfähigkeit über die geforderte Fahrzeuglebensdauer gewährleisten. Abbildung 1 stellt den Spannungsverlauf der Welle und der Nabe im simulierten Kontakt dar. Es wird deutlich, dass die dem Torsionsmoment entgegen gerichtete Flankenseite der Welle im Zahnfuß große Zugspannungen erfährt. Auf der gegenüberliegenden Flankenseite wirken Druckspannungen. Die Höhe und Verteilung der Spannungen ist von der jeweiligen Verzahnungsgeometrie abhängig. Werden die Passverzahnungen über ihre statische Belastungsgrenze hinaus tordiert, d. h. über die örtlich maximal ertragbare Beanspruchbarkeit des Werkstoffes, kommt es zum Gewaltbruch, der sich je nach Werkstoffverhalten duktil oder spröde ausprägen kann. Der Ort und die Ausprägung des Bruches, an dem die zulässige Beanspruchung überschritten wird, hängen von den über der Bauteildicke ausgeprägten Werkstoffeigenschaften ab. Die Überlastbrüche gehen meist von der Zahnfußausrundung im Bereich des Übergangs zwischen Welle und Nabe und einem einhergehenden Steifigkeitssprung oder dem Verzahnungsauslauf aus /1, 2/.

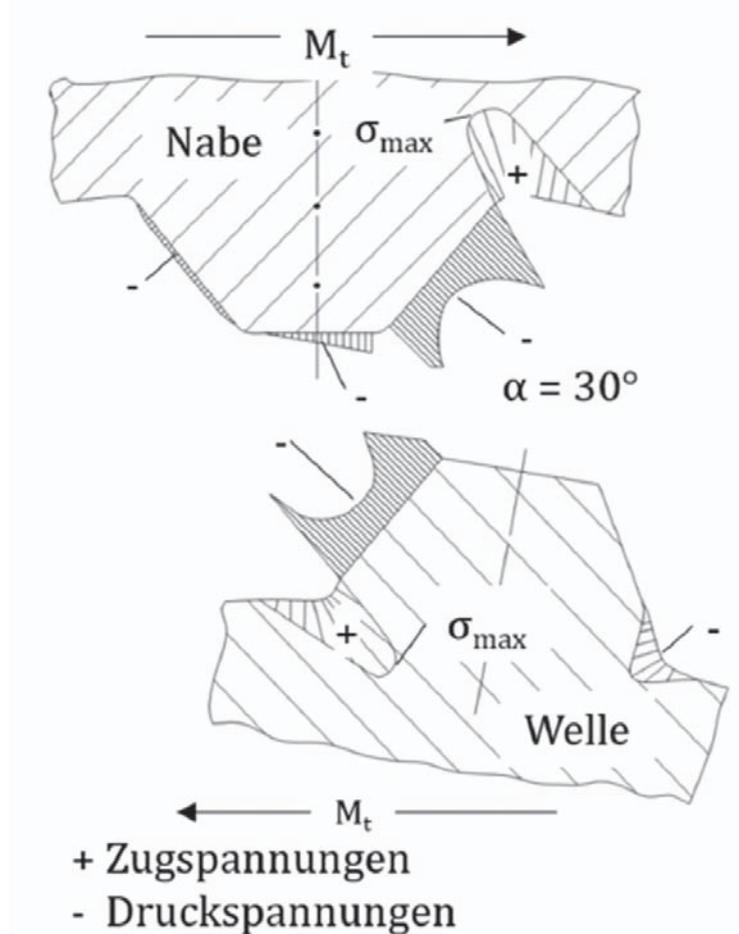


Abbildung 1: Spannungsverteilung über der Wellen- und Nabenkontur (nach /3/)

Bei zyklischer Belastung treten in der formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung Mikrobewegungen zwischen den Zahnflanken der Verbindungspartner auf. Diesen Vorgang bezeichnet man auch als Schwingungsverschleiß oder Reibdauererschleiß. Die geometriebedingten Kerben und der festigkeitsmindernde Einfluss des Schwingungsverschleißes können bei zyklischer Beanspruchung zum Reibdauerbruch (Fretting Fatigue) oder zum spannungsmechanisch hervorgerufenen Ermüdungsbruch führen. Bei flankenzentrierten Passverzahnungen befindet sich der spannungsmechanisch höchst beanspruchte Ort in der Zahnfußausrundung oder im Verzahnungsauslauf. Neben der spannungsmechanisch hervorgerufenen Werkstoffermüdung dieser kritisch beanspruchten Kerbbereiche besteht potenziell die Möglichkeit, dass durch die Reibdauerbeanspruchung im Kontaktbereich der Verbindungspartner ein Reibdauerermüdungsschaden auftritt. Die unterschiedlichen Bruchorte dieser beiden Phänomene sind in Abbildung 2 dargestellt /4/.

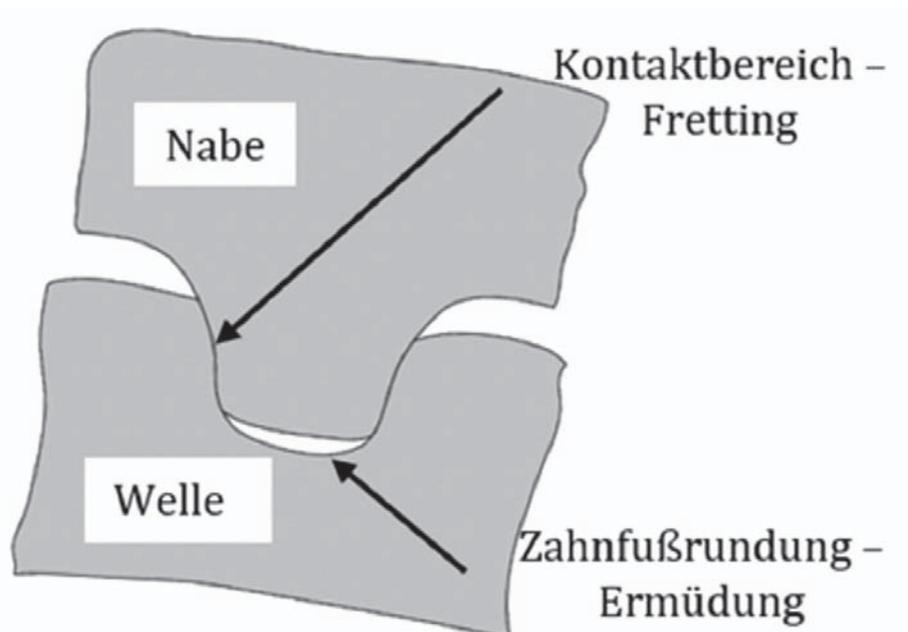


Abbildung 2: Zahnwellenverbindung mit potenziellen Bruchorten (nach /4/)

Beobachtungen zum Einfluss der Reibdauerbeanspruchung auf die Ermüdungseigenschaften von Passverzahnungen macht Chan in /5/. Die Rissausgänge befinden sich auf den Flanken der Verzahnung und der eigentliche Bruchort des Hauptrisses befindet sich am Ende der Passverzahnung im Bereich der Zahnfußausrundung. Chan beschreibt, dass sich auf den Zahnflanken eine raue Oberfläche bildet, die mit den typischen rotbraunen Materialabträgen benetzt war, welche charakteristisch für das Versagen von reibdauerbeanspruchten Stahlteilen sind. Aus den analysierten Phänomenen schloss Chan, dass ein Reibdauerermüdungsversagen vorliegt.

Fragestellung und Vorgehensweise

Hinsichtlich der überlagerten Reibdauerbeanspruchung lassen sich für torsionsbelastete Passverzahnungen u. a. die folgenden Wissenslücken identifizieren:

- Eindeutige Identifizierung der Bruchausgänge in Abhängigkeit von Bruchmechanismen (spannungsmechanische Ermüdung im Bereich freier Oberflächen vs. Reibdauerermüdung in den Kontaktbereichen)
- Einfluss der Reibungsreduktion, z. B. durch eine Ölschmierung, auf die zyklische Festigkeit von axial nicht verschiebbaren Passverzahnungen bei Torsionsbeanspruchung

Diese beiden Fragestellungen wurden neben umfangreichen werkstofflichen Fragestellungen im Rahmen einer Dissertation /6/ am Lehrstuhl für Werkstoffsysteme für den Fahrzeugleichtbau an der Universität Siegen unter der Leitung von Professor Robert Brandt in Kooperation mit dem IMW der TU Clausthal bearbeitet. Die Untersuchungen in /6/ wurden an Hohlwellen durchgeführt, die in Abbildung 3 dargestellt sind.

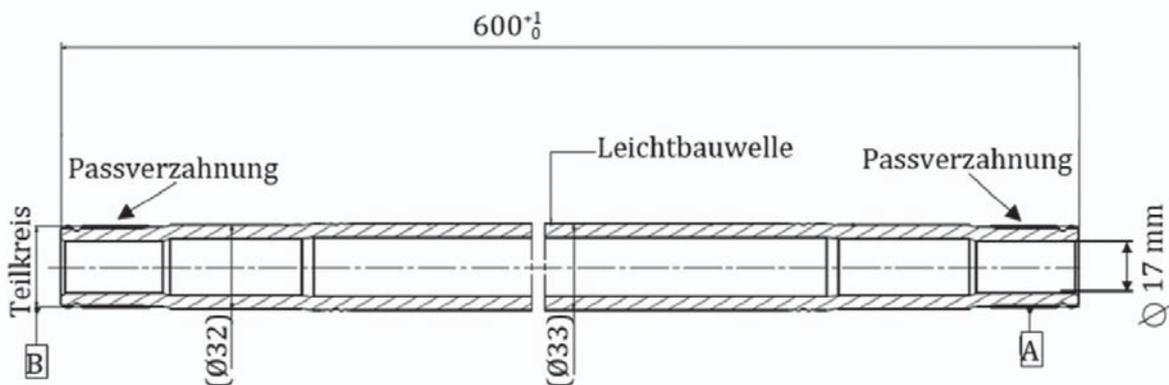


Abbildung 3: Prüfwellen mit Verzahnung ähnlich DIN5480-29x1x28, $\rho_f = 0,48 \times m$

Die ausgewählte Hinterachswelle aus 34MnB5 eignet sich besonders für die Untersuchungen, da sowohl bei statischer wie auch bei zyklischer Belastung die Passverzahnung den höchstbeanspruchten Bereich und damit die Schwachstelle der Leichtbauwelle darstellt. Die Verzahnung wurde dabei mit den nach /7/ günstigen Geometrieparametern einer Zähnezahl von circa $z = 30$ und einem Fußrundungsradius von $\rho_f = 0,48 \times m$ gefertigt.

Experimentelle Ergebnisse

In Abbildung 4 sind die zyklischen Festigkeiten von Wellen mit identischer Wärmebehandlung (**O**fenhärtung in **N**eutraler Atmosphäre mit 0,34% C und einer Haltezeit **H1**, anschließend 2h angelassen bei einer Temperatur **A1**) dargestellt. Der Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen ist lediglich die zyklische Torsionsbelastung mit oder ohne Ölbadtauchschmierung. Allein durch die Ölschmierung ($\mu\text{Ö}$) kann die zyklische Festigkeit um rund 56 % gesteigert werden /6/. Der positive Einfluss der Ölschmierung auf das Verschleißverhalten sei hier nur am Rande erwähnt.

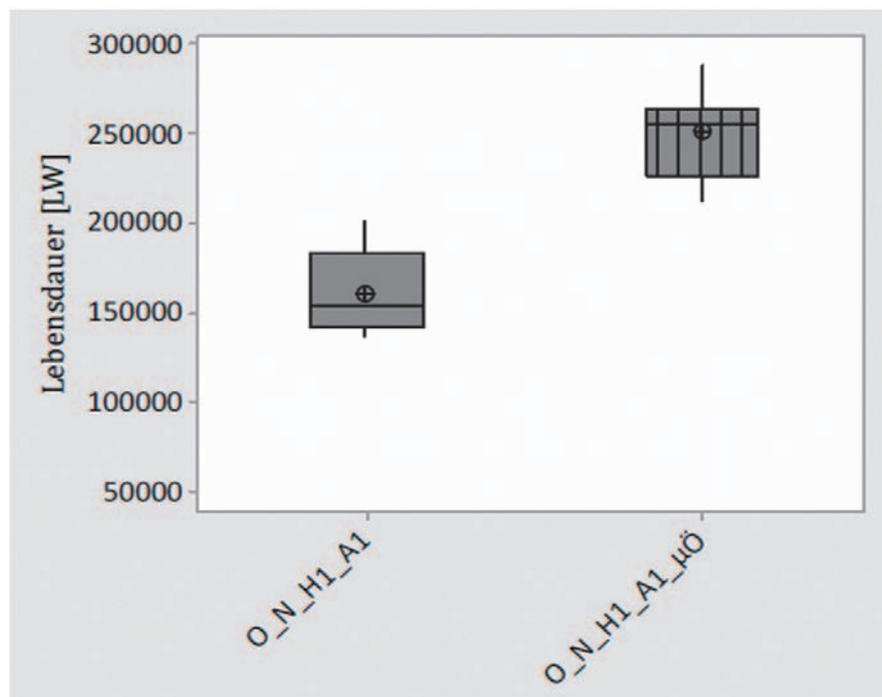


Abbildung 4: Zyklische Lebensdauer ($M_t = 1300 \text{ Nm}$, $R = -1$) der Leichtbauwellen der Versuchsreihe O_N_H1_A1 ohne, sowie der Reihe O_N_H1_A1_μÖ mit Ölschmierung)

Die Position des Bruchausgangs lag für die ungeschmierte und die ölgeschmierte Variante aus Abbildung 4 jeweils in der Zahnfußausrundung. Dies ist in Abbildung 5 anhand einer weiteren ungeschmierten Variante (E = einsetzgehärtet, $H3 > H1$, $A2 > A1$) nochmals im Detail dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass der Bruchausgang kurz unterhalb des Kontaktbereiches in der Zahnfußausrundung liegt. Die räumliche Trennung der Reibdauerbeanspruchung auf der Flanke und der spannungsmechanische Ermüdungsschaden in der Zahnfußausrundung werden deutlich. Zeichen, die auf eine Korrosionsermüdung hinweisen sind nicht zu erkennen.

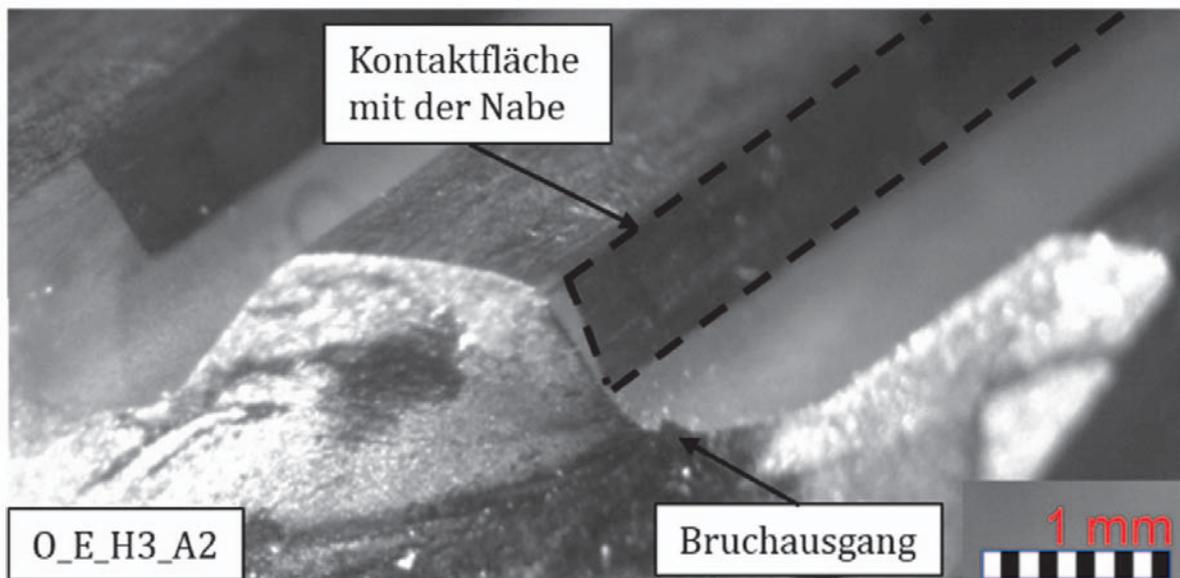


Abbildung 5: Bruchbild einer Welle der Versuchsreihe O_E_H3_A2

Numerische Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass eine Ölschmierung die zyklische Festigkeit der Passverzahnung erhöht, obwohl die Bruchausgänge im kontaktfreien Bereich liegen. Die FE-Untersuchungen zum Einfluss der Reibung auf die Zahnfußtragfähigkeit dienen somit der Überprüfung, inwiefern eine Veränderung der Reibungsbedingungen in der Verbindung zu einer Veränderung der Beanspruchungsausprägung im Fuß der Passverzahnung und damit zur Steigerung der zyklischen Festigkeit führt. Dazu wird ein Teilmodell eines Zahns mit zyklischer Symmetrie und Krafteinleitung über die Nabenumfangsfläche aufgebaut, Abbildung 6.

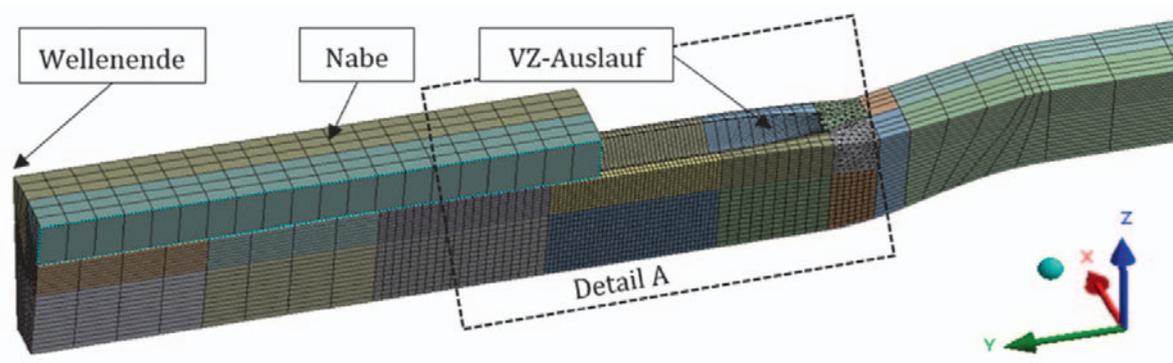


Abbildung 6: Modellaufbau der aufgebauten Passverzahnung

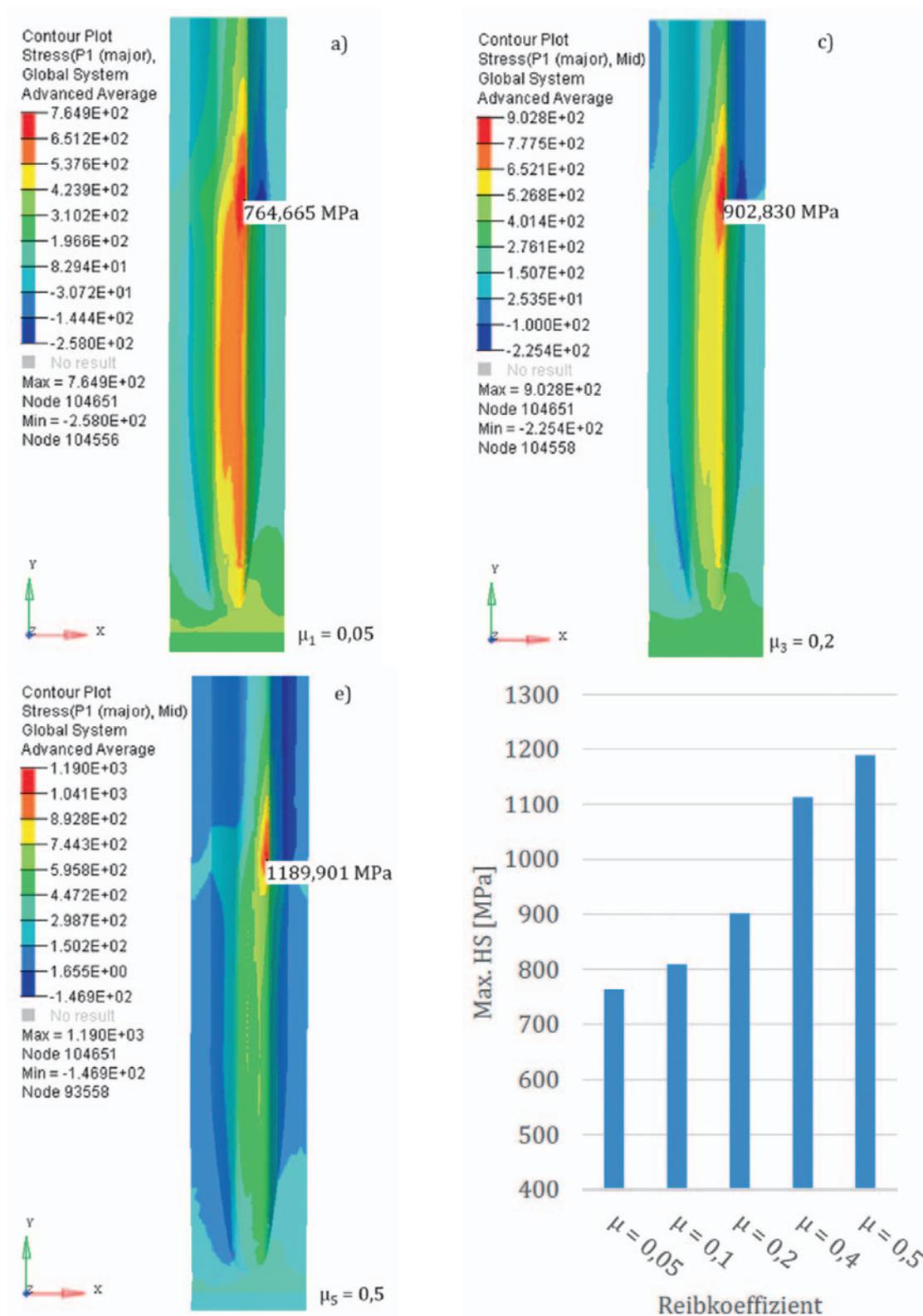


Abbildung 7: Maximale Hauptspannungen bei einem Torsionsmoment von $M_t = 1300 \text{ Nm}$, ($R=-1$) in Abhängigkeit vom Reibkoeffizienten μ (a: $\mu_1= 0,05$; b: $\mu_2= 0,1$; c: $\mu_3= 0,2$; d: $\mu_4= 0,4$; e: $\mu_5= 0,5$)

Für die Berechnungen werden die Reibkoeffizienten $\mu_1 = 0,05$, $\mu_2 = 0,1$, $\mu_3 = 0,2$, $\mu_4 = 0,4$ und $\mu_5 = 0,5$ angewendet. In Abbildung 7 sind die Verteilungen der maximalen Hauptspannungen in Abhängigkeit von den Reibkoeffizienten bei einem Drehmoment von $M_t = 1300$ Nm dargestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass mit steigendem Reibkoeffizienten μ zwischen den Kontaktpartnern die maximalen Hauptspannungen im Zahnfuß steigen. So kommt es durch die Erhöhung von $\mu_1 = 0,05$ auf $\mu_5 = 0,5$ zu einer Steigerung der maximalen Hauptspannungen von $\sigma_1 = 764,665$ MPa, auf $\sigma_1 = 1189,901$ MPa, und damit um rund 56 %. Die Lebensdauer-steigerung zwischen der Variante O_N_H1_A1 und der mit Öl geschmierten Variante O_N_H1_A1_μÖ kann damit auf eine Reduktion der maximalen Hauptspannungen aufgrund der Reibungsreduktion zwischen den Flanken zurückgeführt werden /6/.

Zusammenfassung

Bei den zyklischen Schwingversuchen konnten ausschließlich Ermüdungsrisse im kontaktfreien Bereich detektiert werden. Reibdauerermüdungsschäden können somit ausgeschlossen werden. Zudem wird durch die Variation des Reibkoeffizienten im Kontaktbereich nachgewiesen, dass sich die Reibung im Kontaktbereich proportional auf die Spannungen in der kontaktfreien Zahnfußausrundung auswirkt.

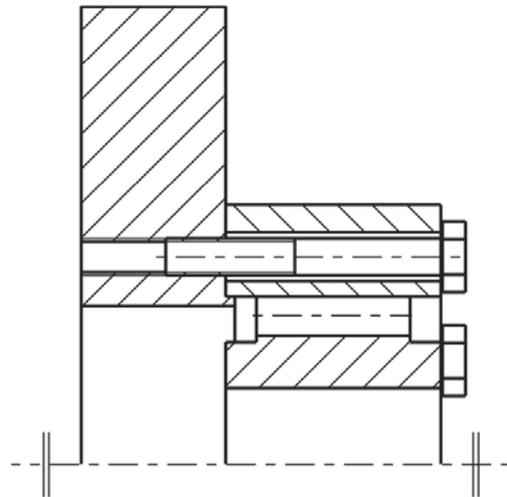
Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, Büttelborn, 1978
- /2/ Daryusi, A., Lau, P., Schlecht, B., Lohrengel, A.: Ermittlung der Kerbwirkung bei Profilverzahnungen für die praktische Getrieberechnung von Zahnwellen. Forschungsvorhaben Nr. 467 I. Abschlussbericht, Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA), AiF-Forschungsberichte, Teil 905, 2009
- /3/ Schöpf, H.-J.: Festigkeitsuntersuchung an Zahnwellen-Verbindungen mit Spannungsoptik und Dauerschwingversuchen. Dissertation, München, 1976
- /4/ Vidner, J.: Methode zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von reibdauerbeanspruchten Systemen, Springer Vieweg, Stuttgart, 2016
- /5/ Chan, P., Thornley, J.: Common features of fretting-fatigue cracking in steels. Practical Failure Analysis 2 2002, 2002, 85–90
- /6/ Springorum, J. F.: Werkstoffmechanische Einflussfaktoren auf die Zahnfußtragfähigkeit von Passverzahnungen auf Hohlwellen, Dissertation, Universität Siegen, 2019, ISSN 2700-7529
- /7/ Schäfer, G.: Zahnwelle 3.0, Institutsmitteilung Nr. 44, Seite 29 – 32, IMW TU-Clausthal, 2019, ISSN 0947-2274

Untersuchungen am stirnseitig verschraubten Freilauf

Klügel, N.; Lohrengel, A.

Industriell genutzte Freiläufe erfordern hohe Radialkräfte im Klemmkontakt zur sicheren Übertragung des Torsionsmoments. Diese Radialkräfte bewirken eine Beeinträchtigung der Übertragungsfähigkeit der Schraubenverbindung zwischen Freilaufaußenring und Flansch. Die Einflussfaktoren auf die Übertragungsfähigkeit der stirnseitigen Befestigung wurden in einem Forschungsvorhaben experimentell und simulativ untersucht.



Industrially used freewheel clutches require high radial forces in the clamping contact for reliable torque transmission. These radial forces reduce the transmittable torque of the bolted connection between the outer ring of the freewheel clutch and the flange. The factors influencing the transmission capability of the connection between outer ring and flange were investigated experimentally and by simulation in a research project.

Der stirnseitig verschraubte Freilauf

Freiläufe werden den richtungsabhängig schaltenden Kupplungen zugeordnet. Aufgrund ihrer richtungsabhängige Leistungsübertragung werden Freiläufe unter anderem als Rücklaufsperre oder Überholkupplung eingesetzt. Im industriellen Umfeld werden zumeist Klemmrollen- und Klemmstückfreiläufe verwendet, welche das Torsionsmoment in Sperrrichtung reibschlüssig durch Verkleben der Klemmelemente zwischen Innen- und Außenring übertragen. Um ein Verkleben des Freilaufs in Sperrrichtung zu gewährleisten, muss eine hohe Normalkraft in radiale Richtung aufgebaut werden. Als beschreibende Größe dient hierbei der Klemmwinkel α_K , der entsprechend Formel (1) das Verhältnis der Tangentialkraft F_T zur Klemmnormalkraft F_{NK} am Klemmkontakt zwischen Klemmelement und Außen- bzw. Innenring beschreibt.

$$\tan(\alpha_K) = \frac{F_T}{F_{NK}} < \mu \quad (1)$$

Der Klemmwinkel wird durch die geometrische Gestaltung der Klemmkörper bzw. des Innensterns im Klemmrollenfreilauf bestimmt. Zur Verschleißminderung sowie

der Verringerung des Schleppmoments im Leerlaufbetrieb werden die Freiläufe geschmiert, sodass der zulässige Klemmwinkel entsprechend klein ist.

Für die Anbindung des Freilaufs an die kundenseitige Anschlusskonstruktion (Flansch) existieren verschiedene Möglichkeiten. Eine gängige Variante ist die kraftschlüssige Verbindung mittels einer stirnseitigen Mehrschraubenverbindung. Das theoretisch übertragbare Torsionsmoment der Mehrschraubenverbindung kann nach Blatt 2 der VDI-Richtlinie 2230 berechnet werden. Querbelastete Schraubenverbindungen, wie eine torsionsbelastete Flanschverbindung, werden hierbei als gleitfeste Verbindung ausgelegt /1, 2/. Die aus dem Torsionsmoment resultierenden Querkräfte sind dementsprechend alleine durch die Haftreibung in der Trennfuge zu übertragen. Für kreisförmige Flanschverbindungen unter Torsionsbelastung kann entsprechend der VDI 2230 von einer gleichmäßigen Lastverteilung ausgegangen werden, sodass das theoretisch übertragbare Torsionsmoment entsprechend Gleichung (2) berechnet werden kann.

$$T_{Theo} = \mu_T \cdot \frac{d_T}{2} \cdot z_S \cdot F_V \quad (2)$$

Das übertragbare Torsionsmoment wird aus der übertragbaren Querkraft am Teilkreisdurchmesser d_T berechnet, welche sich aus der vorliegenden Vorspannkraft F_V , der Anzahl Schrauben z_S sowie dem Haftreibwert μ_T in der Trennfuge zwischen Freilaufaußenring und Flansch berechnet. Da die Schraubenverbindung rein auf Querkraft belastet wird, ergibt sich die Vorspannkraft F_V aus der Montagevorspannkraft F_M abzüglich der Setzkraftverluste F_z .

In der industriellen Anwendung wurde jedoch beobachtet, dass es trotz korrekter Auslegung der Verbindung zu einem Rutschen in der Trennfuge von Außenring und Flansch kommt. Der Freilaufaußenring wandert hierbei in Belastungsrichtung, bis die Schrauben in der Durchgangsbohrung anliegen. Erstmalig untersucht wurde das Phänomen im vorhergehenden Forschungsprojekt FVA 704 /3/, eine Erweiterung des Modells stellt die Dissertation von Hofmann dar /4/. Es wurde festgestellt, dass die hohen Klemmnormalkräfte im Betrieb eine Aufweitung des Außenrings bewirken. Durch die gleitfeste Schraubenverbindung von Außenring und Flansch ist die freie Aufweitung des Außenrings an dieser Stelle behindert, sodass eine zusätzliche radiale Kraftkomponente ΔF_R in der Trennfuge wirkt. Abbildung 1 zeigt die wirkenden Kräfte am stirnseitig verschraubten Außenring. Wird der Reibkegel am Teilkreisdurchmesser d_T der Verschraubung betrachtet, so ist die übertragbare Tangentialkraft F_T aufgrund der normal hierzu wirkenden Kraft ΔF_R gegenüber der theoretisch übertragbaren Tangentialkraft $F_{T,Theo}$ vermindert. Werden die am Außenringinnendurchmesser wirkenden Klemmkräfte auf den Teilkreisdurchmesser bezogen, ergibt sich für das übertragbare Torsionsmoment unter Beachtung der zusätzlichen Radialkraft ΔF_R der in Formel (3) beschriebene Ausdruck. Das übertragbare Moment lässt sich als Produkt des theoretisch übertragbaren Moments T_{Theo} und der relativen Übertragbarkeit β_R beschreiben /3/.

$$T = \mu_T \cdot \frac{d_t}{2} \cdot z_s \cdot F_V \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \left[\frac{1}{\tan(\alpha_K)} \cdot \frac{d_T}{d_{AR}} \cdot \frac{\Delta F_R}{F_{NK}} \right]^2}} = T_{Theo} \cdot \beta_R \quad (3)$$

Die relative Übertragbarkeit wird durch den Wurzelausdruck in Formel (3) beschrieben, sie nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Neben dem Klemmwinkel α_K und dem Verhältnis von Teilkreis- zu Außenringinnendurchmesser d_{AR} geht die radiale Reaktionskraft in der Trennfuge ΔF_R in Form des Kräfteverhältnisses $\Delta F_R/F_{NK}$ ein. Da die Reaktionskraft maximal die Höhe der Klemmnormalkraft annehmen kann, gilt:

$$0 \leq \frac{\Delta F_R}{F_{NK}} \leq 1 \quad (4)$$

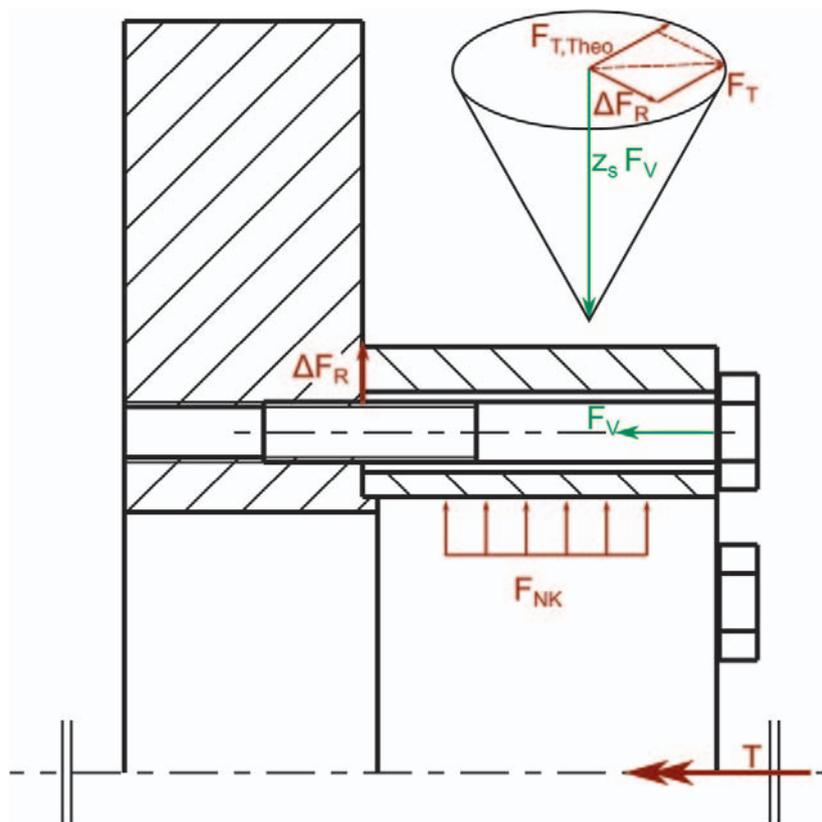


Abbildung 1: Kraftverhältnisse an der stirnseitig verschraubten Außenring-Flanschverbindung und der sich ergebende Reibkegel am Teilkreis

Da der Klemmwinkel und das Verhältnis der Durchmesser d_T/d_{AR} durch die konstruktiven Randbedingungen nur in geringem Maße verändert werden können, stellt das Kräfteverhältnis $\Delta F_R/F_{NK}$ den wesentlichen Einflussfaktor auf die relative Übertragbarkeit dar. Zur Erhöhung der relativen Übertragbarkeit ist ein möglichst

geringes Kräfteverhältnis erforderlich, konstruktiv lässt sich dies durch eine Anpassung der Steifigkeiten von Flansch und Außenring realisieren. Im kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhaben FVA 704-II /5/ wurden das Phänomen mit dem Ziel der besseren Beschreibbarkeit eingehender untersucht. Insbesondere das Verhalten bei einer dynamischen Torsionsbelastung sollte untersucht werden. Hierfür wurden experimentelle und simulative Untersuchungen an einem Klemmrollen- (KR) und einem Klemmkörperfreilauf (KK) mit vergleichbaren Abmessungen durchgeführt. Die verwendeten Prüflinge sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: untersuchte Prüflinge

Parameter	Modell 1	Modell 2
Freilauf Typ	KR	KK
Nennmoment T_N in Nm	500	560
Außenring		
Außendurchmesser D_{AR} in mm	100	105
Innendurchmesser d_{AR} in mm	75	75
Breite des Außenrings b_{AR} in mm	44	35
Breite Klemmelemente b_K in mm	25	15
Verschraubung		
Anzahl Schrauben z_S	6	6
Teilkreisdurchmesser d_T in mm	87	90
Schraubengröße	M6	M6
Übertragbares Moment bei $F_V = 6,8$ kN und $\mu_T = 0,2$ nach VDI 2230 /1/ in Nm	355	367

Numerische Untersuchungen

Das Verhalten der belasteten Freiläufe wurde numerisch mithilfe der Software Ansys Workbench (Versionen 2020 R2 & 2022 R1) untersucht. Die Schrauben wurden hierbei vereinfacht durch Zylinder mit dem Nenndurchmesser modelliert. Da die Schrauben keine Betriebskräfte aufnehmen und keine Setzeffekte betrachtet werden, ist diese Vereinfachung gegenüber der Modellklasse 3 nach VDI 2230-2 /2/ zulässig. Die aufgebrachte Schraubenvorspannkraft F_V beträgt 6,8 kN, welche in den experimentellen Untersuchungen ebenfalls aufgebracht wird. Die verwendete Vorspannkraft ist im Vergleich zu den in der VDI 2230-1 empfohlenen Werten verringert /1/, um das Verhalten im Versuch bei niedrigeren Torsionsmomenten zu provozieren und um eine überelastische Belastung der verwendeten Messchrauben zu vermeiden. Abbildung 2 zeigt das vereinfachte Modell, welches für die simulativen Untersuchungen genutzt wurde, mit den aufgebrachten Randbedingungen.

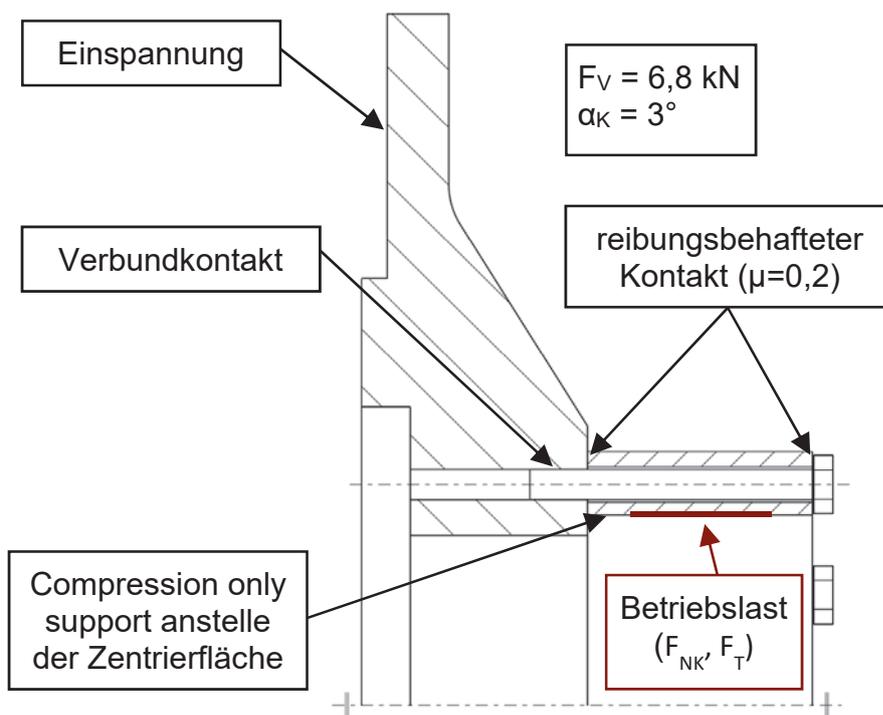


Abbildung 2: Geometrie der Außenring-Flansch-Verbindung (Modell 1) sowie Randbedingungen

Mit der verwendeten Vorspannkraft ergeben sich, unter Annahme des in den simulativen Untersuchungen verwendeten Reibwertes μ_T in der Trennfuge von Außenring und Flansch von 0,2, nach VDI 2230 die in Tabelle 1 aufgeführten theoretisch übertragbaren Torsionsmomente. Abbildung 3 zeigt die Druckverteilung nach dem Aufbringen der Schraubenvorspannkraft an einem Freilauf Modell 1.

Aufgrund der ungleichmäßigen Belastung durch die Verschraubung zeigt sich eine deutliche Abweichung zu der mittleren Flächenpressung von 12,7 MPa in der Trennfuge. Im Bereich der Druckkegel ist ein starker Anstieg der Flächenpressung zu beobachten. Die maximalen Spannungen an den Rändern der Durchgangsbohrungen zeigen aufgrund des Steifigkeitssprungs ein singuläres Verhalten, im radialen Abstand von 0,5 mm zum Rand der Durchgangsbohrung stellt sich netzunabhängig eine Flächenpressung von etwa 45 MPa ein. Außerhalb der Einflusszonen der Druckkegel sinkt die Flächenpressung auf bis zu 7,1 MPa ab.

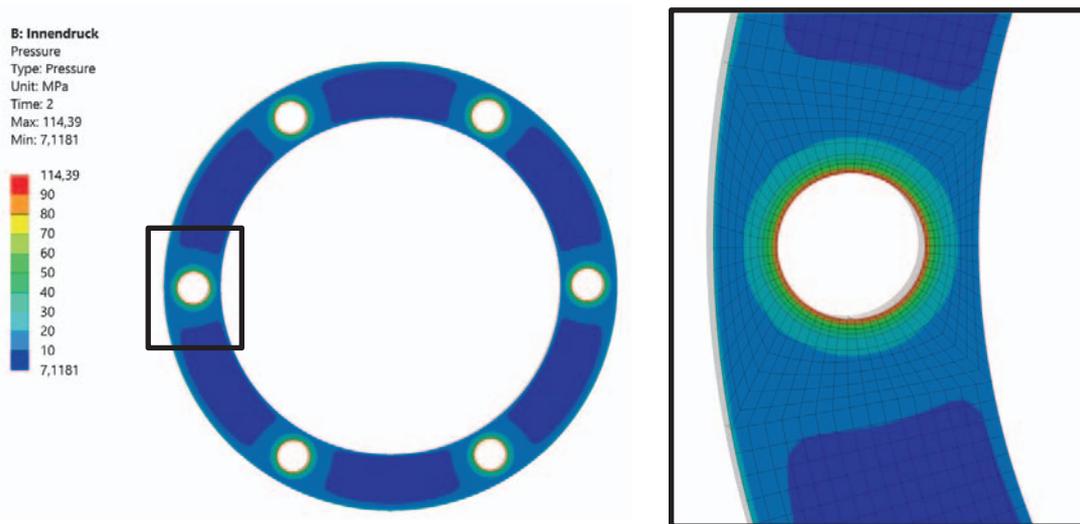


Abbildung 3: Druckverteilung in der Trennfuge nach dem Aufbringen der Schraubenvorspannkraft (Modell 1)

Der Einfluss der Klemmnormalkräfte auf die Pressungsverteilung in der Trennfläche zwischen Außenring und Flansch ist in Abbildung 4 für ein anliegendes Torsionsmoment von 100 Nm dargestellt. Die aus dem Verkleben der Klemmrollen resultierende Last am Außenringinnendurchmesser wurde als Linienlast über die Breite der Klemmrollen auf die Knoten am Außenringinnendurchmesser aufgegeben. Während es bei einem reinen Torsionsmoment zu keiner deutlichen Veränderung der Druckverteilung in der Trennfuge kommt, bewirken die hohen Normalkräfte im Freilauf eine Verlagerung des Bereichs hoher Flächenpressungen nach außen. Bei höheren Lasten sinkt die Flächenpressung am Innenrand auf 0 MPa ab; die Verbindung beginnt an dieser Stelle zu klaffen.

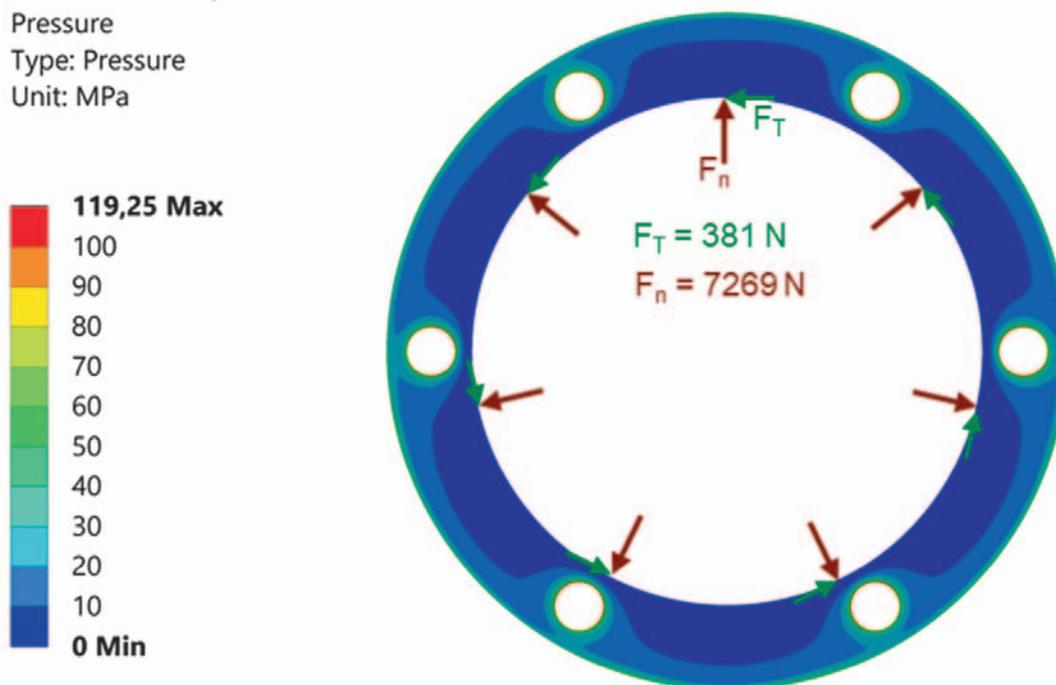


Abbildung 4: Verteilung der Flächenpressung im Kontakt zwischen Freilaufaußenring und Flansch bei einem aufgetragenen Torsionsmoment von 100 Nm (Modell 1)

Abbildung 5 zeigt das Tragverhalten in Form des Kontaktstatus in der Trennfuge zwischen Freilaufaußenring und Flansch im Vergleich zu einer reinen Torsionsbelastung von 100 Nm. Als Haftbedingung gilt hierbei, dass die lokale Schubspannung im Kontakt unterhalb der zulässigen Schubspannung des Columbschen Reibungsgesetz liegt /6/. Die zusätzlichen Radialkräfte bewirken in der Trennfuge eine deutliche Verkleinerung der haftenden Bereiche, obwohl das anliegende Torsionsmoment nur 28 % des nach Formel (2) theoretisch übertragbaren Moments beträgt. Während sich die haftenden Bereiche in der Trennfuge auf die Bereiche der Schraubendruckkegel reduziert hat, liegen im Kontakt der rein torsionsbelasteten Flanschverbindung großflächig Haftbereiche vor. Die Normalkraftkomponente aus der reibschlüssigen Übertragung des Drehmoments im Freilauf verringert demnach die Übertragungsfähigkeit der Mehrschraubenverbindung von Außenring und Flansch. Zudem lässt sich eine gewisse Ungleichmäßigkeit im Tragbild durch den Stellungseinfluss der Klemmrollen erkennen, ein Lastangriff durch die Klemmrolle zwischen den Durchgangsbohrungen führt zu einer größeren Abnahme der haftenden Bereiche. Der Unterschied zu einer gleichmäßigen radialen Aufweitung ist jedoch vergleichsweise gering, insbesondere das Moment, welches den Übergang zu einem rein gleitenden Kontakt markiert, wird nur geringfügig beeinflusst.

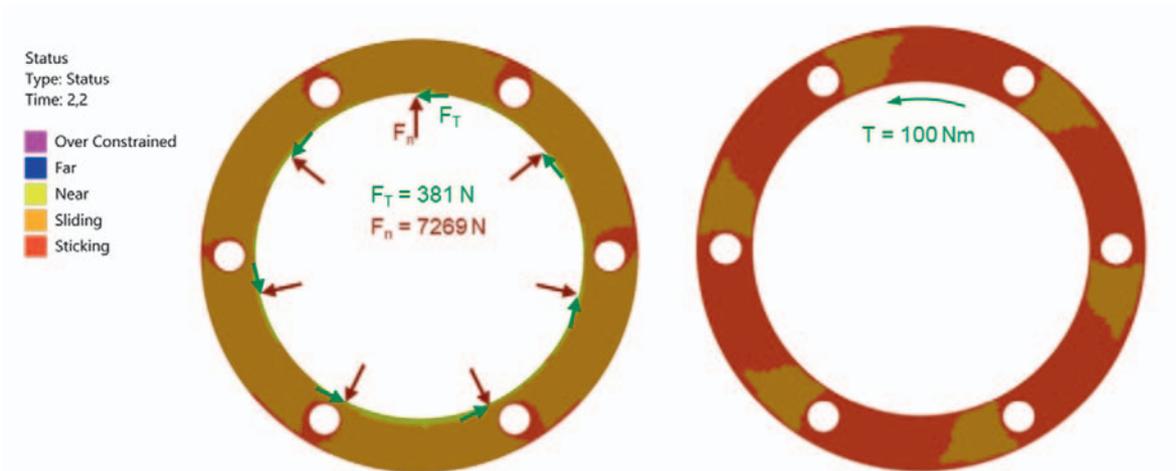


Abbildung 5: Vergleich des Kontaktstatus des untersuchten Freilaufs (Modell 1) bei einem anliegenden Moment von 100 Nm mit einer reinen Torsionsbelastung

Das nach Formel (2) bestimmte theoretisch übertragbare Drehmoment zeigt eine gute Übereinstimmung des Übergangs von einem partiell haftenden zu einem rein gleitenden Kontakt in der Trennfuge bei reiner Torsionsbelastung.

Für die Bestimmung des übertragbaren Drehmoments nach Formel (3) ist die Bestimmung des Kräfteverhältnis $\Delta F_R/F_{NK}$ erforderlich. Hierzu kann eine reine radiale Belastung aufgegeben werden und die radiale Reaktionskraft im Kontakt von Außenring und Flansch ausgewertet werden. Eine Untersuchung an einem rotationssymmetrischen Modell ohne Durchgangsbohrung zeigt zudem, dass hierfür die Nutzung eines Verbundkontaktes zu empfehlen ist, da die Reaktionskraft im reibungsbehafteten Kontakt erst bei sehr feiner Netzauflösung gegen das Ergebnis bei Nutzung des Verbundkontaktes konvergiert. Das mithilfe der relativen Übertragbarkeit bestimmte Drehmoment zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Übergang zum rein gleitenden Kontakt bei Aufbringen der freilauftypischen Belastung. Zudem zeigt auch die in /4/ vorgeschlagene Nutzung eines rotations-symmetrischen Modells unter Vernachlässigung der Verschraubung eine sehr gute Übereinstimmung. Der Einfluss verschiedener Flanschsteifigkeiten wird durch die Nutzung des zweidimensionalen Modells ebenfalls gut durch den Einfluss auf das Kräfteverhältnis wiedergegeben. Die Vorhersage des übertragbaren Drehmoments ist damit mit vergleichsweise kleinem Berechnungsaufwand möglich.

Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden an vier verschiedenen Prüflingstypen durchgeführt. Neben den in Tabelle 1 beschriebenen Freiläufen wurden zusätzlich Dummyfreiläufe untersucht. Diese entsprechen in ihren geometrischen Abmessungen und der Kontaktflächenfeingeometrie den untersuchten Freiläufen,

der Einfluss der Radialkraft entfällt bei ihnen jedoch. Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der verwendeten Prüflinge.

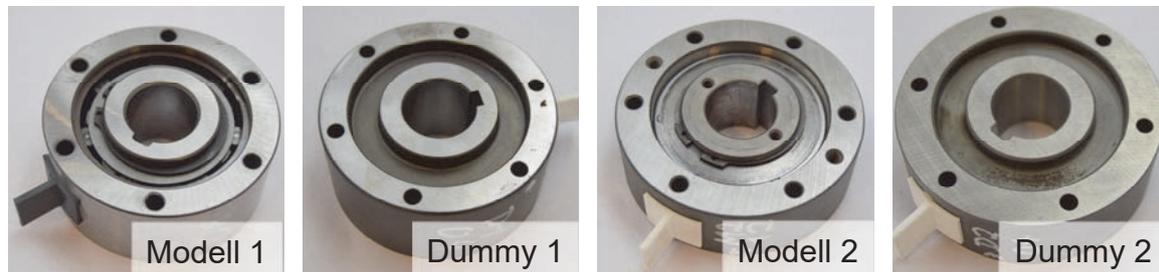


Abbildung 6: untersuchte Prüflinge

Der verwendete Prüfstand ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Drehmoment wird mithilfe eines Hebelarms über einen Hydraulikzylinder aufgebracht und mithilfe von auf der Antriebswelle applizierten DMS erfasst. Dies ermöglicht die Durchführung kraft geregelter dynamischer Versuche. Die Verdrehung des Außenrings wird mithilfe eines Lasertriangulationssensors erfasst. Um eine wechselbare Flanschoberfläche zu schaffen, ist zwischen Außenring und Flansch eine Zwischenscheibe angebracht, welche über drei zusätzliche Schrauben am Flansch befestigt wird. Die zusätzliche Aufzeichnung der Bewegung der Zwischenscheibe hat ergeben, dass sich sämtliche Rutschvorgänge auf den Kontakt von Zwischenscheibe und Außenring beschränken, sodass die Zwischenscheibe dem Flansch zugerechnet werden kann. Zudem haben die simulativen Untersuchungen ergeben, dass durch die Verwendung der Scheiben eine vergleichbare relative Übertragbarkeit zu erwarten ist. Um den Einfluss des Anziehverfahrens auszuschließen, werden die Schraubenvorspannkraften direkt erfasst. Verwendet wird hierzu ein System der Firma Intellifast, welches die Schraubenvorspannkraft mittels der Signallaufzeit misst [6]. Die Versuche werden an zwei verschiedenen Flanschen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Kraftverhältnisse zu untersuchen. Aufgrund der verwendeten Zwischenscheibe konnte die Geometrie nur eingeschränkt optimiert werden, da hierfür eine Anpassung der Außendurchmesser von Freilauf und Flansch erforderlich ist. Durch die sich ergebenden ähnlichen relativen Übertragbarkeiten der zwei Freilauf-Flansch Kombinationen, können aus dem Vergleich der Flanschvarianten wichtige Erkenntnisse zur Streuung der Ergebnisse gewonnen werden.

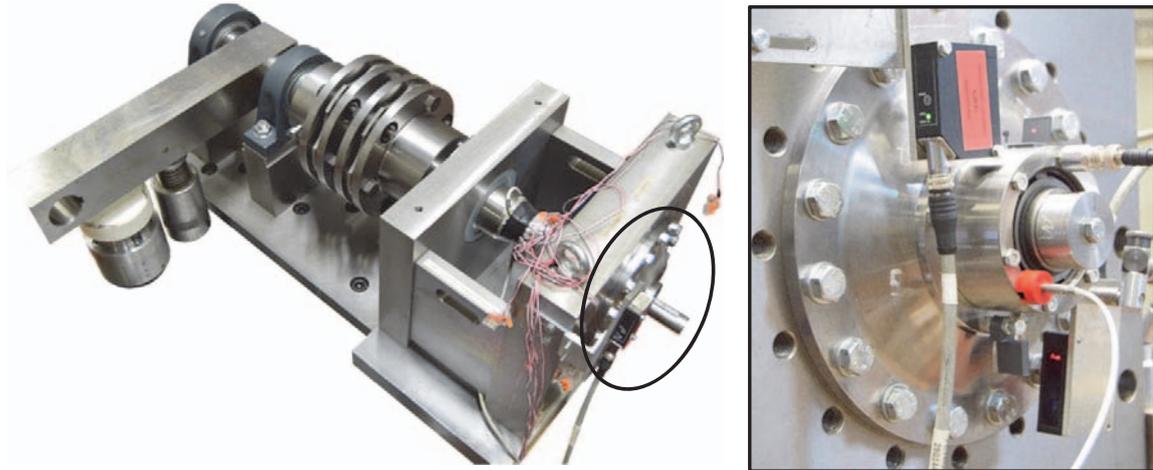


Abbildung 7: Freilaufprüfstand /8/

Neben quasistatischen Versuchen, bei denen der Hydraulikzylinder mit konstanter Geschwindigkeit ausgefahren wurde, lag der Fokus des Versuchsprogramms auf dynamischen Versuchen. Der Prüfling wird hierbei mit einem schwellegenden Drehmoment belastet, siehe Abbildung 8. Das Maximalmoment wird in den Versuchen stufenweise erhöht, für die Auswertung wird jeweils der Verdrehwinkel des Außenrings im unbelasteten Zustand nach dem Beenden einer Laststufe herangezogen.

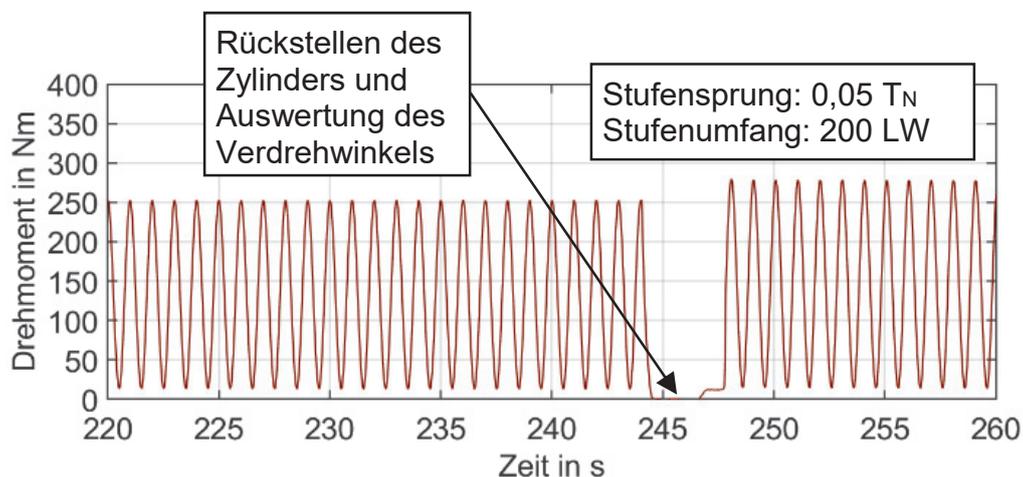


Abbildung 8: dynamischer Versuchsablauf

Die Versuchsauswertung erfolgt in Form des Verdrehwinkels nach der jeweiligen Laststufe. Abbildung 9 zeigt den Vergleich zwischen einem Versuch am Freilauf Modell 1 und einem Dummy 1. Das Rutschverhalten der beiden Prüflinge weist deutliche Unterschiede auf und ist repräsentativ für alle durchgeführten dynamischen Versuche. Während der Dummyfreilauf zu Beginn einer Laststufe

innerhalb weniger Lastwechsel abrutscht, wandert der Außenring des Freilaufs über mehrere Laststufen gleichmäßig in Umfangsrichtung, als Ursache werden Mikroschlupfvorgänge vermutet.

Die simulativen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Haftbedingung in der Trennfuge der Freilauf-Flansch-Verbindung gegenüber den Dummyfreiläufen bei einem deutlich geringeren Drehmoment aufgehoben ist. Allerdings zeigte eine Betrachtung der Verschiebung an der Außenkante des Freilaufaußenrings an der Kontaktseite zum Flansch, dass bei Überschreiten der Haftbedingung zunächst nur eine Bewegung im Bereich einiger μm in Umfangsrichtung erfolgt und von einer radialen Aufweitung des Außenrings an dieser Stelle begleitet ist. Dies könnte bei dynamischer Beanspruchung zu dem beobachteten Außenringwandern führen.

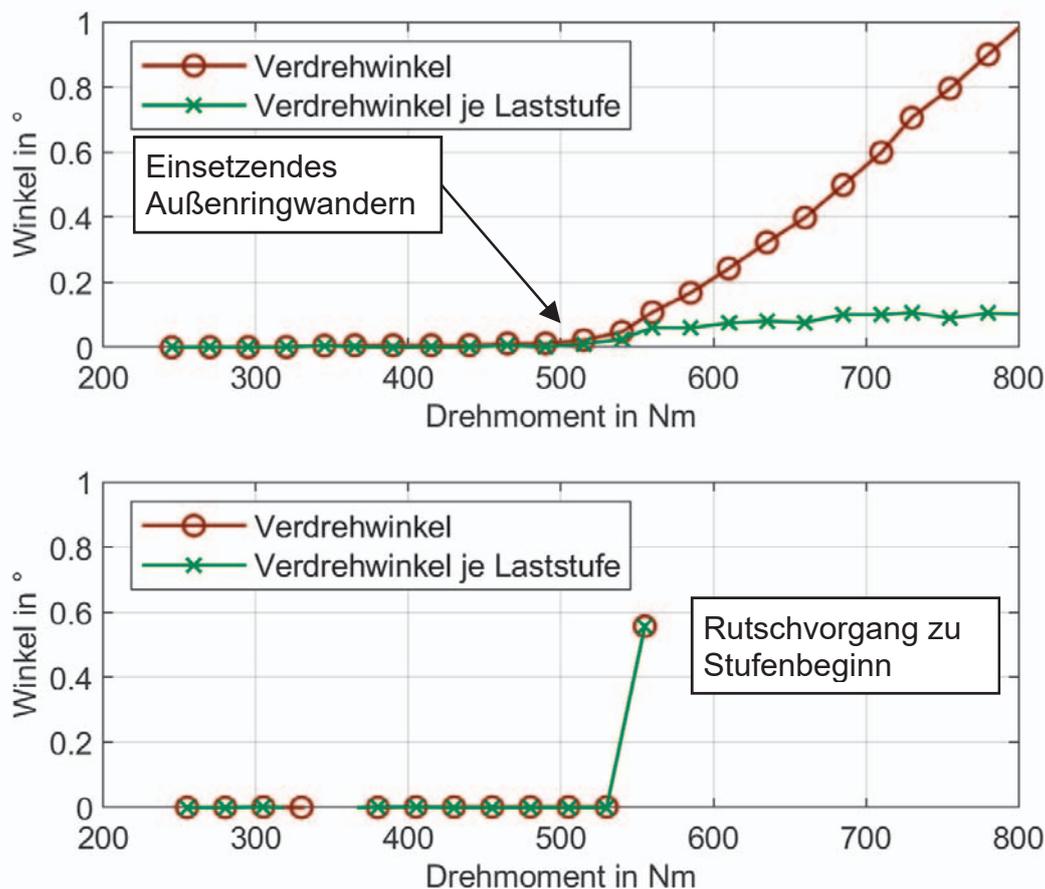


Abbildung 9: Vergleich des dynamischen Rutschverhaltens des Freilaufs Modell 1 (oben) sowie des Dummyfreilaufs 1 (unten)

Die ausgewerteten dynamischen und statischen Rutschversuche sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 zusammengefasst. Abgebildet ist jeweils der arithmetische Mittelwert der Versuchsreihe (bestehend aus 3 bis 15 Einzelversuchen) und das 90 % Konfidenzintervall der Mittelwertschätzung. Für die dynamischen Versuche am Flansch B sowie mit dem Dummy 2 am Flansch A liegen nur 3 Einzelversuche vor,

weshalb die Konfidenzintervalle entsprechend breit ausfallen. Es zeigt sich ein vergleichbares statisches Rutschmoment der Freiläufe und Dummyfreiläufe, lediglich die Versuchsreihe mit dem Dummy 1 an der zweiten Flanschvariante zeigt ein niedrigeres Rutschmoment. Insbesondere der schwankende Reibwert in der Trennfuge erschwert die Auswertung der Versuchsergebnisse. Eine Untersuchung des Reibwertes der Freilaufaußenringe unter Querbelastung ergab eine deutliche Streuung der Reibwerte der einzelnen Prüflinge.

Beim Vergleich der statischen und dynamischen Versuche lässt sich dennoch ein Trend ausmachen. Die dynamische Belastung bewirkt eine Verringerung des übertragbaren Torsionsmoments, wobei sich vor allem am Freilauf Modell 2 ein deutlicher Einfluss zeigt. Der Einfluss am Freilauf Modell 1 ist am Flansch A nur schwach ausgeprägt, während aufgrund der geringen Anzahl von dynamischen Versuchen am Flansch B (3) kein signifikanter Unterschied ausgemacht werden kann. Der Einfluss des freilaufspezifischen Effektes liegt zudem unterhalb des theoretisch ermittelten Wertes. Auf Basis von 2D-FEM Simulationen wurde für die beiden Modelle eine relative Übertragbarkeit von ca. 0,3 für die beiden Flanschvarianten des Modell 1 sowie 0,2 für die beiden Flanschvarianten von Modell 2 vorhergesagt. Für eine quantifizierte Aussage zur Abnahme der Übertragungsfähigkeit der stirnseitigen Verbindung sind aufgrund des schwankenden Reibwertes und der geringen Stichprobenanzahl weitere Versuche erforderlich. Zudem kann eine Vergrößerung des Umfangs der einzelnen Laststufen erfolgen, da in diesen Lastbereichen eine verlangsamte Außenringbewegung möglich ist, die messtechnisch in den Versuchen nicht erfasst werden konnte. Dies geht allerdings mit einer deutlichen Verlängerung der Versuchszeit einher.

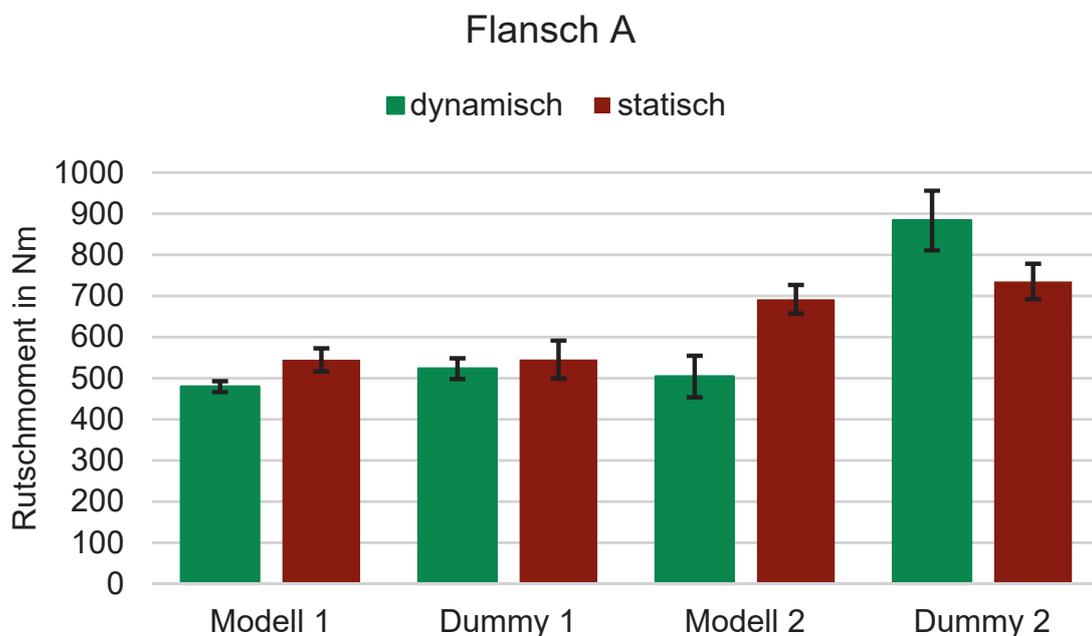


Abbildung 10: mittlere Rutschmomente und 90 %-Konfidenzintervalle der Mittelwertschätzung am Flansch A

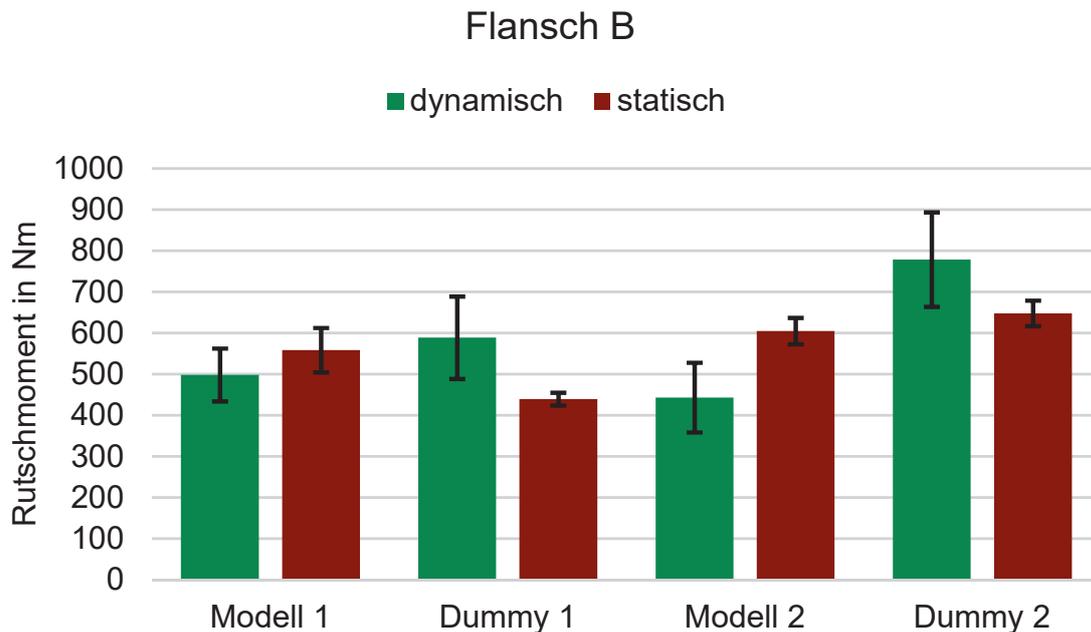


Abbildung 11: mittlere Rutschmomente und 90 %-Konfidenzintervalle der Mittelwertschätzung am Flansch B

Zusammenfassung

Die durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen konnten bestätigen, dass die freilauftypischen Belastungen einen Einfluss auf die kraftschlüssige Übertragungsfähigkeit der Verbindung von Freilaufaußenring zum Flansch hat. Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die hohen Radialkräfte, welche bei der Drehmomentenübertragung im Freilauf erforderlich sind, zu einer deutlichen Verringerung des übertragbaren Drehmoments der stirnseitigen Befestigung des Außenrings führen. Ein Vergleich von verschiedenen Geometrievarianten bestätigte zudem, dass die Vorhersage der Rutschzeitpunkte mithilfe der Theorie der behinderten radialen Aufweitung zutreffend ist. Experimentell äußert sich der Einfluss der freilauftypischen Belastung vor allem bei dynamischer Beanspruchung. Hier konnte ein Wandern der Freilaufaußenringe festgestellt werden, welches zumeist bei niedrigeren Drehmomenten als bei statischer Beanspruchung erfolgt. Allerdings zeigte sich der Einfluss der freilaufspezifischen Belastung in geringerem Maße als theoretisch vorhergesagt. Eine genauere experimentelle Beschreibung des Phänomens erfordert weitere Versuchsdaten.

Danksagung

Die Forschungsergebnisse wurden im Rahmen der Vorhaben „stirnseitige Befestigung von Freiläufen“ (FVA 704 I und II) mit Förderung durch die AiF (IGF Nr. 17841 N und 20671 N/1) erzielt. Die Autoren danken den beteiligten Institutionen sowie den im FVA Arbeitskreis Freiläufe beteiligten Firmen für die Unterstützung.

Literatur

- /1/ Richtlinie: VDI 2230-1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Blatt 1: Einschraubenverbindungen. Beuth-Verlag, 12.2014
- /2/ Richtlinie: VDI 2230-2: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Blatt 2: Mehrschraubenverbindungen. Beuth-Verlag, 12.2014
- /3/ Hofmann, S.: Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FVA 704, FVA-Heft Nr. 1241. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2017
- /4/ Hofmann, S. Eine Theorie der behinderten radialen Aufweitung am stirnseitig befestigten Freilauf. Dissertation. Clausthal-Zellerfeld 2019
- /5/ Klügel, N.: Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FVA 704 II, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (erscheint demnächst)
- /6/ Rust, W.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnung mit ANSYS Workbench: Strukturmechanik: Kontakt, Material, große Verformungen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020
- /7/ Intellifast GmbH: Internetauftritt der Firma Intellifast, <https://www.intellifast.de/intellifast-system/> (abgerufen am 25.11.2022)
- /8/ Klügel, N; Lohrengel, A.: Berechnung von stirnseitigen Mehrschraubenverbindungen am Bei-spiel eines dynamisch beanspruchten Freilaufs, In: Tagungsband zur 7. VDI-Fachtagung Schraubenverbindungen, Berlin 08./09.11.2022

Einfluss von oberflächennahen Parametern auf die Lebensdauer von Klemmrollenfreiläufen

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

Der Einfluss der oberflächennahen Parameter Einhärtetiefe, Rauheit und Elastizitätsmodul (in Form von Hartmetalleinlagen) können nach heutiger Erkenntnis nicht genau beschrieben werden und stehen in keiner Berechnungsgrundlage zur Auslegung von Klemmrollenfreiläufen zur Verfügung. Die Parameter wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Lebensdauer experimentell und simulativ untersucht, um Vorschläge für eine optimierte Auslegung vorzunehmen.



The influence of the near-surface parameters hardness depth, roughness and modulus of elasticity (in the form of hard metal inserts) cannot be described precisely according to current knowledge and are therefore not available in any calculation basis for the design of freewheels. The parameters were investigated experimentally and simulatively as part of a research project with regard to a possible increase in life in order to make suggestions for an optimized design.

Einleitung und Problemstellung

Freiläufe zählen zu den drehrichtungsabhängig selbsttätig schaltenden Kupplungen. Vorwiegend werden im industriellen Umfeld reibschlüssige Freiläufe (Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufe) eingesetzt, bei denen die Drehmomentübertragung in Abhängigkeit der Relativbewegung von An- und Abtriebsseite, in Form des Verdrehwinkels φ , erfolgt. Neben hoher Schaltpräzision wird von Freiläufen eine hohe Lebensdauer gefordert. Die Lebensdauer gilt als erreicht, wenn das Drehmoment nicht mehr zuverlässig und mit anhaltender Präzision übertragen werden kann. Im normalen Schaltbetrieb ist als häufigste Ausfallursache vor allem die Materialermüdung verantwortlich. Betroffen ist in erster Linie der Innenstern vom Klemmrollenfreilauf. Durch geeignete Wahl der Materialparameter Einhärtetiefe, Elastizitätsmodul und Rauheit im Klemmkontaktbereich des Innensterns kann die Lebensdauer erfahrungsgemäß gesteigert werden. Diese Materialparameter des oberflächennahen Bereiches bleiben bei der Auslegung bisher jedoch unberücksichtigt. Hersteller greifen daher auf Erfahrungswissen zurück, was zu einer Überdimensionierung der Freiläufe führt. Aus diesem Grund besteht dringender Forschungsbedarf in diesem Bereich, der im Rahmen eines FVA-Vorhabens erstmals betrachtet wurde.

Theorie der Freilauflebensdauer

Die Prognose der Lebensdauer von Klemmrollenfreiläufen erfolgt in der Praxis anhand des Lebensdauermodells nach Welter /1/, Deppenkemper /2, 3/ und Lohrengel /4/ auf Grundlage des Ansatzes nach Lundberg und Palmgren /5/. Analog zum Vorgehen bei der Lebensdauerprognose bei Wälzlagern, wird bei Freiläufen die Lebensdauer anhand der Beanspruchung (Hertzische Pressung) im Wälzkontakt zwischen Außen- und Innenring zur Klemmrolle bestimmt. Dabei ist zwischen Klemmrolle und Stern nach /6/ der kritische Kontakt zu erwarten. Ergänzend wirken bei Freiläufen, im Gegensatz zu Wälzlagern, neben den üblichen Normalkräften F_N Tangentialbelastungen F_{tan} , die zu einer zusätzlichen Schubbeanspruchung des Werkstoffes führen und aus der Übertragung des Drehmomentes T resultieren, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die im Folgenden betrachteten oberflächennahen Materialparameter Einhärtetiefe (Eht), Elastizitätsmodul (E-Modul) und Rauheit werden in bisherigen Lebensdauerabschätzungen nicht berücksichtigt. Die Lebensdauer von Freiläufen wird aktuell über Erlebenswahrscheinlichkeiten abgeschätzt, wobei die im Kontakt wirkende Hertzische Pressung p_{Hertz} verwendet wird, siehe Gleichung 1. Der Proportionalitätsfaktor U und die Exponenten d und c sind zuvor experimentell zu bestimmen.

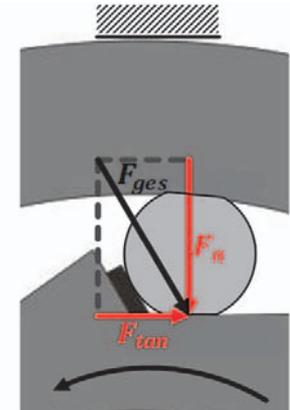


Abbildung 1: Kontaktbeanspruchung im Klemmrollenfreilauf /7/

$$\ln\left(\frac{1}{S}\right) = U \cdot N^d \cdot \int_A p_{Hertz}^c dA \quad (1)$$

Durch das Verrechnen der Einzelerlebenswahrscheinlichkeiten für Innenring, Klemmrollensatz und Außenring, kann die Erlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtfreilaufs berechnet werden. Durch Umstellen der Gleichung 1 nach der Zyklenzahl N und der Definition der enthaltenen Parameter, kann die Lebensdauer LW abgeschätzt werden:

$$LW = a_{FrI} \left(\frac{K}{M_T / \tan(\alpha_i)} \right)^{p_{FrI}} \quad (2)$$

Einfluss der Einhärtetiefe und Rauheit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form von Schaltversuchen durchgeführt. Im Folgenden wird der Einfluss unterschiedlicher Eht dargestellt und verglichen. Ein möglicher Einfluss durch Rauheitsunterschiede wird ebenfalls betrachtet. Für die Untersuchung der Eht-Variation wird als Vergleich ein Standardfreilauf mit einer Eht von 0,6 mm

verwendet. Betrachtet werden Variationen mit einer Eht von 0,3 mm und 0,1 mm. Es liegen zwei Varianten der Rauheit ($Rz \approx 3 \mu\text{m}$ und $Rz \approx 8 \mu\text{m}$) vor, die jeweils verglichen werden. Herstellungsbedingt unterliegen die Eht-Angaben z. T. starken Schwankungen, wie der Auszug in Tabelle 1 zeigt.

Tabelle 1: Einhärtetiefen für Sollwert und Istwerte nach dem Härteprozess aus /7/

	Soll Eht	Erreichte Eht		
Standard	0,6	0,70	0,75	0,77
Variante 1	0,3		0,15	0,19
Variante 2	0,1	0,19	0,22	0,34

Die Messungen wurden für beide Rauheitsvarianten durchgeführt. Die tatsächlich erreichten Einhärtetiefen lassen keine ausreichende Differenzierbarkeit zwischen den Varianten zu, wie die Werte in Tabelle 1 zeigen. Die Versuchsergebnisse zwischen den Eht-Varianten 0,3 mm und 0,1 mm mit der Rauheit $Rz \approx 3 \mu\text{m}$ bestätigen die mangelnde Differenzierbarkeit, sodass die Versuche der Varianten 1 und 2 zu einer gemeinsamen Versuchsreihe zusammengefasst werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Eht-Versuche sind Abbildung 2 zu entnehmen.

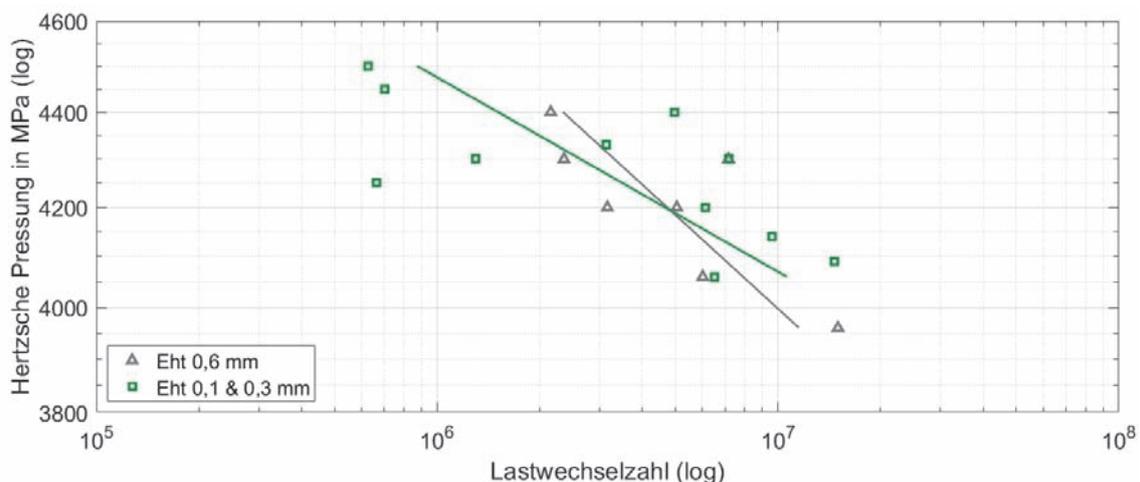


Abbildung 2: Auswahl Eht-Versuchsergebnisse nach /7/ mit Soll-Eht

Die mangelnde Differenzierbarkeit der Eht-Varianten hat zu keiner wesentlich unterscheidbaren Lebensdauer bei den Versuchen geführt. Eine Veränderung der Lebensdauer zwischen den Variationen (Eht 0,1 mm und 0,3 mm) und der Standardvariante (Eht 0,6 mm) ist ebenfalls nicht erkennbar. Die Unterschiede der Regressionsgeraden zueinander sind primär auf die geringe Versuchsanzahl zurückzuführen. Eine Eht im Bereich von 0,15 mm bis 0,77 mm scheint keinen feststellbaren Einfluss auf die Lebensdauer aufzuweisen, wobei die Versuche nicht als statistisch abgesichert angenommen werden können. Eine Betrachtung der

Oberflächen im Wälzbereich der Innensterne weisen hingegen unterschiedliche Schadensbilder auf, wie Abbildung 3 zeigt.

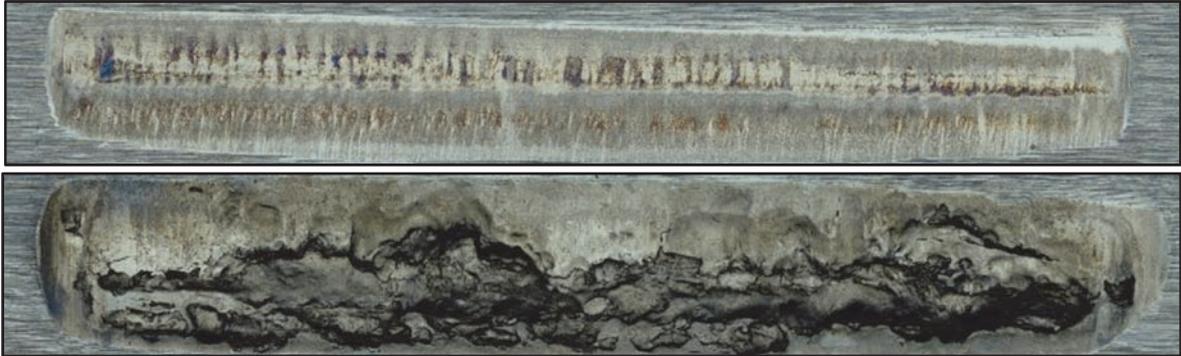


Abbildung 3: Charakteristische Oberfläche bei vergleichbarer Last & Zyklenzahl, oben: Standardprüfling (Eht 0,6 mm); unten: Variante 2 (Eht 0,1 mm) nach /7/

Die Klemmflächen des Standardprüflings (Eht 0,6 mm) weisen in der Regel nur wenige lokale Ausbrüche auf, während entsprechende Flächen von Prüflingen mit Eht 0,1 mm vermehrt über die gesamte Breite zerstört sind. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass Prüflinge mit geringerer Eht vermehrt kleine lokale Ausbrüche, Mikropittings und größere Ausbrüche aufwiesen. Diese Art der Schäden konnte nur in wenigen Fällen und weniger stark ausgeprägt beim Standardprüfling festgestellt werden. Analytierte Schlibfbilder in /7/ lassen vermuten, dass das Versagen infolge von Ermüdung auftritt. Wird neben den Einhärtetiefen die Rauheit variiert, lassen sich weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses des oberflächennahen Einflussparameters „Rauheit“ ableiten. Hierfür werden in einer weiteren Versuchsreihe die bereits genannten Variationen mit einer Rauheit von $Rz \approx 8 \mu\text{m}$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 4 dargestellt. Der besseren Übersicht halber werden jeweils alle Eht-Varianten mit derselben Rauheitsklasse zusammen dargestellt.

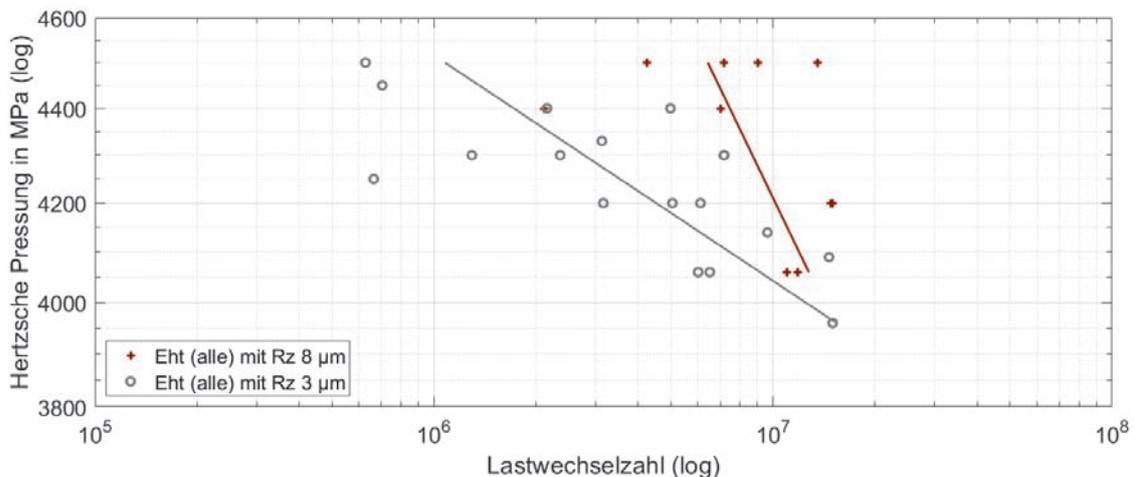


Abbildung 4: Auswahl Eht- und Rauheitsversuche nach /7/ mit Sollwerten

Festzustellen ist eine Lebensdauersteigerung bei erhöhter Rauheit, besonders im Bereich hoher Pressungen. Es liegt folglich ein starker Einfluss aufgrund der Rauheit vor. Eine mögliche Erklärung für den Einfluss der Rauheit könnte sein, dass bei erhöhter Rauheit im Klemmvorgang die ebenfalls erhöhten Kontaktspannungen zu einer früheren plastischen Verformung führen und so die Kontaktspannungen in nachfolgenden Belastungszyklen geringer ausfallen.

Einfluss des Elastizitätsmoduls

Einen weiteren Einfluss auf die Freilauflebensdauer von Klemmrollenfreiläufen stellt die Möglichkeit des Einsatzes von Hartmetallen dar, welche sich durch ein erhöhtes E-Modul im Vergleich zu konventionellem Stahl auszeichnet (ca. 470 – 700 GPa). Hierzu werden auf den Klemmflächen des Sterns Hartmetalleinlagen eingesetzt, wie Abbildung 5 zeigt. In Freiläufen werden Hartmetalle dann eingesetzt, wenn hohe dauerhaft reproduzierbare Schaltgenauigkeit notwendig ist. Durch die Reduktion der Wälzverschleißintensität bleibt die Schaltgeometrie länger in ihrer Ausgangsform bestehen. Zwar bedeutet ein höheres E-Modul bei gleicher Belastung eine steigende Beanspruchung auf der Klemmrampe, jedoch überwiegt der positive Effekt der ebenfalls höheren Drucksteifigkeit des Hartmetalls, sodass eine Lebensdauersteigerung erreicht werden kann. Der Vorteil von Hartmetallen (HM) liegt nicht in einer gesteigerten Leistungsdichte, sondern viel mehr in der Verbesserung des Verschleißverhaltens. Für die Untersuchungen wurden Einsätze mit einem E-Modul von 570 GPa verwendet. Die durchgeführten Versuche sind zum Vergleich der erreichten Lebensdauern zusammen mit den Standardprüflingen in Abbildung 6 dargestellt.

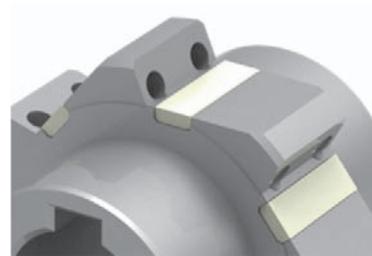


Abbildung 5: Darstellung der Hartmetalleinsätze

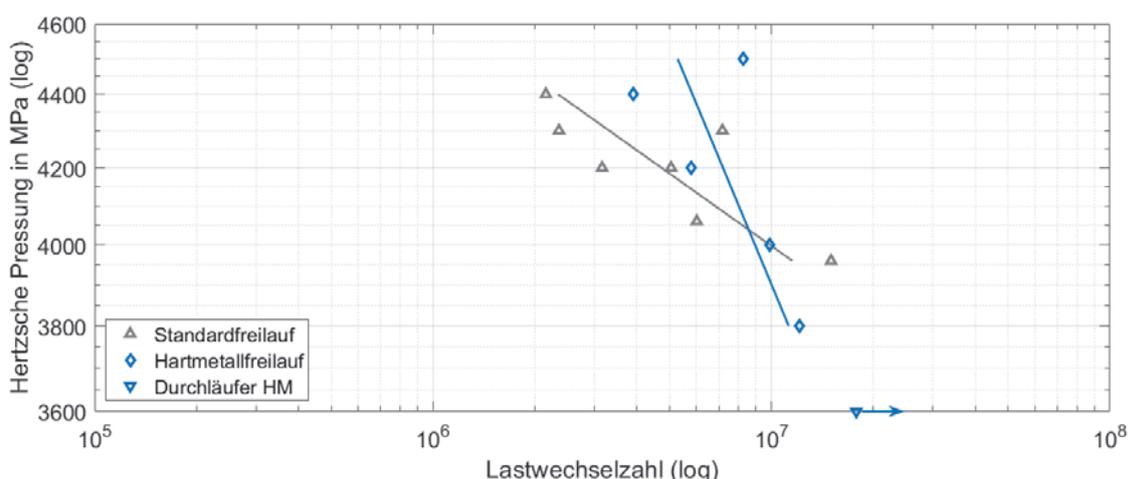


Abbildung 6: Auswahl Eht- und Rauheitsversuche aus [7] mit Sollwerten

Die Neigung der Regressionsgerade der Prüflinge mit Hartmetalleinsätzen weicht stark von der der Standardfreiläufe ab. Anhand der für die Versuche definierten

Ausfallkriterien (Pop-Outs und Erreichen einer Verdrehwinkelgrenze), konnte keine deutliche Steigerung der Lebensdauer bei Hartmetalleinsätzen ermittelt werden, jedoch treten auch im niedrigen Pressungsbereich noch Durchläufer auf. Die Betrachtung der Oberflächenschäden zeigte auch hier eine deutliche Abweichung gegenüber der Standardprüflinge. Üblicherweise kommt es bei Freiläufen in Folge von Verschleiß durch Muldenbildung auf der Wälzfläche des Innensterns zu einer Veränderung des Verdrehwinkels und daraus folgend zu einem Ausfall. Bei Versuchen mit Hartmetalleinsätzen konnte, trotz Änderung des Verdrehwinkels, auf den Wälzflächen des Sterns keine ausgeprägte Muldenbildung oder andere Oberflächenschäden festgestellt werden, siehe Abbildung 7 links. Rauheitsmessschiebe über die Wälzfläche aus [7] zeigen, dass es in Folge der Überwälzungen lediglich zu einer Glättung der Oberfläche kam. Folglich ist der veränderte Verdrehwinkel auf andere Freilaufkomponenten zurückzuführen. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Ausfallursache auf die veränderte Klemmrollenkontur zurückzuführen ist, wie Abbildung 7 rechts zeigt. Die zum Teil stark von der Ausgangsform abweichende Kontur der Klemmrollen, kann in entsprechender Lage im Klemmkontakt zu einem Ausfall führen.

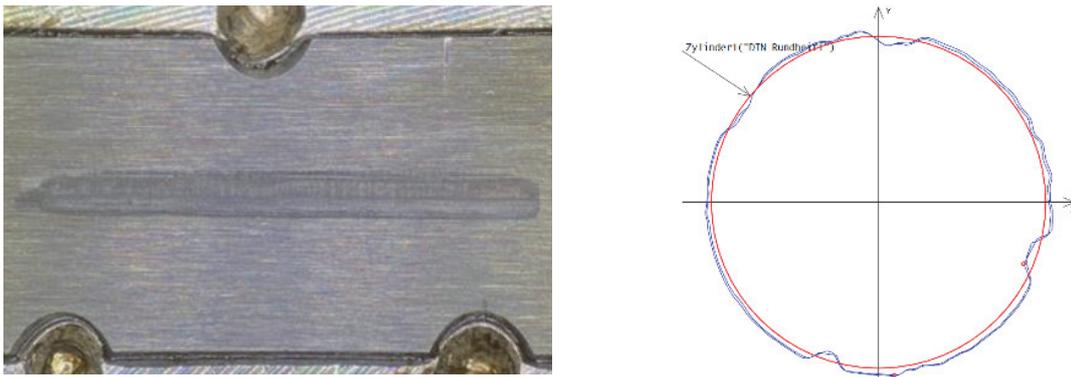


Abbildung 7: Schadensbild einer Klemmfläche und Rollenkontur von einem Freilauf mit Hartmetalleinsatz nach Versuchsende aus [7]

Simulative Untersuchung

Im Rahmen des Vorhabens wurde für ergänzende Simulationen unter anderem ein FE-Modell aufgebaut, um den Belastungszustand beim mehrmaligen Abrollvorgang zu simulieren. Durch Nachbildung der Freilaufkomponenten (Innenstern, Klemmrolle und Außenring) und die Möglichkeit der extrem feinen Aufschlüsselung von Materialeigenschaften auf insgesamt 50 Schichten im unmittelbaren Wälzbereich, ist eine genaue Berücksichtigung der Materialparameter in Abhängigkeit des Abrollvorganges möglich. Für eine realitätsnahe Simulation werden im elastisch-plastischen Simulationsmodell insgesamt 10 Lastschritte ausgeführt, sodass der Einfluss plastischer Verformungen mit berücksichtigt wird. In Abbildung 8 sind beispielhaft die Vergleichsspannungen unterhalb der Oberfläche des Klemmkontaktes für die Variation der Einhärtetiefe abgebildet.

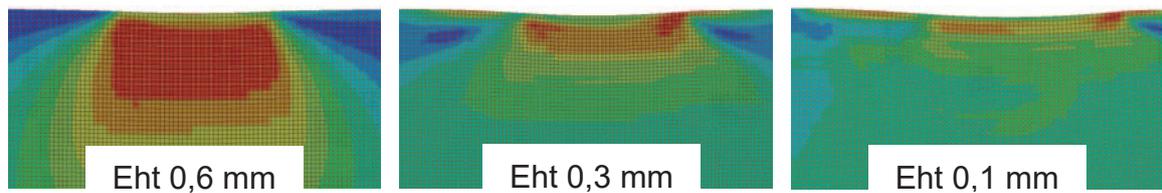


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Vergleichsspannung für Eht-Variationen im zehnten Lastschritt (Beginn des roten Bereichs: 2000 MPa) /7/

Die Simulationen ergaben, dass der von hohen Vergleichsspannungen betroffene Bereich aufgrund plastischer Deformation schrumpft und in Richtung Oberfläche wandert. Dieses Verhalten unterstützt die experimentellen Ergebnisse hinsichtlich kaum vorhandener Unterschiede in den Lebensdauern bei Eht-Variation. Bei Hartmetalleinlagen handelt es sich um extrem druckfestes, sprödes Material, wo vornehmlich das Maximum der Hauptspannungsrichtung als Versagensgrenze gilt, sodass der Verlauf der Hauptspannung betrachtet wurde. Es konnte wiederum ermittelt werden, dass die Beanspruchung unterhalb der Beanspruchbarkeit liegt, sodass für die Hartmetalleinlagen weitere potenzielle Reserven vorliegen. Die Beanspruchung des umgebenen Materials um die Hartmetalleinlagen weist eine Beanspruchung von lediglich 100 MPa auf und wird daher als unkritisch angesehen, sodass auch hier die experimentellen Erkenntnisse bestätigt werden konnten.

Berücksichtigung im Lebensdauermodell

Die Berücksichtigung der Parameter des oberflächennahen Bereiches (Eht, Rauheit, E-Modul) kann prinzipiell auf verschiedene Arten in der Lebensdauerberechnung integriert werden. Für die Berücksichtigung von Eht und Rauheit ergaben Anpassungen über weitere Konstanten bei der Kontaktpressung durch eine Integration des plastischen Anteils oder bei der Anpassung der Verdrehfederkennlinie durch Beachtung der elastisch-plastischen Deformation und dem damit veränderten Abrollverhalten zielführende Methoden. Das E-Modul wird grundlegend bereits in entsprechenden Auslegungsprogrammen berücksichtigt. Aufgrund des stark abweichenden Werkstoffverhaltens von Hartmetall ist eine direkte Verwendung und Übertragung jedoch nicht möglich. Die Lebensdauer von Hartmetallen weist eine stochastische Abhängigkeit vom überwälzten Volumen auf, sodass dieses möglichst geringgehalten werden sollte /7/.

Zusammenfassung

Die vorgenommenen Untersuchungen zu den Einflussgrößen Oberflächenrauheit, Einhärtetiefe und Elastizitätsmodul (Hartmetalleinsätze) steigern das Verständnis für die Vorgänge im Klemmrollenfreilauf enorm. Eine Variation der Einhärtetiefe (Eht 0,3 mm bis 0,7 mm) führt zu keiner signifikanten Beeinflussung der Lebensdauer, sodass vermutlich mit geringerer kostenintensiver Einhärtetiefe

bereits hohe Lebensdauern erreicht werden können. Eine zusätzliche Lebensdauersteigerung verspricht hingegen eine erhöhte Rauheit der Wälzfläche, da sich vermutlich infolge von plastischen Verformungen eine zueinander verbesserte Kontaktsituation einstellt. Beim Einsatz von Hartmetalleinsätzen zeigen erste Erkenntnisse, dass eine verkürzte Rollenbreite (Reduktion des überwälzten Volumens) zu einer Lebensdauersteigerung führen kann. Gleichzeitig kristallisiert sich heraus, dass nicht die Hartmetalleinlage das lebensdauerkritische Element darstellt, sondern die Klemmrollen des Freilaufs. Für eine exakte Berücksichtigung der Parameter in der Lebensdauerberechnung, müssen weitere Versuche zur statistischen Absicherung sowie umfangreiche Simulationen durchgeführt werden. Aus diesem Grund sind weitere Vorhaben geplant, um die Einflussparameter des oberflächennahen Bereiches getrennt voneinander beschreibbar zu machen und zukünftig, in Berechnungsprogramme implementiert, zur Verfügung stellen zu können.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der mit beteiligten Forschungsstelle (MSE der RWTH Aachen) für die Zusammenarbeit sowie bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Rollenfreilauf Härteprofil“ (FVA 776 I, IGF-Nr. 18505/N).

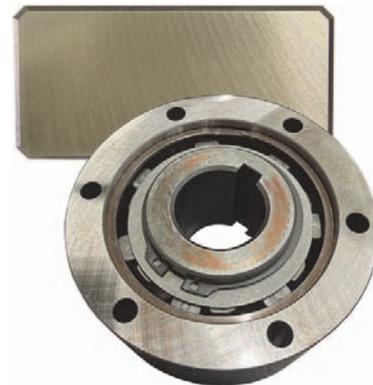
Literatur

- /1/ Welter, R., Peeken, H.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb Forschungsvorhaben Nr. 137 I, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 319, Abschlussbericht, IGF-Nr. 6763, Frankfurt am Main 1990
- /2/ Deppenkemper, P., Peeken, H., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb Forschungsvorhaben Nr. 137 II, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 383, Abschlussbericht, IGF-Nr. 7923, Frankfurt am Main 1993
- /3/ Deppenkemper, P., Lohregel, A., Gold, P.W.: Lebensdauer von Klemmkörperfreiläufen im Schaltbetrieb
- /4/ Lohregel, A., Gold, P.W.: Freilauflebensdauer-Klemmrollen Forschungsvorhaben Nr. 287, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Heft 614, Abschlussbericht, IGF-Nr. 10422 N, Frankfurt am Main, 2000
- /5/ Lundberg, G.; Palmgren, A.: Dynamic Capacity of Rolling Bearings Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, Vol. 1, Nr. 3, 7, 1947
- /6/ Daners, R.: Lastverhalten und Lebensdauer von Außensternfreiläufen im Vergleich mit anderen Bauformen
- /7/ Sous, C.; Lohregel, A.; Guzman, G.; Martinewski, V.; Dreiseidler, S.: Abschlussbericht zum FVA-Projekt 776 I Freilauf Härteprofil; RWTH Aachen, Technische Universität Clausthal; 2022

Bestimmung von Anwendungsreibwerten stirnseitig befestigter Freiläufe

Krahl, S.; Lohrengel, A.

Für eine sichere Auslegung der Mehrschraubenverbindung zwischen Freilaufaußenring und angrenzendem Flansch ist eine möglichst genaue Kenntnis des Reibwertes in der Trennfuge erforderlich. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Ermittlung von Anwendungsreibwerten an Flachproben, welche eine ähnliche Oberflächentopographie aufweisen wie der Freilaufaußenring. Untersucht wird der Einfluss von verschiedenen Betriebsstoffen, Oberflächenzuständen und Schmiermitteln. Zudem wird eine Aussage bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Einbausituation getroffen.



For a reliable dimensioning of the multi-bolt connection between the freewheel outer ring and the adjacent flange, it is necessary to know the coefficient of friction in the contact zone as accurately as possible. This article provides an overview of the determination of friction coefficients on flat specimens with a surface topography similar to that of the freewheel outer ring. The influence of different surface conditions and lubricants is investigated. In addition, a statement is made regarding the transferability of the results to the installation circumstances.

Einleitung

Prinzipbedingt entstehen beim Einsatz von Freiläufen hohe Normalkräfte, welche zu einer Aufweitung des Freilaufaußenringes führen können. Bei stirnseitig verschraubten Freiläufen, siehe Abbildung 1, kann es durch die Aufweitung zum frühzeitigen Lösen der Schraubenverbindung zwischen Freilauf und Flansch kommen /1/.

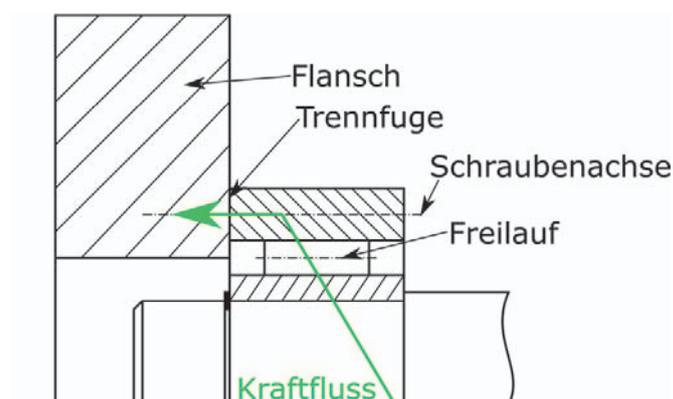


Abbildung 1: Schematischer Aufbau bei stirnseitig verschraubtem Freilauf nach /1/

Neben den Kräfteverhältnissen ist der sich einstellende Haftreibungswert in der Trennfuge von entscheidender Bedeutung für das übertragbare Sperrmoment. Eine genaue Kenntnis von Anwendungsreibungswerten unter Einfluss verschiedener Betriebsstoffe und Oberflächenzustände ist deshalb unabdingbar für die sichere Auslegung der Mehrschraubenverbindung. Der Haftreibungswert wird im Folgenden an Flachproben ermittelt. Außerdem wird überprüft, ob die Ergebnisse auf den Kontakt Freilaufaußenring-Flansch übertragbar sind.

Untersuchungen an Flachproben

Es wurden rechteckige Flachproben aus 16MnCrS5 mit einsatzgehärteter und geschliffener Oberfläche untersucht. Die Proben des Herstellers B weisen eine rauere Oberfläche auf. In Abbildung 2 ist die Oberflächentopographie der Proben zusammen mit der des Freilaufaußenringes exemplarisch für den Hersteller A zu sehen.

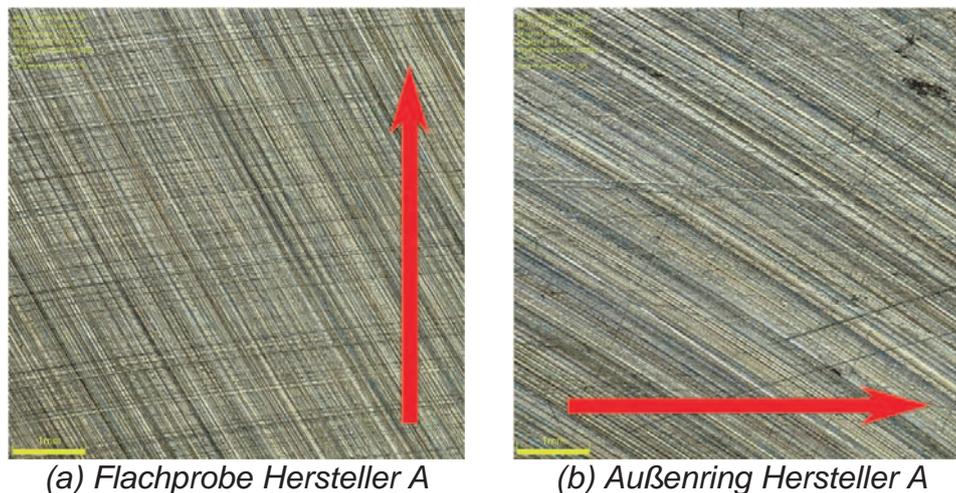


Abbildung 2: Oberflächenbeschaffenheit und Belastungsrichtung Flachproben (Prüfkraft) und Außenringe (Drehmoment in Umfangsrichtung) im Vergleich

Als Kontaktpartner dienen ungehärtete Klemmbacken aus 42CrMo4+QT welche den Flansch als Kontaktpartner des Freilaufaußenringes abbilden sollen. Aus Abbildung 3 ist der Versuchsplan zusammen mit der Benennung der Behandlungszustände ersichtlich. Die Versuche werden am Reibwerttester des IMW durchgeführt. Hierbei werden, wie in Abbildung 4 zu sehen, die verspannten Flachproben unter einer Querkraft aus dem Klemmspalt gezogen. Während der Versuche wird jeweils der Rutschweg laseroptisch aufgenommen und die Normalkräfte F_1 und F_2 , sowie die Zugkraft F_Z an DMS-Messstellen aufgezeichnet. Aus den Kräften lässt sich mit Gleichung (1) der gesuchte Reibwert μ ermitteln.

$$\mu = \frac{F_Z}{2 \cdot F_N} = \frac{F_Z}{2 \cdot (F_1 + F_2)} \quad (1)$$

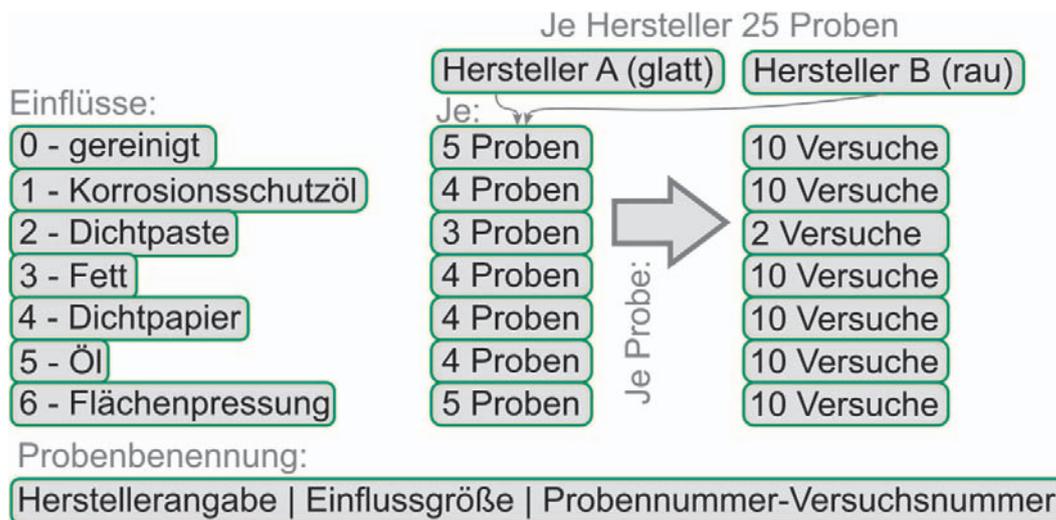


Abbildung 3: Versuchsplan und Benennung der Einflüsse und Proben

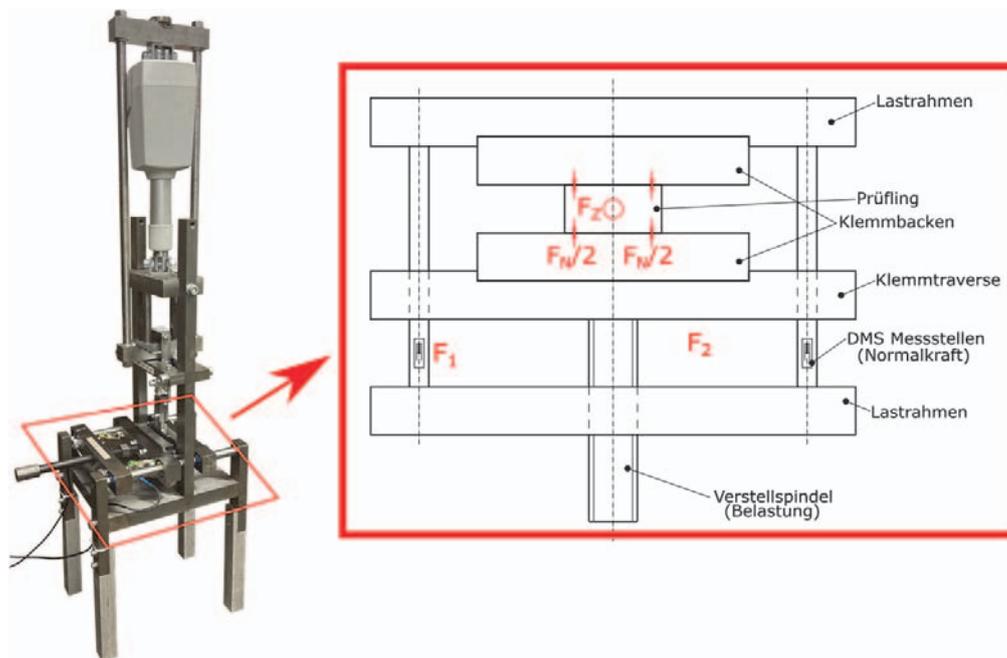


Abbildung 4: Reibwerttester des IMW, real und schematisch nach /1/

Aus den aufgenommenen Werten kann der in Abbildung 5 exemplarisch dargestellte Verlauf abgeleitet werden. Hierbei ist zusätzlich die als zeitliche Ableitung des Rutschweges ermittelte Rutschschnelle geglättet dargestellt. Es wird während eines Versuches dreimal an der Probe gezogen, sodass sich drei Peaks ergeben. Der erste Peak steht hierbei aufgrund des stetig über dem Rutschweg zunehmenden Kraftverhältnis nicht im Zusammenhang mit einem Rutschvorgang. Vielmehr lässt sich hier die elastische Verformung des Prüfstandes erkennen. Beim zweiten und dritten Ziehen an der Probe bilden die jeweils ersten lokalen Maxima den gesuchten Haftreibungwert ab, sodass prinzipiell zwei Datenpunkte pro Versuch aufgenommen werden können.

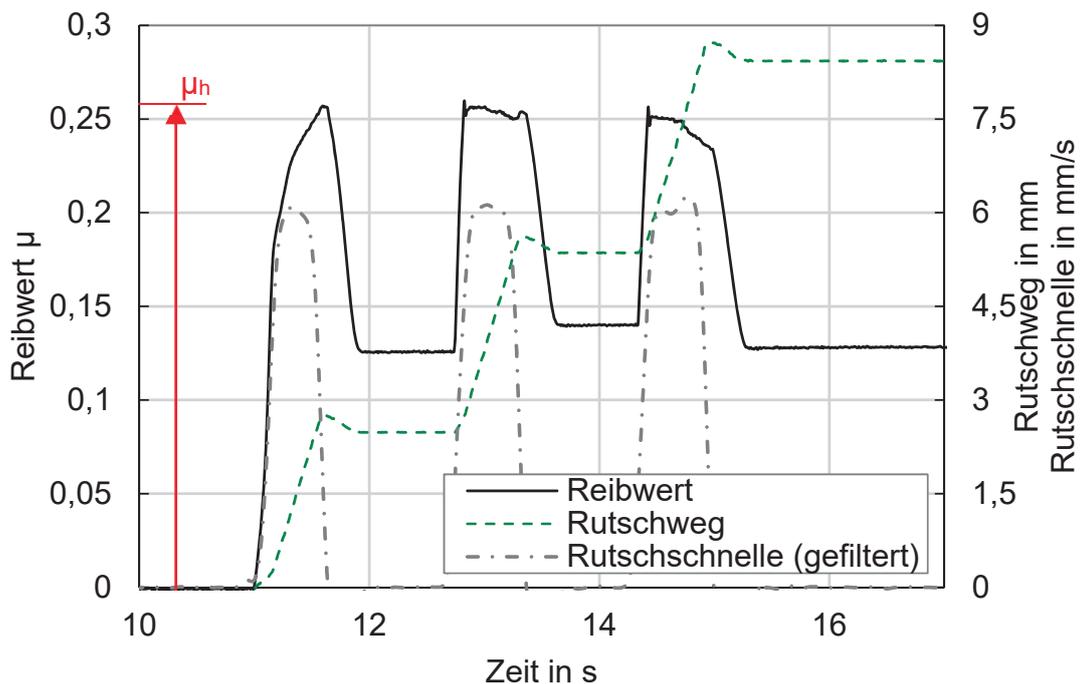


Abbildung 5: Auswertung eines Reibversuches am Beispiel A05 Versuch 10

Bei einigen der Versuchsreihen zeigt sich durch die signifikant veränderte Oberflächenstruktur (z. B. durch Fett) ein abweichendes Verhalten im Verlauf des Reibwertes. Hierdurch können nicht für jede Versuchsreihe zwei Datenpunkte pro Versuch ermittelt werden. Generell wird jedoch über alle Versuchsreihen der Peak beim zweiten Ziehen an der Probe ausgewertet, um die Versuche untereinander vergleichbar zu machen. Bei nahezu allen Versuchen handelt es sich hier auch um den *worst-case*, welcher das übertragbare Sperrmoment am Freilauf definiert.

Untersuchungen am Freilauf

Stichprobenartig werden statische Rutschversuche am Prüfling M1-08, einem Freilauf des Herstellers A, durchgeführt. Deren Ergebnisse sollen eine Aussage bezüglich der Übertragungsfähigkeit der an den Proben ermittelten Anwendungsreibwerte auf die eigentliche Einbausituation des stirnseitig verschraubten Freilaufes ermöglichen. Als Kontaktpartner dient eine Zwischenscheibe aus 42CrMo4+QT, welche den Flansch abbilden soll. Für gereinigte Oberflächen werden die Haftreibwerte aus durchgeführten Versuchen extrahiert. Zusätzlich werden Untersuchungen mit Öl in der Trennfuge durchgeführt. Die Rutschmomente wurden am Freilaufprüfstand aus Abbildung 6 unter Beaufschlagung des Freilaufes mit einem quasi-statischen Torsionsmoment ermittelt. In Abbildung 7 ist ersichtlich, dass sich im Momentenverlauf eine explizite Rutschgrenze ausbildet, an der das Rutschmoment und somit auch der Haftreibwert bestimmt werden kann.

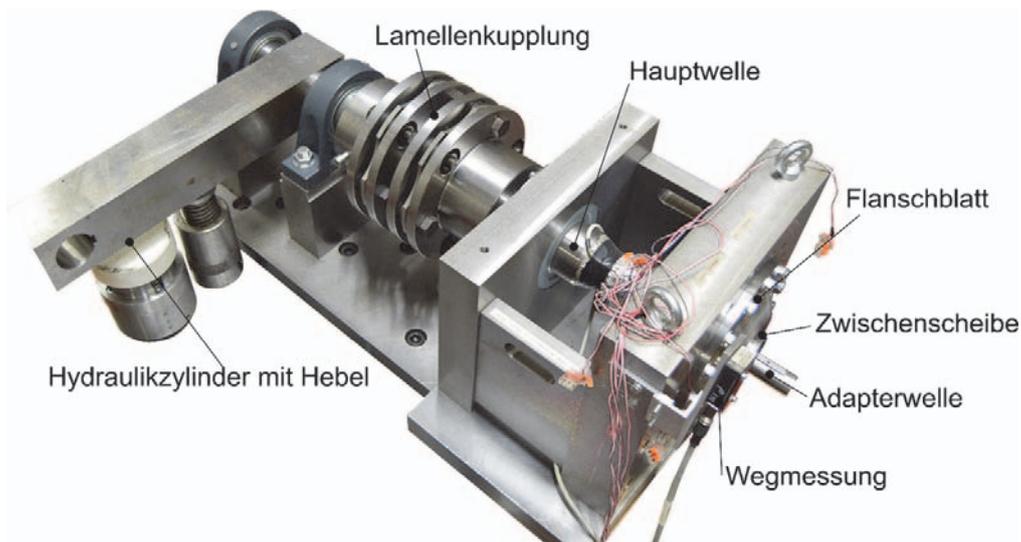


Abbildung 6: Prüfstand für Rutschversuche mit stirnseitig befestigten Freiläufen

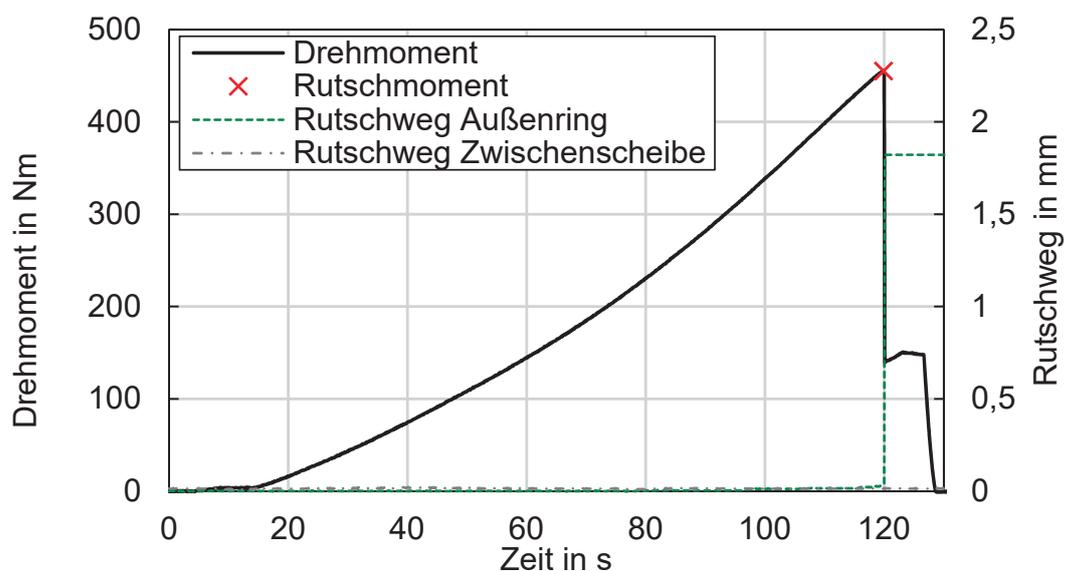


Abbildung 7: Exemplarischer Verlauf eines Rutschversuches am Freilaufprüfstand

Ergebnisse

Sowohl für die ermittelten Haftreibwerte an den Flachproben, als auch an den Freiläufen selbst zeigt der Kolmogoroff-Smirnov Test /2/ für jede der Versuchsreihen eine Normalverteilung der Beobachtung. Für die einzelnen Proben und Versuchsreihen kann somit neben dem arithmetischen Mittelwert und der Standardabweichung der Stichprobe, der Bereich bestimmt werden, in dem der Haftreibwert für einen Vertrauensbereich von 95 % liegt. Aufgrund des endlichen Stichprobenumfangs wird dafür die Student-t-Verteilung herangezogen /4/. Exemplarisch sind die ermittelten Werte für die Proben des Herstellers A in der Versuchsreihe mit gereinigten Oberflächen in Abbildung 8 dargestellt. Neben den

als Balken dargestellten Mittelwerten, ist die Streuweite der Probe jeweils als Fehlerindikator eingetragen. Es zeigt sich, dass der Probeneinfluss gering ist, sodass eine Auswertung auch auf Ebene der Versuchsreihen durchgeführt werden kann.

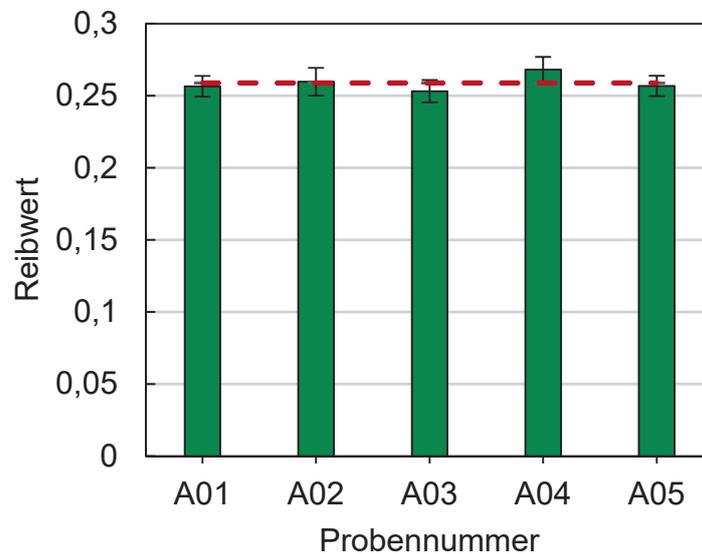
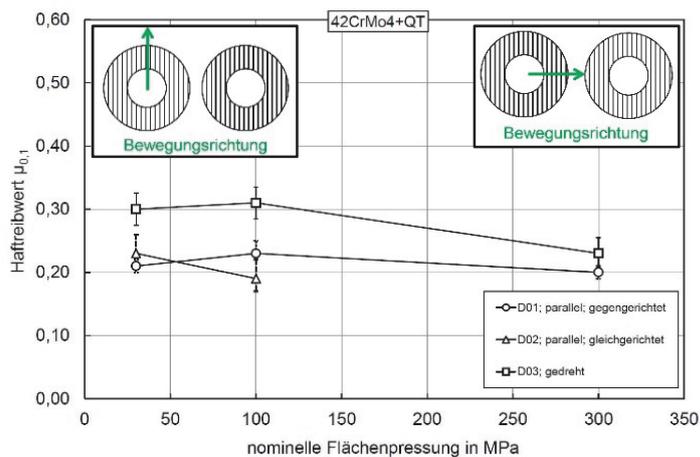
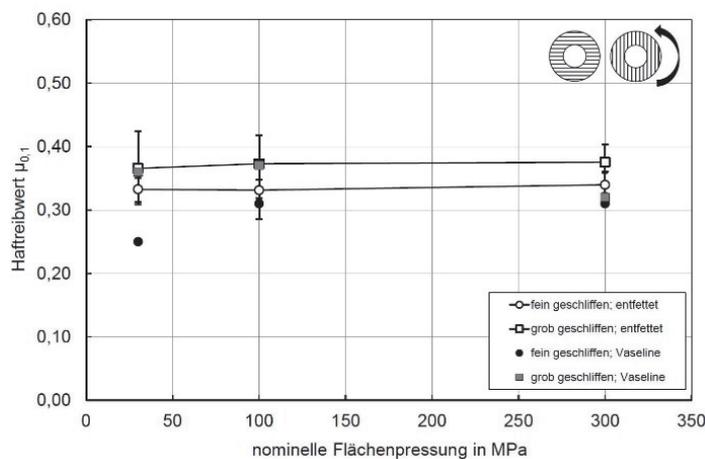


Abbildung 8: Mittelwerte der Haftreibwerte für Proben des Herstellers A, gereinigte Oberflächen

Die an den Flachproben ermittelten Haftreibwerte sind nicht direkt auf die eigentliche Einbausituation übertragbar. In /5/ und /6/ wird aufgezeigt, dass der Haftreibwert von der Belastungsart und -richtung, sowie der Anordnung der oberflächlichen Riefen der Kontaktpartner zueinander abhängig ist. Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass im Allgemeinen für eine Torsionsbelastung ein höherer Haftreibwert vorliegt. Die Riefen spielen bei der Torsionsbelastung eine untergeordnete Rolle. Für eine Belastung durch eine Querkraft zeigt sich hingegen eine Abhängigkeit des Haftreibwertes bei zunehmender Flächenpressung, je nach Riefenausrichtung. Folglich kann aus den Ergebnissen an den Flachproben nur eine Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Dieser liegt die Annahme zu Grunde, dass die Verhaltensweisen unter verschiedenen Oberflächeneinflüssen identisch sind und nur die Höhe des Haftreibwertes zwischen den unterschiedlichen Belastungsarten variiert.



(a) Querkraftbelastung



(b) Torsionsbelastung

Abbildung 9: Haftreibwert in Abhängigkeit der nominellen Flächenpressung; 42CrMo4+QT in Selbstpaarung; geschliffene Probenkörper /5/

Die Ergebnisse aller Untersuchungen sind in Abbildung 10 in Form eines Box-Plots dargestellt. Die Boxen werden dabei durch die ermittelten Grenzen für das 2,5 % bis 97,5 % Quantil der angenommenen Normalverteilung begrenzt. Die mittlere horizontale Linie innerhalb einer Box zeigt den Haftreibmittelwert für eine Versuchsreihe. Als horizontale Linien außer-/innerhalb der Box sind jeweils die beobachteten Maxima und Minima des Haftreibwertes eingezeichnet. Auf der Abzissenachse findet sich neben der Bezeichnung der Versuchsreihen auch der jeweilige Stichprobenumfang. Die Freilaufversuche sind jeweils mit M1-08 bezeichnet (vgl. /1/ und /2/ zur Prüflingsbezeichnung) und bestätigen die oben getroffene Annahme, dass die Verhaltensweisen z. B. unter Einfluss von Öl identisch für Flachprobe und Freilauf sind.

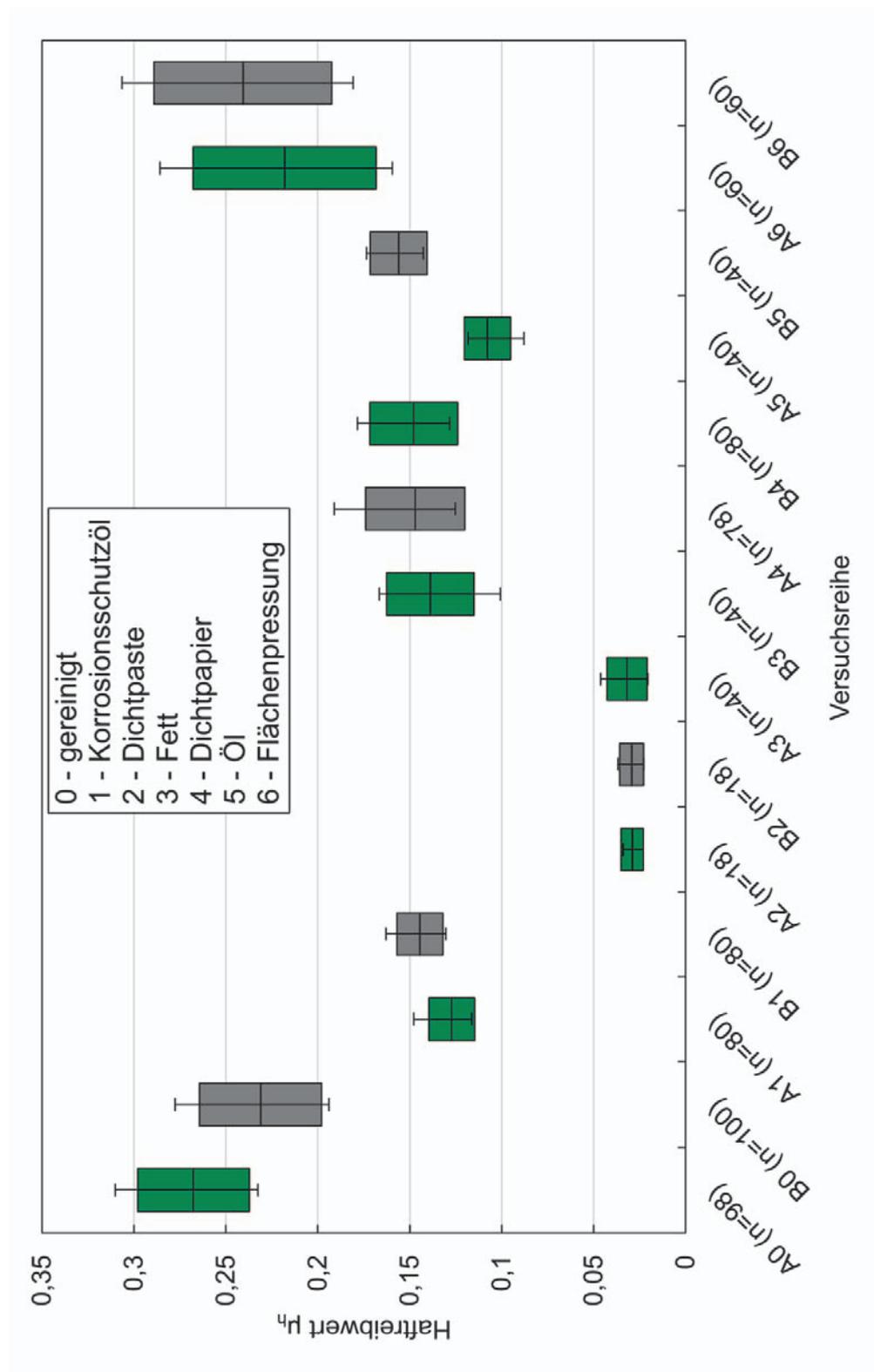


Abbildung 10: Übersicht Versuchsergebnisse

Es ist ersichtlich, dass für Versuche mit Zwischenmedium bei den raueren Flachproben des Herstellers B ein höherer Haftreibwert zu beobachten ist. Ausgenommen hiervon sind die Versuchsreihen mit Dichtpapier und Dichtpaste in der Trennfuge, da hier die Oberflächentopographie signifikant abgeändert wird. Bei beiden Zwischenmedien ist kein Einfluss der Rauheit vorhanden. Unter Einfluss der Öle zeigt sich, dass rauere Oberflächen zu bevorzugen sind. Gerade bei Kontamination durch das unadditivierte Mineralöl (Reihe 5) ist dadurch eine relativ hohe Steigerung des Haftreibwertes möglich. Kann die Rauheit des Freilaufaußenringes eingestellt werden, so lässt sich hierüber der Haftreibwert im kontaminierten Kontakt steuern. Falls eine Dichtung des ölgeschmierten Freilaufes nötig ist, empfiehlt es sich, ein Dichtpapier zwischen die Kontaktpartner zu legen, da die Dichtpaste den Haftreibwert stark herabsetzt.

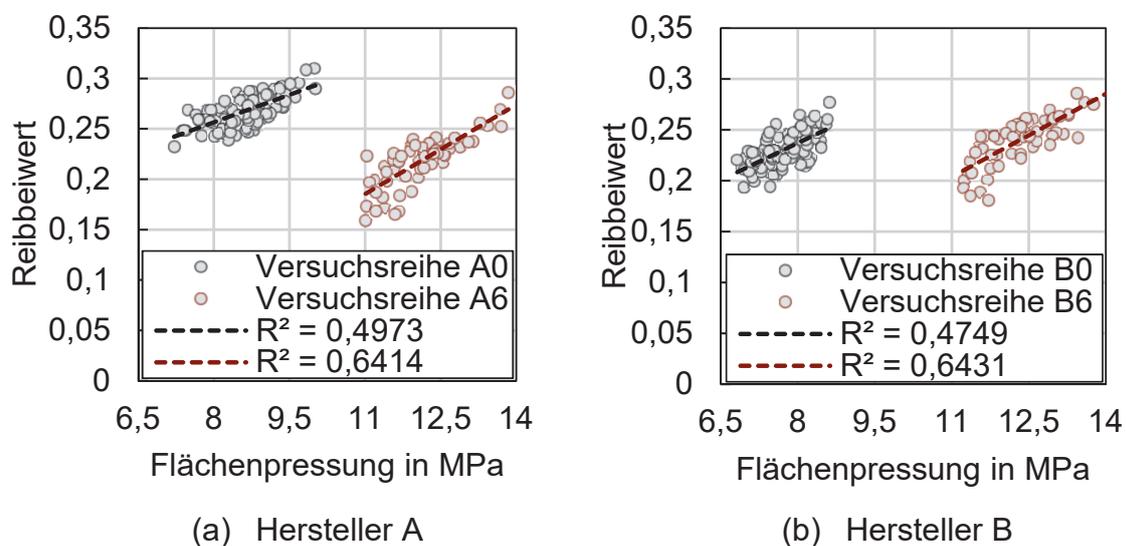


Abbildung 11: Haftreibwert der Probenkörper in Abhängigkeit der Pressung

Zur Maximierung des Sperrmoments ist eine Reinigung und Entfettung der Kontaktflächen vorzusehen. Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass durch die Reinigung im Mittel eine Steigerung des Haftreibwertes um das ca. Zweifache, im Vergleich zur mit Korrosionsschutzöl kontaminierten Oberfläche, möglich ist (z. B. A1 zu A0). Zwischen den Versuchsreihen bei niedriger Flächenpressung (0) und hoher Flächenpressung (6), mit jeweils gereinigten Oberflächen, lassen sich im Mittel für die raueren Proben B keine größeren Unterschiede feststellen. Werden Haftreibwert und Flächenpressung für eine Versuchsreihe zueinander betrachtet, zeigt sich, dass der Haftreibwert innerhalb der Versuchsreihe mit zunehmender Pressung steigt, vgl. Abbildung 11. Wobei für die glatten Proben der Haftreibwert im Mittel mit zunehmender Pressung sinkt. Eine eindeutige Aussage bezüglich der Korrelation von Rauheit, Flächenpressung und Haftreibwert ist somit nicht möglich. Ein Grund für den im Mittel niedrigeren Haftreibwert der Proben A bei hoher Pressung kann der bereits diskutierte Einfluss der Riefenausrichtung sein (Abbildung 9), welche für die einzelnen Proben A zum Teil stark unterschiedlich ist.

Zusammenfassung

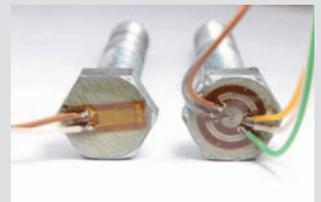
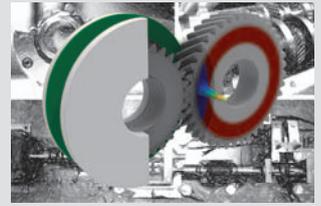
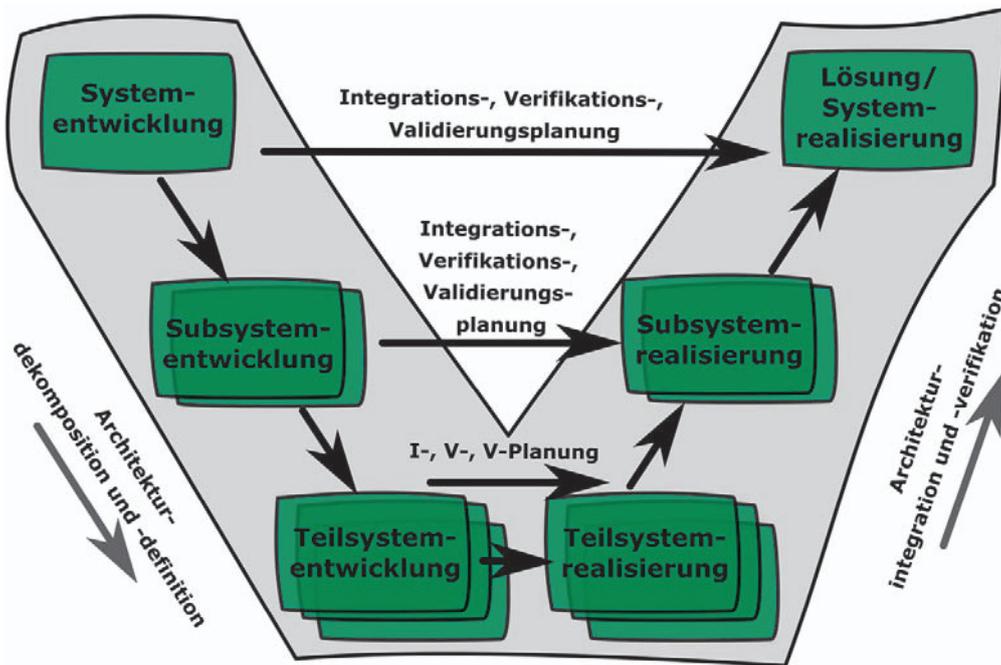
Die Ergebnisse zeigen, dass für die Kontaktfläche des Freilaufes an dessen Außenring eine deutliche Reibwertabnahme bei Verunreinigung mit üblichen Ölen und Fetten zu erwarten ist. Zeitgleich kann durch saubere und entfettete Oberflächen ein hoher Haftreibwert realisiert werden. Eine hohe Oberflächenrauheit wirkt sich bei gereinigten Kontaktflächen eher negativ auf das zu maximierende Sperrmoment aus. Bei verunreinigten Oberflächen hingegen kann der Haftreibwert durch eine große Rauheit des Freilaufaußenringes gesteigert werden.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Stirnseitige Befestigung von Freiläufen“ (FVA-Nr. 704II, IGF-Nr. 20671 N/1).

Literatur

- /1/ Hofmann, S.: Eine Theorie der behinderten radialen Aufweitung am stirnseitig befestigten Freilauf. Dissertation. Technische Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen, 2019
- /2/ Klügel, N.: Stirnseitige Befestigung von Freiläufen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FVA 704 II, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (erscheint demnächst)
- /3/ Sachs, L.: Angewandte Statistik. Bd. 10, Springer Verlag, 2002
- /4/ Klein, B.: Versuchsplanung-DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. Bd. 4, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2014
- /5/ Gräfensteiner, M.; Leidich, E.: GECKO-TP I: Analyse und Synthese charakterisierender Kennwerte zur funktionsgerechten Gestaltung von Wirkflächenpaaren in reibschlüssigen Verbindungen; Abschlussbericht; In: FVV-Heft Bd. 1077, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., 2015
- /6/ Hahne, H.: Der Einfluss der Oberflächenrauheit auf das gegenseitige Haften von Werkstücken aus Stahl bei Querpressverbindungen, Dissertation, TU Braunschweig, 1969



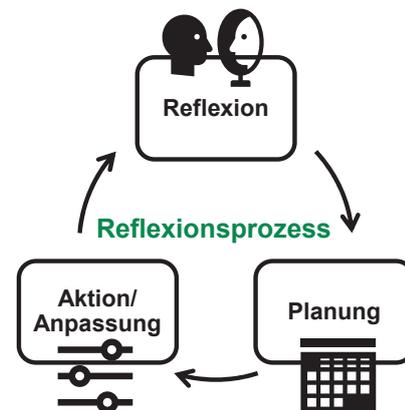
Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung



Reflexion in der Produktentwicklung - Strukturierte Reflexion mithilfe des Reflection Canvas

Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.

Um die Prinzipien der agilen Produktentwicklung zu fördern und Entwickler:innen in agilen Arbeitsweisen zu unterstützen, werden in diesem Beitrag ein strukturiertes Vorgehen für die Reflexion und ausgewählte Reflexionsmethoden vorgeschlagen. Strukturierte Reflexionen sollen dazu beitragen erforderliche Anpassungen bestehender Vorgehensweisen und Methoden in Entwicklungsprojekten zu ermitteln und zu planen. Als praktische Unterstützung wird ein Hilfsmittel - das Reflection Canvas - zur Durchführung strukturierter Reflexion in der Praxis und eine erste Auswahlhilfe für Reflexionsmethoden vorgeschlagen.



To promote the principles of agile product development and to support engineers in agile engineering, this paper proposes a structured procedure for reflection and selected reflection methods. Structured reflections should help to identify and plan necessary adaptations of existing procedures and methods in engineering projects. As practical support, a tool - the Reflection Canvas - for conducting structured reflection in practice and an initial selection guide for reflection methods are proposed.

Ausgangssituation und Problemstellung

Aufgrund zunehmender Digitalisierung und damit verbundener Transformationsprozesse, erfordern erfolgreiche Produktentwicklungen verstärkte disziplinübergreifende Zusammenarbeit, schnelles Reagieren auf interne und externe Veränderungen und eine zielgerichtete Reflexion, um Herausforderungen aus vergangenen Entwicklungsaktivitäten entgegenwirken zu können /1/. Um dieser Forderung nachzukommen, folgen Organisationen zunehmend agilen Management-Frameworks, wie beispielsweise SCRUM. Unter Agilität wird dabei die Fähigkeit verstanden, sich verändernde Produkthanforderungen zu erkennen, zu verstehen und diese Änderungen während der voranschreitenden Produktentwicklung zu berücksichtigen /2/. Agile Arbeitsweisen, insbesondere agile Retrospektiven, helfen die Herausforderungen (z. B. Effizienzverluste in der Kommunikation) des digitalen Wandels zu bewältigen /3/. Jedoch haben erste Erhebungen aus der Praxis gezeigt, dass im ersten Schritt Bewusstsein und Akzeptanz für die Reflexion des eigenen Denkens und Handelns in allen Hierarchieebenen erforderlich ist, um die Reflexion wirksam einsetzen und sich verändernden Situationen anpassen zu können. Reflexion ist als dynamischer Prozess, der aus einem Muster von Aktivitäten

besteht, die durch kontinuierliches Bewusstsein gesteuert werden, zu verstehen /4/. Reflexion verbessert nachweislich Teamleistung, Teaminnovation und Teameffektivität in Entwicklungsprozessen und ist integraler Bestandteil des systematischen Engineerings /5/. West /6/ definiert den Reflexionsprozess als iterativen, dreistufigen Lernprozess, bestehend aus den Phasen Reflexion, Planung und Anpassung. In diesem Prozess rekapitulieren Entwicklerteams oder Entwickler:innen ihre Erfahrungen innerhalb eines bestimmten Szenarios und bewerten diese im aktuellen Kontext neu, um ihr zukünftiges Handeln anzupassen. Der Fokus des Beitrags liegt auf der Unterstützung der Entwickler:innen, die durch Reflexion befähigt werden, den Entwicklungsprozess besser zu verstehen und zukünftige Entwicklungsaktivitäten zu verbessern. Damit Reflexion in der agilen Produktentwicklung erfolgreich angewandt werden kann, werden eine strukturierte Vorgehensweise und passende Reflexionsmethoden benötigt.

Zielsetzung und Fokus

Um Herausforderungen im Produktentwicklungsprozess frühzeitig zu erkennen ist es notwendig, dass Entwicklerteams und Entwickler:innen regelmäßig und wirksam reflektieren und die daraus resultierenden Planungsaktivitäten (z. B. Anwendung neuer Entwicklungsmethoden, Dokumentation des Entwicklungsprozesses und der Verantwortlichkeiten) für zukünftige Entwicklungsprojekte umsetzen. /7/ Anstatt die Vorteile einer systematischen Reflexion zu nutzen, wird in der Praxis oft reagiert und agiert, obwohl die Notwendigkeit zu reflektieren bekannt ist /8/. In diesem Beitrag wird in Anlehnung an Ammersdörfer et al. /7/ ein Reflexionsvorgehen und ein Reflexionshilfsmittel - das Reflection Canvas - vorgestellt und Reflexionsmethoden charakterisiert. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie sollte ein Hilfsmittel zur systematischen Reflexion aufgebaut werden, um Entwickler:innen in Entwicklungsprojekten zu unterstützen?
- Wie sollten Reflexionsmethoden charakterisiert werden, um Entwickler:innen die Methodenauswahl zu erleichtern?

Ziel des Beitrags ist es, Entwickler:innen durch den Einsatz zielgerichteter Reflexion zu unterstützen und den Produktentwicklungsprozess zu verbessern. Durch die strukturierte Reflexion sollen Maßnahmen für zukünftige Entwicklungsprojekte abgeleitet werden, um die Entwicklungsaktivitäten in Zukunft zu verbessern. Dabei soll die Agilität in der Produktentwicklung durch den effektiven Einsatz von Reflexionsmethoden verbessert werden.

Agilität und Reflexion in der Produktentwicklung

Transformationsprozesse führen in der industriellen Praxis dazu, dass der Kontext der Produktentwicklung komplexer wird (z. B. steigende Systemkomplexität) und Veränderungen (z. B. veränderte Kundenanforderungen) häufiger auftreten. Um in

Transformationsprozessen Planungssicherheit zu gewährleisten sind Iterationen aufgrund ihrer Optimierungs- und Konvergenzfähigkeit /9/ im Entwicklungsprozess unerlässlich. Typische Iterationen, wie beispielsweise in Form von Verfeinerung (z. B. Optimierung von sekundären Produktmerkmalen) oder Nachbesserung (z. B. Reagieren auf Fehler im Vorgehen) /10/, sind dabei auf einzelne Aktivitäten oder auch auf einen Gesamtprozess zurückzuführen. Die agile Produktentwicklung bietet durch kürzere Iterationen mehr Flexibilität und verbessert damit die Reaktionsfähigkeit /3/. Agile Arbeitsweisen haben zudem den Vorteil, dass sie die Transparenz und die Kommunikation im Produktentwicklungsprozess verbessern können /11/. Reflexion in Form von Retrospektiven ist ein wichtiger Bestandteil agiler Entwicklungsansätze. Jede Entwicklungsphase umfasst in der Regel Reflexionsaktivitäten unter Beteiligung verschiedener Stakeholder, um zu bewerten, ob das angestrebte Ergebnis der Phase erreicht wurde. Bei agilen Retrospektiven handelt es sich um Teambesprechungen, mit dem Ziel die Zusammenarbeit und die Entwicklungsmethoden in einem Team zu überprüfen und anzupassen. Diese können Entwicklerteams dabei helfen kontinuierliches Lernen und interdisziplinäre Zusammenarbeit zu verbessern. /12/

Reflexion als Lernprozess in der Produktentwicklung

Für eine strukturierte Anpassung von Entwicklungsprozessen und -methoden ist das von Schön /13/ entwickelte Konzept der Teamreflexivität („reflection-in-action“, „reflection-on-action“) relevant. Teamreflexivität kann, wie der von West /6/ beschriebene Reflexionsprozess, als ein iterativer, dreistufiger Prozess (Reflexion, Planung, Anpassung) beschrieben werden, der in Reflexionszyklen über mehrere Arbeitsphasen hinweg wiederholt wird /14, 15/. In Abbildung 1 wird ein in drei Phasen gegliedertes Reflexionsvorgehen vorgeschlagen, in dem in drei unterschiedlichen Dimensionen (Sozial, Prozess, Ziel) reflektiert wird /7/.

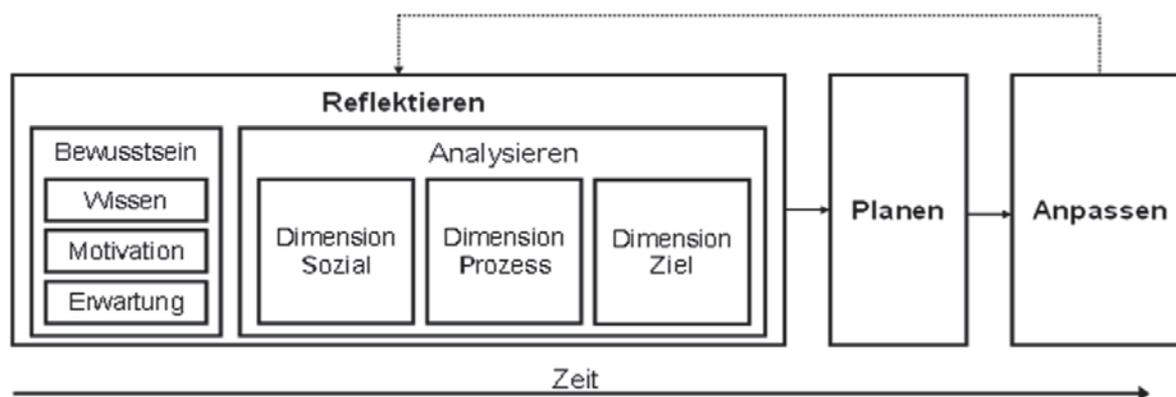


Abbildung 1: Vorgeschlagenes Reflexionsvorgehen basierend auf /4/ und /6/

Mit dem aufgezeigten Reflexionsvorgehen werden die Prozessschritte der Reflexion klar definiert und Entwickler:innen eine Hilfestellung bei der Anwendung effektiver Reflexion zur Verfügung gestellt. Allerdings ist es vor der Durchführung der Reflexionsaktivität von Vorteil, wenn Entwickler:innen bereits ein Bewusstsein für Reflexion entwickelt haben und motiviert sind zu reflektieren. Daher ist es notwendig

Entwicklern ein strukturiertes Reflexionsvorgehen an die Hand zu geben und klar aufzuzeigen, welchen Mehrwert das Vorgehen hat und wie die in der Planungsphase erarbeiteten Maßnahmen in zukünftigen Entwicklungsprojekten umgesetzt werden. Weixelbaum /16/ zeigt jedoch, dass vorhandene Lernprozesse bzw. Trainingsprogramme zur Förderung von Reflexion nur selten situative oder motivierende Faktoren wie beispielsweise Reflexionsgelegenheiten oder die Überwindung von Reflexionsbarrieren berücksichtigen /16/. Exemplarische Reflexionshürden lassen sich aus Interviews und Reflexionsworkshops mit Industriepartnern aus dem KMU-Umfeld im Rahmen eines Forschungsprojektes ableiten:

- Angst vor Veränderung und Mehraufwand
- Geringe Motivation zu reflektieren aufgrund hohen Zeitdrucks durch das Tagesgeschäft
- Wechselwirkungen im sozio-technischen System (Prozesse, Methoden, Tools, Organisation)
- Kommunikationsbarrieren zwischen Management, Entwicklerteam und Entwickler:innen
- Effizienzverluste im Informationsfluss interdisziplinärer Teams
- Mangelnde Umsetzung von Reflexionsmaßnahmen in zukünftigen Entwicklungsprojekten

Um diese Reflexionsbarrieren zu überwinden ist die Unterstützung der Entwickler:innen und eine klare Vermittlung des Mehrwerts von Reflexion im Produktentwicklungsprozess notwendig, um Akzeptanz und Bewusstsein für Reflexion in der Produktentwicklung in allen Hierarchieebenen zu erlangen. Weixelbaum /16/ zeigt durch die Analyse bestehender Ansätze auf, dass in der Produktentwicklung ein Trainingskonzept oder Reflexionsmethoden fehlen, welche Entwickler:innen auch im Tagesgeschäft dazu befähigen, selbstständig, flexibel und zielführend zu reflektieren. Daher sind die Unterstützung der Entwicklerteams im Reflexionsvorgehen und in der Durchführung von Reflexionsmethoden sowie die Förderung der Reflexionskompetenz wichtige Bestandteile eines erfolgreichen Lern- und Veränderungsprozesses in der Produktentwicklung. /16/

Charakterisierung von Reflexionsmethoden in der Produktentwicklung

Um das vorgeschlagene Reflexionsvorgehen (vgl. Abbildung 1) erfolgreich anwenden zu können, wird ein Hilfsmittel zur Strukturierung und effizienten Durchführung der Reflexion – das Reflection Canvas /7/ – in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt. Um eine spezifische Planung und Durchführung der Reflexion zu ermöglichen, wird als Grundlage zur Strukturierung von Reflexion das RECAP-Framework nach Inkermann et al. /1/ in Betracht gezogen. Es zielt darauf ab, die Planung spezifischer Ziele, Stakeholder, Objekte, Prozesse und Zeitpunkte der Reflexion innerhalb von Entwicklungsprojekten zu unterstützen /1/. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt des RECAP-Frameworks /1/.

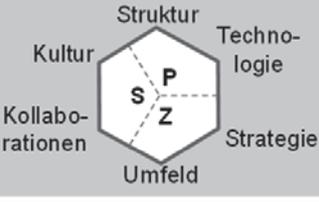
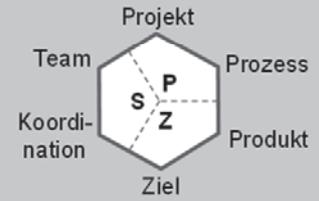
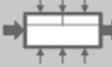
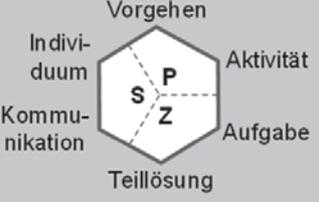
	RECAP-1: WARUM? Reflexionsziel	RECAP-2: WER? Reflektierende	RECAP-3: WAS? Reflexionsobjekte
STRATEGISCHE REFLEXION	<p>Verbesserung & Anpassung</p>  <p>Unternehmensspezifischer Referenzprozess</p>	<p>Obere und mittlere Führungsebene</p>	
TAKTISCHE REFLEXION	<p>Verbesserung & Anpassung</p>  <p>Projektspezifischer Prozess</p>	<p>Prozessmanagement Projektmanagement</p>	
OPERATIVE REFLEXION	<p>Verbesserung & Anpassung</p>  <p>Individueller Prozessschritt</p>	<p>Projektteammitglieder</p>	

Abbildung 2: Ausschnitt RECAP-Framework basierend auf /1/

In den Spalten der Abbildung 2 werden Reflexionsziel, Reflektierender und Reflexionsobjekt unterschieden und die Zeilen stellen die unterschiedlichen Ebenen der Reflexion (strategisch, taktisch, operativ) dar. Die Reflexionsobjekte werden nochmals in die drei Dimensionen der Reflexion (Sozial, Prozess, Ziel) gegliedert. Dabei bezieht sich die soziale Dimension auf der strategischen Reflexionsebene beispielsweise auf die Kultur der Organisation oder abteilungsübergreifende Kollaborationen. Unter der prozessualen Dimension ist wiederum auf operativer Reflexionsebene das Vorgehen oder die Aktivität eines Individuums im Entwicklungsprozess zu verstehen. Die Zieldimension betrachtet auf taktischer Reflexionsebene das zu entwickelnde Produkt oder das Ziel der Produktentwicklung auf Teamebene. Bei der Durchführung von Reflexion ist der Reflexionszeitpunkt ebenfalls relevant. Wie bereits im Zusammenhang mit Teamreflexivität erwähnt, wird in Anlehnung an Schön /13/ bei der Charakterisierung der Reflexionsmethoden (vgl. Abbildung 3) auch nach „reflection-in-action“ und „reflection-on-action“ unterschieden.

Die Phasen des vorgeschlagenen Reflexionsvorgehens (vgl. Abbildung 1) werden den Kriterien zur Charakterisierung der Reflexionsmethoden (vgl. Abbildung 3) wie folgt zugeordnet:

- **Phase „Reflektieren - Bewusstsein“:** Name, Beschreibung, Ziel der Methode, Vorwissen
- **Phase „Reflektieren - Analysieren“:** Reflexionsebene, Zeitpunkt der Reflexion
- **Phase „Planen“:** Dokumentationsform, zeitlicher Planungsrahmen (kurz-, mittel-, langfristig)
- **Phase „Anpassen“:** Ergebnis der Methode

Die praktische Reflexion kann durch Reflexionsmethoden (z. B. Teamreflexion) unterstützt werden. Bei der Teamreflexion nach West /6/ steht das gemeinsame Denken und Handeln im Team im Vordergrund und demnach erfolgt eine gemeinsame Untersuchung von Aufgaben, Methoden, Ressourcen und teambezogenen Leistungen, aber auch der Einzelbeiträge zum Rückblick auf vergangene Ereignisse /6/. Damit die Reflexionsmethoden auch erfolgreich im Reflexionsprozess angewandt werden können, werden auf Basis des RECAP-Frameworks /1/ Kriterien zur Charakterisierung der Reflexionsmethoden definiert (vgl. Abbildung 3). Die ausgewählten Reflexionsmethoden basieren auf Literaturrecherchen im Rahmen eines Forschungsprojektes und dienen als erste Übersicht für die Auswahl einer geeigneten Reflexionsmethode. Die Auswahlhilfe soll Entwickler:innen die Möglichkeit bieten einen ersten Überblick möglicher Methoden zur Reflexion zu erhalten und deren Auswahl für das individuelle Entwicklungsszenario zu erleichtern.

Kriterien zur Charakterisierung von Reflexionsmethoden													
Referenz	Name	Beschreibung	Ziel	Ergebnis	Vorwissen		Reflexionsebene			Zeitpunkt		Dokumentation	
					relevant	nicht relevant	strategisch (organisatorisches Level)	taktisch (Teamlevel)	operational (individuallevel)	reflection-in-action	reflection-on-action	schriftlich	mündlich
West, 2020	Team-reflexion	Kollektive Untersuchung von Aufgaben, Methoden, Ressourcen und teambezogenen Leistungen, die sowohl die Planung, Analyse, explizite Nutzung von Wissen und einen Rückblick auf vergangene Ereignisse mit Selbsterkenntnis beinhalten.	Gemeinsames Denken und Handeln im Team (Einzelbeiträge, kollektive Prozesse) fördern	Gesamtbild an Zielen, Strategien, Plänen, Erfolgen, Herausforderungen und Rahmenbedingungen innerhalb eines Entwicklungsteams in einem Entwicklungsprojekt		■		■		■		■	■
White et al., 2012	Journaling oder Tagebuch à la "3 gute Dinge"	An jedem Abend bzw. Start in den Feierabend ein paar Minuten Zeit nehmen und überlegen, was an diesem Tag gut funktioniert hat, positiv überraschend war, erfolgreich gemeistert wurde, Freude bereitet hat.	Eigenständiges reflektieren fördern und die Motivation der Entwickler durch aktives Auseinandersetzen mit Lernerfolgen steigern	Schriftensammlung als Alltagsbegleiter für den einzelnen Entwickler		■			■			■	
Blickens-derfer et al., 1997	Team self-correction	Selbstverbesserung durch Reflexion wird als natürlicher Mechanismus verstanden, durch den Teammitglieder ihre Team Einstellungen, Verhaltensweisen und Kognitionen ohne Eingreifen von außen korrigieren. Die Methode wird als strukturiertes Feedbacks im Team bezeichnet und verwendet mentale Modelle im Team.	Positive Auswirkungen auf das Denken und Handeln in der Gruppe, soll den Teamerfolg erhöhen	Berücksichtigung der Perspektiven aller Teammitglieder führt zu vollständigerem und objektivem Bild vergangener Ereignisse. Durch mentale Modelle im Team werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Aufgabenverständnis herausgearbeitet.		■		■		■		■	■
Tisdale, 1998	Selbst-reflexion	Kritische Analyse und Betrachtung eines Protokolls der eigenen Aktivitäten unter Zuhilfenahme von Rekapitulationsprozessen (Rekapitulation, Analyse, Rekonstruktion).	Selbstreflexion als Diagnosefunktion, um eigenes Denken und Handeln in Relation zu Erfahrungswerten oder angestrebten Zielen zu beurteilen.	Gedächtnisprotokoll, das es ermöglicht den Rückgriff und Rekonstruktion bewusst werden zu lassen. (Annahme nach Tisdale, 1998: Selbstreflexion impliziert Bewusstsein)		■						■	

Abbildung 3: Vorgeschlagene Kriterien zur Charakterisierung und Auswahl von Reflexionsmethoden und exemplarische Methoden

Das Reflection Canvas – Vorgehen und Leitfragen

Das Reflection Canvas kann sowohl am Ende eines Reflexionsprozesses als auch während (z. B. zweiwöchentlich) der Entwicklung eines Produktes eingesetzt werden. Dabei dient das Hilfsmittel als Dokumentationsgrundlage und zur Vorgabe einer Reflexionsstruktur, die in drei Schritten erfolgt: Feedback, Reflexion, Planung. Die einzelnen Phasen werden durch die Beantwortung ausgewählter Leitfragen bearbeitet. Die Leitfragen beziehen sich auf die Reflexionsobjekte und leiten sich aus dem RECAP-Framework /1/ ab. Diese können im Entwicklerteam durch einen Moderator abgefragt oder in Einzelarbeit beantwortet und dokumentiert werden. Gestartet wird mit einer einleitenden Einstiegsreflexion (Feedback), die sich auf die Leistung (z. B. Was wurde erreicht?) und den Prozess (z. B. Wie wurde die Aufgabe erledigt?) bezieht. Im zweiten Abschnitt, der Reflexion, beziehen sich die Leitfragen z. B. auf die Teamzusammensetzung, die Vorteile oder Herausforderungen der eingesetzten Entwicklungsmethoden oder die Zielerreichung. Im letzten Abschnitt „Planung“ beziehen sich die Leitfragen auf die Maßnahmen und Planungsaktivitäten für zukünftige Entwicklungsprojekte, wie z. B. Tools, Kommunikationsmaßnahmen oder neue Entwicklungsmethoden. In Abbildung 4 werden die ausgewählten Leitfragen im Reflection Canvas dargestellt.

Das Reflection Canvas – Exemplarische Anwendung

Das Reflection Canvas ist im Rahmen von Reflexionsworkshops innerhalb eines Forschungsprojekts erstmalig als Hilfsmittel eingesetzt worden, um den Einsatz von neuen und angepassten Entwicklungsmethoden (z. B. Anforderungsliste, Funktionsstrukturanalyse) in einem Entwicklungsprojekt zu reflektieren. Dabei sind in Reflexionsworkshops am Ende des Entwicklungsprozesses (Pilotprojekt) die genannten Leitfragen an mehrere Organisationen (je Team ca. 10 Teammitglieder) gestellt und die Antworten zusammengefasst in das Reflection Canvas übertragen worden. Abbildung 5 fasst die exemplarischen Ergebnisse der Industriepartner zusammen. Die Gemeinsamkeiten dabei waren, dass die Industriepartner die angewandten Entwicklungsmethoden als hilfreich im Entwicklungsprozess empfanden und diese auch zukünftig nutzen möchten. Unterschiedlich war, dass in einem Entwicklungsprozess das Management eine sehr zentrale Rolle im Gesamtunternehmen einnimmt, sodass das Entwicklerteam in seiner Entscheidungsfreiheit sehr eingeschränkt ist. Dies führte zu Zielabweichungen, häufigen Anpassungen während des Entwicklungsprozesses und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Pilotprojektes. Als Gesamtfeedback zu den Reflexionsworkshops wurde vor allem die Möglichkeit der Dokumentation und die Maßnahmenplanung für zukünftige Entwicklungsprojekte positiv bewertet.

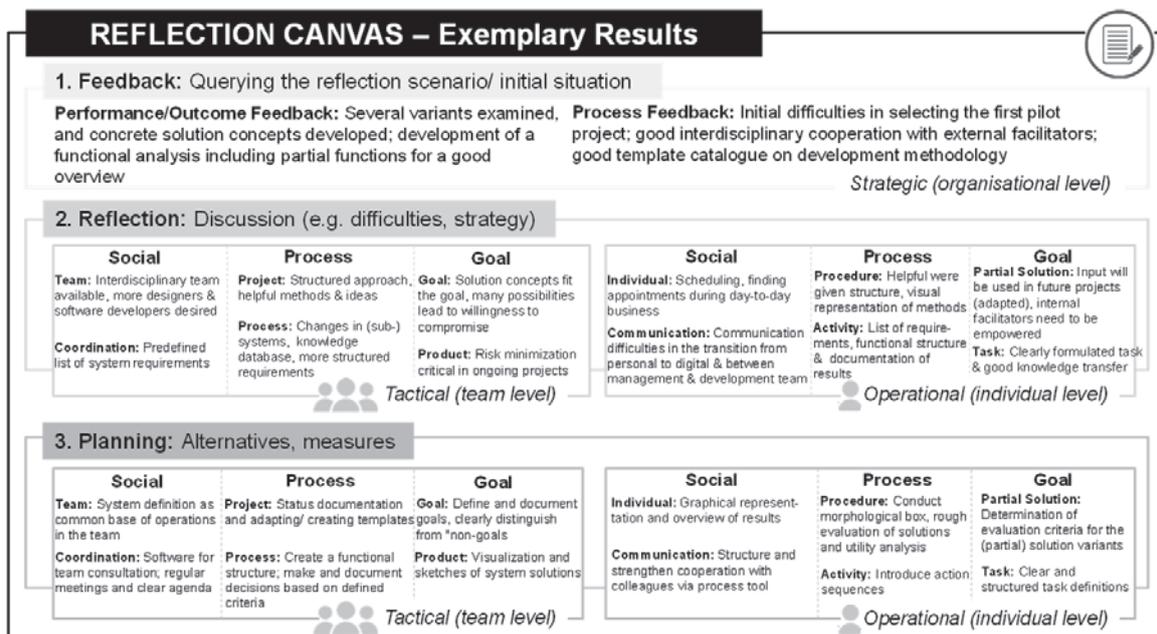


Abbildung 5: Reflection Canvas mit beispielhaft, zusammengefassten Ergebnissen aus der industriellen Praxis basierend auf /7/

Zusammenfassung und Ausblick

Um die Prinzipien der agilen Produktentwicklung zu fördern, Entwickler:innen in der agilen Entwicklung zu unterstützen und Veränderungsbereitschaft im Produktentwicklungsprozess zu fördern, wird in diesem Beitrag vorgeschlagen strukturierte Reflexion anzuwenden, um den Produktentwicklungsprozess zu verbessern. Im ersten Schritt wird der Begriff Reflexion definiert und der Zusammenhang zwischen Agilität und Reflexion dargestellt. Des Weiteren wird die Reflexion als Lernprozess in der Produktentwicklung betrachtet und Kriterien zur Charakterisierung von Reflexionsmethoden vorgeschlagen, die dem Reflexionsvorgehen zugeordnet werden. Anschließend werden vier Reflexionsmethoden beispielhaft in die Übersicht eingeordnet und die Charakterisierung vorgenommen. Als Hilfsmittel für die zielgerichtete Reflexion wird das Reflection Canvas vorgestellt. In diesem Beitrag wird das Reflection Canvas sowohl in der Struktur als auch in der Anwendung beschrieben und stellt abschließend ein vollständig befülltes Canvas mit Inhalten aus der industriellen Praxis dar. In weiteren Forschungsarbeiten ist geplant das Reflection Canvas während verschiedener Entwicklungsprojekte in der Praxis anzuwenden und sowohl den Zeitpunkt der Reflexion als auch die Akzeptanz und Motivation zu reflektieren im Unternehmenskontext zu evaluieren. Des Weiteren sollen dem vorgeschlagenen Reflexionsvorgehen mehr Reflexionsmethoden zugeordnet werden, die die Agilität und Transparenz im Produktentwicklungsprozess fördern. Die Auswahlhilfe für Reflexionsmethoden wird weiter ausgearbeitet und in Reflexionssessions ausgewählter Entwicklungsprojekte evaluiert.

Danksagung

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

Literatur

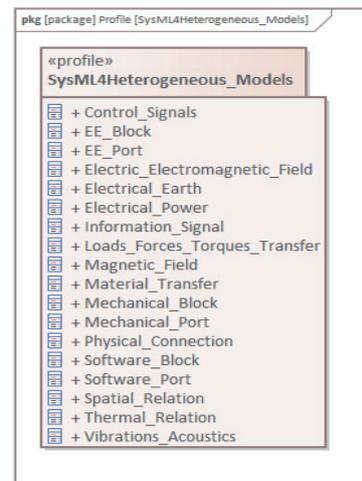
- /1/ Inkermann, D.; Gürtler, M. und Seegrün, A. (2020): RECAP – A framework to support structured reflection in engineering projects; In proceedings der International Design Conference DESIGN 2020, Vol. 1, S. 597–606. DOI: <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.99>
- /2/ Rebentisch, E.; Conforto, E. C.; Schuh, G.; Riesener, M.; Kantelberg, J.; Amaral, D. C. und Januszek, S. (2018): Agility factors and their impact on product development performance; In proceedings der International Design Conference DESIGN 2018, 21.-24. Mai 2018, Dubrovnik, Kroatien, S. 893-904. DOI: <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0236>
- /3/ Duehr, K., Efremov, P., Heimicke, J., Teitz, E. M., Ort, F., Weissenberger-Eibl, M. und Albers, A. (2021): The Positive Impact of Agile Retrospectives on the Collaboration of Distributed Development Teams – A Practical Approach on the Example of Bosch Engineering GmbH', in Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21), Gothenburg, Sweden, 16-20 August 2021. DOI: 10.1017/pds.2021.568
- /4/ Jobst, B., Thoring, K., & Badke-Schaub, P. (2020): Introducing a tool to support reflection through sketching and prototyping during the design process; In proceedings of International Design Conference DESIGN 2020, Vol. 1, S. 207–214. DOI: <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.263>
- /5/ Eder, W.E. und Hubka, V. (2004): Reflection about Reflective Practice; In proceedings der International Design Conference DESIGN 2004, 18.-21. Mai 2004, Dubrovnik, Kroatien.
- /6/ West, M. A. (2000): Reflexivity, revolution, and innovation in work teams; In *Beyerlein M.M.; Johnson D. und Beyerlein S.T. (Eds.), Product development teams*, Vol. 150, S. 1–29. Stanford: CT: JAI Press.
- /7/ Ammersdörfer, T., Tartler, D., Kauffeld, S. und Inkermann, D. (2022): Reflection Canvas – An Approach to Structure Reflection Activities in Engineering Design; In proceedings of NordDesign2022, 16.-19. August 2022, Kopenhagen, Dänemark. DOI: 10.35199/NORDDDESIGN2022.29
- /8/ Otte, K.-P., Konradt, U., & Oldeweme, M. (2018): Effective Team Reflection: The Role of Quality and Quantity; In *Small Group Research*, 49(6) (49 (6), S. 739–766). DOI: <https://doi.org/10.1177/1046496418804898>

- /9/ Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie; Berlin u.a.: Springer-Verlag.
- /10/ VDI. Entwicklung technischer Produkte und Systeme. (VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1 und Blatt 2). Berlin: Beuth Verlag: Beuth Verlag.
- /11/ Atzberger, A., Nicklas, S. J., Schrof, J., Weiss, S. und Paetzold, Kristin (2020): Agile Entwicklung physischer Produkte. Eine Studie zum aktuellen Stand in der industriellen Praxis. Neubiberg: Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München.
- /12/ Derby, E. und Larsen, D. (2012): Agile retrospectives. Making good teams great. Bookversion: P7.0. Dallas, Texas, Raleigh, North Carolina: The Pragmatic Bookshelf (The pragmatic programmers).
- /13/ Schön, D. (1987): *Educating the Reflective Practitioner, Towards a New Design for Teaching and Learning in the Professions*. San Francisco: Jossey-Bass.
- /14/ Gabelica, C., van den Bossche, P., Maeyer, S. de, Segers, M., und Gijsselaers, W. (2014): The effect of team feedback and guided reflexivity on team performance change; In *Learning and Instruction*, Vol. 34, S. 86–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.09.001>
- /15/ Konradt, U., Otte, K.-P., Schippers, M. C., und Steenfatt, C. (2016). Reflexivity in Teams: A Review and New Perspectives. In *The Journal of Psychology* (150(2), pp. 153–174). DOI: <https://doi.org/10.1080/00223980.2015.1050977>
- /16/ Weixelbaum, I. (2016): Mit Teamreflexion zum Teamerfolg: Analyse, Modellierung und gezielte Förderung kollektiver Reflexionsprozesse (Diss.); Schriften aus der Fakultät Humanwissenschaften der Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Band 23, University of Bamberg Press, Bamberg.

Erzeugung von SysML-Stereotypen zur Beschreibung logischer Systemarchitekturen im Model-based Systems Engineering

Schumacher, T.; Inkermann, D.

Aktuelle Systementwicklungen erfordern disziplinspezifische und disziplinübergreifende Modellierungstechniken. Für disziplinübergreifende Modellierungstechniken wird häufig die Systems Modeling Language (SysML) genutzt. Da es sich bei der SysML um eine universell einsetzbare Modellierungssprache handelt, ist diese für konkrete Entwicklungssituationen oft sehr abstrakt. Dieser Beitrag erläutert die gezielte Erweiterung der SysML durch Stereotypen und wendet diese für die Erstellung heterogener Produktmodelle an. Außerdem werden zukünftige Forschungsarbeiten vorgestellt.



Current system developments require both discipline-specific and cross-domain modelling techniques. Cross-domain modelling techniques preferably use the Systems Modeling Language (SysML). Since SysML is a universally applicable modelling language, it is often very abstract for specific development situations. This article explains the targeted extension of SysML using SysML element stereotypes and their application within heterogeneous product models. Additionally, future research fields will be presented.

Einleitung und Problemstellung

Moderne Systeme sind durch ein dynamisches Verhalten, starke Vernetzung mit Nachbarsystemen, Anbindung an das Internet und die Nutzung von On-Demand-Diensten gekennzeichnet /1/. Die Entwicklung dieser Systeme erfordert die Kollaboration unterschiedlicher Entwicklungsdisziplinen, welche üblicherweise auf disziplinspezifische Entwicklungsmodelle zurückgreifen. Eine erfolgreiche Systementwicklung bedarf zusätzlich einer gesamthaften Systembetrachtung, die durch disziplinübergreifende Modellierungstechniken unterstützt wird /2/. Dazu existieren eine Vielzahl verschiedener Modellierungstechniken, siehe /3/, welche zumeist auf die Modellierungssprache *Systems Modeling Language* (SysML) zurückgreifen. Bei der SysML handelt es sich um eine grafische und universell einsetzbare Modellierungssprache, die für jegliche Systeme, wie Automobil- oder Luft- und Raumfahrtssysteme, Anwendung finden kann /4/. Die universellen Einsatzmöglichkeiten der SysML stellen gleichzeitig auch Herausforderungen für die Anwendung in einer konkreten Domäne dar, da die allgemeingültigen Modellierungssprachen oft die konkreten Fragestellungen nicht im notwendigen

Detaillierungsgrad abbilden können. Um dieser Problemstellung zu begegnen, bietet die SysML die Möglichkeit spezifische Elementstereotypen und Profile für konkrete Anwendungsfälle zu definieren.

Zielstellung und Aufbau dieses Beitrags

Dieser Beitrag betrachtet die Erweiterung der SysML durch Definition von Elementstereotypen zur Erzeugung heterogener Produktmodelle. Die Anwendung heterogener Produktmodelle und die Integration von Elementstereotypen unterstützt bspw. bei der Beschreibung logischer Systemarchitekturen mechatronischer Systeme, aufgrund einer detaillierteren Beschreibung der Systemelemente und Schnittstellen. Dazu werden im folgenden Abschnitt der Begriff des heterogenen Modells und die Vorgehensweisen zur Erzeugung von SysML-Stereotypen erläutert. Anschließend werden allgemeingültige SysML-Modellelemente identifiziert und erforderliche Erweiterungen für den Anwendungsfall *Beschreibung logischer Systemarchitekturen mechatronischer Systeme* erarbeitet. Abschließend werden die erzeugten Modellelementstereotypen an einem Beispiel in Form eines heterogenen Modells angewendet.

Grundlagen und Stand der Technik

Dieser Abschnitt erläutert die Anwendung heterogener Produktmodelle innerhalb des Model-based Systems Engineerings (MBSE) und stellt die notwendigen Grundlagen der Erzeugung von SysML-Stereotypen vor.

Anwendung heterogener Produktmodelle

Heterogene Modelle bieten die Möglichkeit Partialmodelle oder Modellelemente unterschiedlicher Modelltypen in eine Modellpräsentation zu integrieren /5/. Beispielsweise können Funktionen, Wirkprinzipien, Systemelemente sowie Relationen und Anforderungen in einem Modell zusammengeführt werden /6/. Abbildung 1 stellt ein beispielhaftes heterogenes Modell vor, welches sowohl Modellelemente der SysML als auch CAD-Partialmodelle beinhaltet.

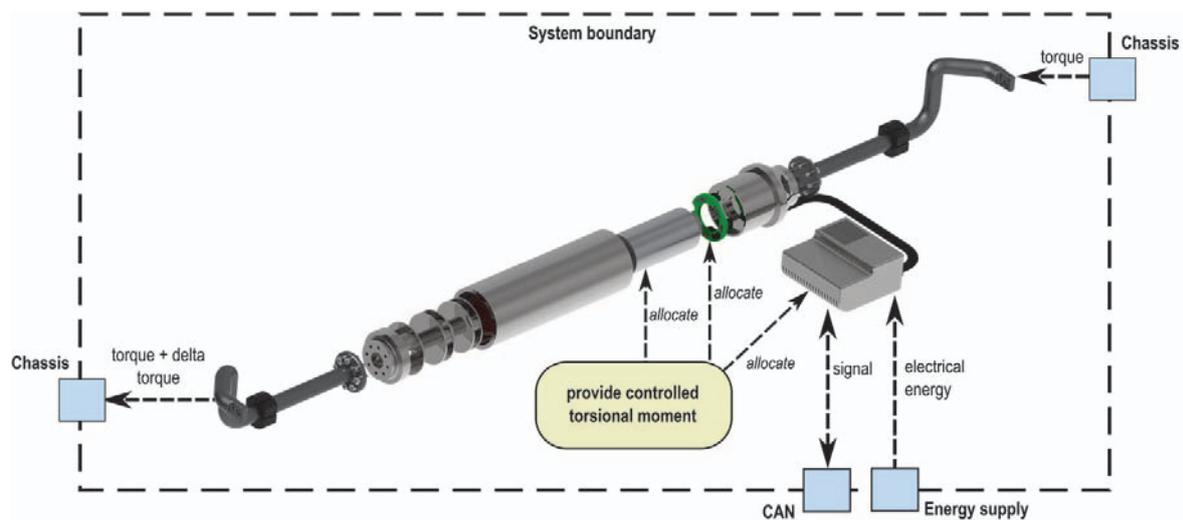


Abbildung 1: Visualisierung eines heterogenen Modells, aus /2/

Zielstellung heterogener Produktmodelle ist es, unterschiedliche Modellelemente für konkrete Fragestellung zu kombinieren, um aussagekräftige Modelle zu generieren. Das heterogene Produktmodell, dargestellt in Abbildung 1, adressiert zwei konkrete Fragestellungen.

1. Die Integration einer Systemgrenze, sowie notwendige Schnittstellen und Relationen zwischen SysML-Elementen und CAD-(Partial)Modellen ermöglichen eine detaillierte Beschreibung der Systemschnittstellen. Dies kann beispielsweise während der Integration des Systems in das übergeordnete System (in diesem Beispiel: das Fahrzeugchassis) unterstützen.
2. Die Integration funktionaler Produktbeschreibungen (gelbes Oval) und deren Allokation zu den realisierenden Systemelementen unterstützt bei der funktionalen und räumlichen Produktpartitionierung.

Die Anwendung heterogener Modelle für konkrete Fragestellungen innerhalb des Model-based Systems Engineerings erfordert die Erweiterung der allgemeinen SysML-Modellelemente. Daher werden im folgenden Abschnitt eine Vorgehensweise zur Erzeugung von Elementstereotypen eingeführt und anschließend ausgewählte SysML-Elemente für den Anwendungsfall *Beschreibung logischer Systemarchitekturen* erweitert.

Vorgehensweise zur gezielten Erweiterung der SysML für konkrete Anwendungsfälle

Die SysML schlägt für die Modellierung von Systemanforderungen, Systemverhalten und Systemaufbau verschiedene Modell- bzw. Diagrammtypen sowie Modellelemente vor. Für eine gezielte Erweiterung der SysML werden sogenannte Stereotypen verwendet. Stereotypen erweitern bestehende SysML-

Modellelemente um zusätzliche Eigenschaften (Properties) sowie (Zwangs)Bedingungen (Constraints) und werden in Profilen gruppiert /4/. In einem Profil werden die konkreten Elementstereotypen mit den klassischen SysML-Modellelementen, welche eine jeweilige Metaklasse darstellen, verknüpft. Das konkrete Vorgehen zur Erweiterung der SysML durch Stereotypen kann bspw. bei Friedenthal et al. /4/ oder Weilkiens /7/ eingesehen werden.

Erzeugung von SysML-Elementstereotypen zur Beschreibung logischer Systemarchitekturen

Dieser Beitrag wendet das Vorgehen zur Erzeugung von SysML-Stereotypen für den Anwendungsfall *Beschreibung logischer Systemarchitekturen* an. Eine logische Architektur beinhaltet die dekomponierten logischen Systemelemente und beschreibt die grundsätzliche Systemstruktur /8/. Zentrale Grundlage für eine logische Architektur sind die Systemfunktionen (funktionale Architektur), welche das Systemverhalten beschreiben. Innerhalb der Architekturentwicklung erfolgt eine Zuweisung der Systemfunktionen zu den logischen Systemelementen, welches eine wichtige Grundlage für spätere Realisierungsentscheidungen darstellt. Demnach sollten logische Architekturen möglichst lösungsneutral beschrieben sein.

Zur Beschreibung einer logischen Systemarchitektur können folgende SysML-Elemente verwendet werden: SysML::Block, SysML::Port und SysML::Connector. Ein SysML::Block beschreibt dabei ein Systemelement einschließlich dessen Eigenschaften. SysML::Ports dienen der Beschreibung von Schnittstellen zwischen den Systemelementen und zur Umwelt. Eine Beschreibung der Interaktionen bzw. Relationen zwischen Systemelementen kann beispielsweise durch das Element SysML::Connector erfolgen.

Für eine Beschreibung der Systemstruktur einschließlich der Schnittstellen ist es für mechatronische Systeme wesentlich eine disziplinspezifische Zuordnung der Systemelemente (SysML::Block) und der Schnittstellen (SysML::Port) vorzunehmen, da je nach Disziplin unterschiedliche Elementeigenschaften beschrieben werden müssen. Daher wurden für das Modellelemente SysML::Block Stereotypen für die Mechatronik-, Mechanik-, Elektrik/Elektronik- und Softwaredisziplin angelegt. Gleichzeitig erfordert eine erfolgreiche Entwicklung mechatronischer Systeme auch eine detaillierte Beschreibung der System(elemente)schnittstellen. Um eine detaillierte Schnittstellenbeschreibung einschließlich der erforderlichen Schnittstelleneigenschaften vornehmen zu können, wurde das Element SysML::Port ebenfalls um disziplinspezifische Stereotypen (Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software) erweitert. Die eingeführten Stereotypen sind in der Abbildung 2 visualisiert.

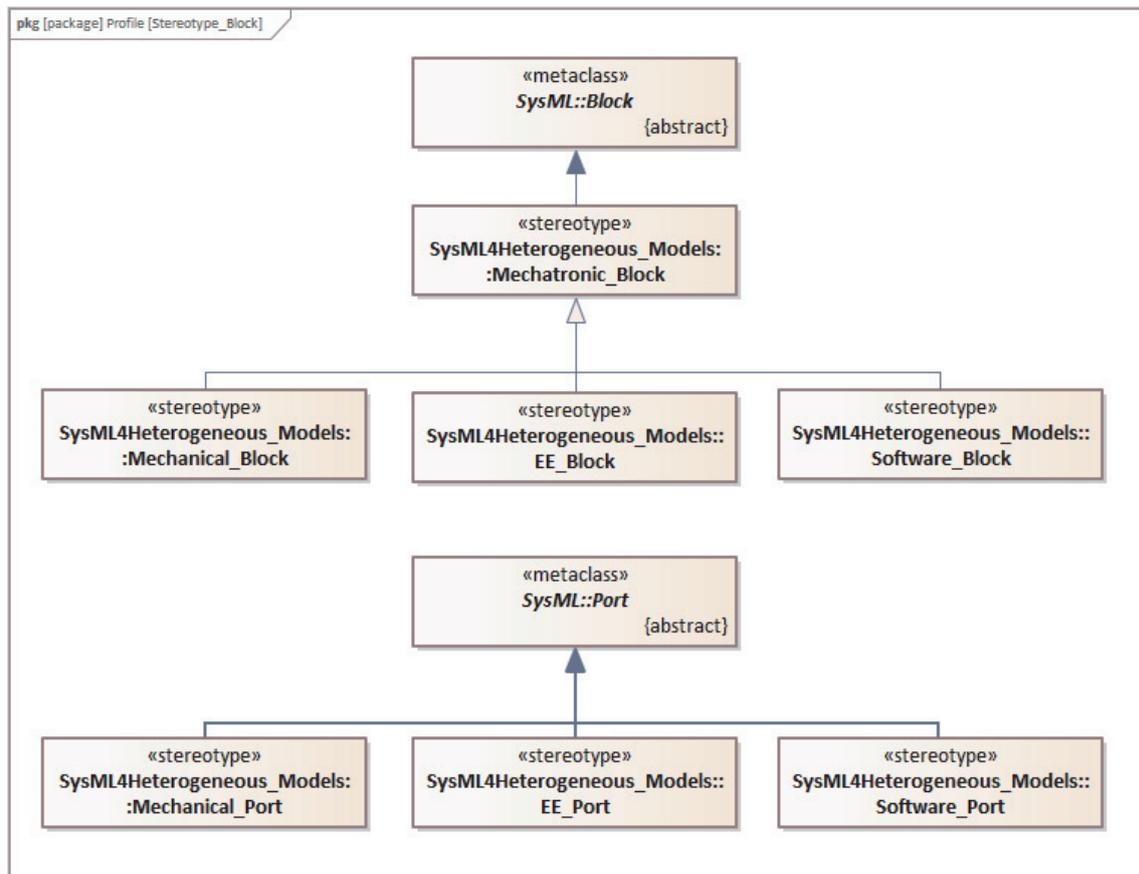


Abbildung 2: Erzeugung von disziplinspezifischen SysML::Block und SysML::Port Stereotypen

Zur Beschreibung einer logischen Systemarchitektur, müssen zusätzlich die Relationen zwischen den Systemelementen berücksichtigt werden. Hierfür stellt die SysML beispielsweise den Verknüpfungstyp SysML::Connector bereit. Um die Relationen zwischen disziplinspezifischen Systemelementen (SysML::Block) und Schnittstellen (SysML::Port) im ausreichenden Detaillierungsgrad beschreiben zu können, werden, basierend auf /9/, verschiedene Verknüpfungsarten unterschieden und als SysML::Connector Stereotypen angelegt, siehe Abbildung 3.

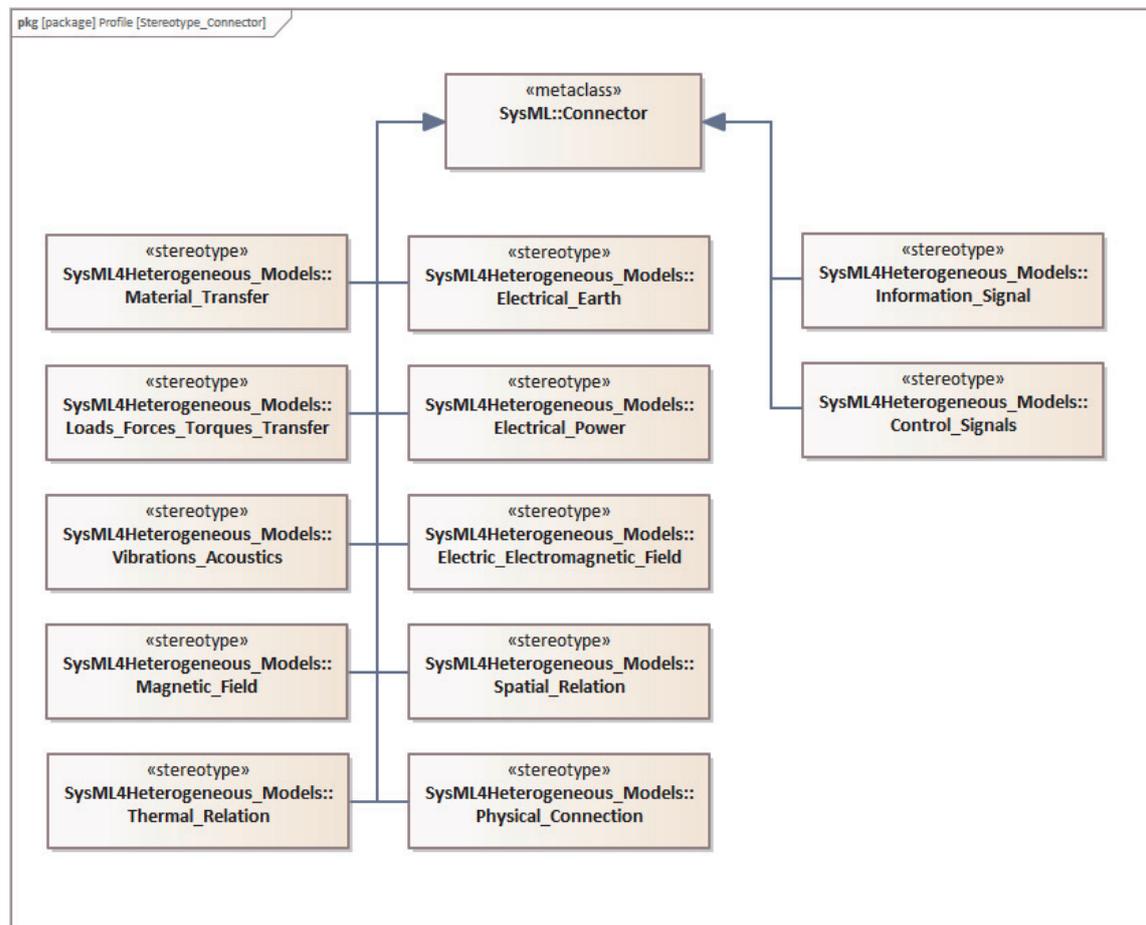


Abbildung 3: Erweiterung SysML::Connector um ausgewählte Stereotypen

Anhand der eingeführten Modellelementstereotypen kann eine detaillierte Beschreibung der Systemarchitektur vorgenommen werden. Der Folgeabschnitt stellt dies anhand eines Anwendungsbeispiels dar.

Anwendung von SysML-Elementstereotypen zur Beschreibung der logischen Systemarchitektur am Beispiel elektromechanische Wankstabilisierung

Die Evolution einer logischen Systemarchitektur basiert auf den definierten Systemanforderungen und einer funktionalen Systembeschreibung /10/. Abbildung 4 stellt daher diese verschiedenen Modellelemente beispielhaft in einer Präsentation (Modell) am Beispiel der elektromechanischen Wankstabilisierung dar. Gleichzeitig beinhaltet das Modell die eingeführten Modellelementstereotypen, um die Schnittstellen zwischen dem System und der Umwelt zu beschreiben.

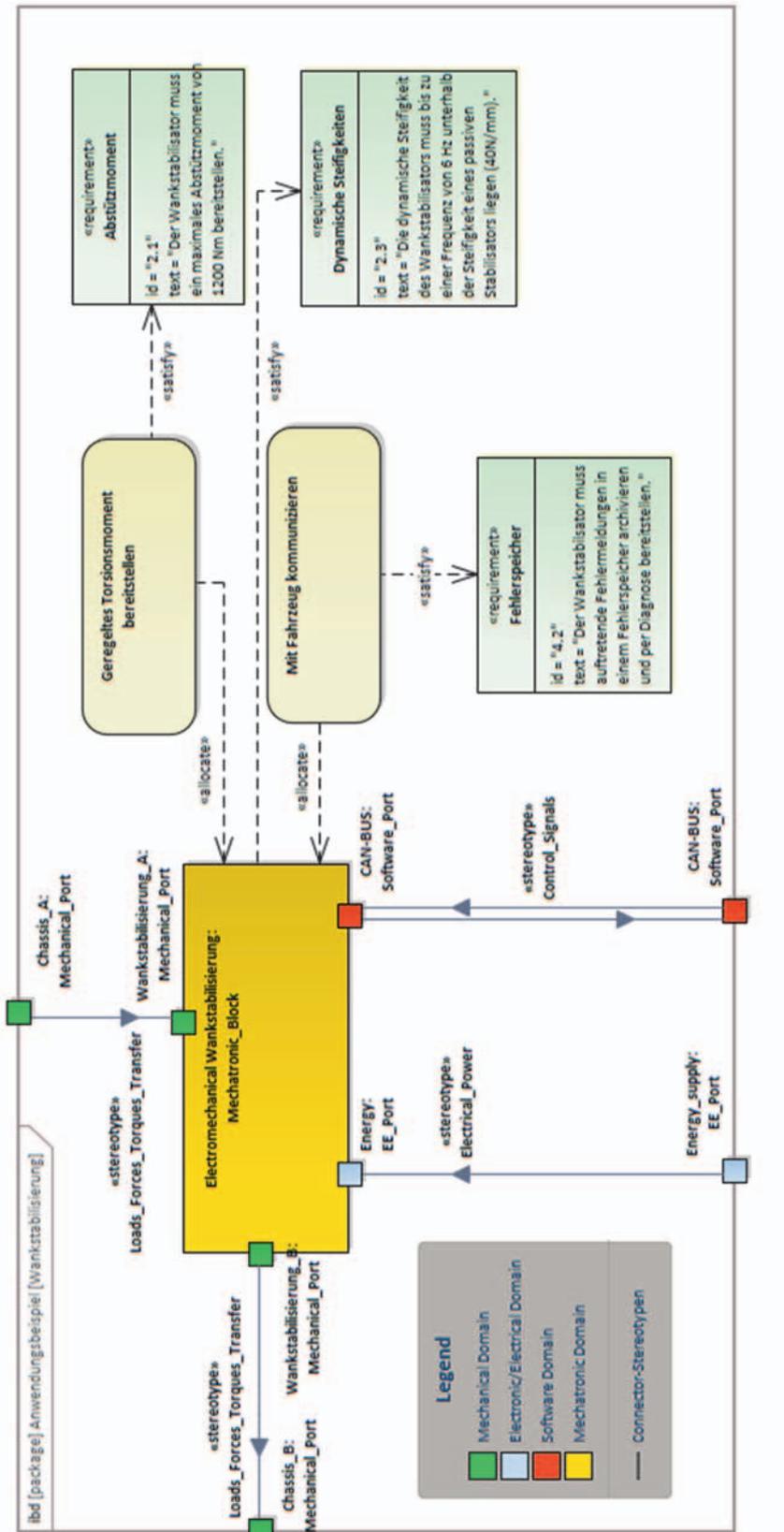


Abbildung 4: Heterogenes Produktmodell am Beispiel Wankstabilisierung

Entsprechend der Erläuterung (Abschnitt *Anwendung heterogene Produktmodelle*) stellt Abbildung 4 ein heterogenes Systemmodell dar, da unterschiedliche Elementtypen (Anforderungen, funktionale- und strukturelle Systembeschreibungen) in eine Präsentation integriert sind. Diese abstrakte Beschreibung bildet eine gute Grundlage, um die logischen Systemelemente und deren Abhängigkeiten zu entwickeln. Abbildung 5 visualisiert die logische Systemarchitektur am Beispiel elektromechanische Wankstabilisierung und greift dabei die erarbeiteten Elementstereotypen auf.

Die Einführung der Stereotypen unterstützt bei der Definition und Abgrenzung von Systemelementen sowie bei der konkreten Beschreibung der Relationen. Außerdem hilft diese Modellierungsform bei der Identifikation weiter zu dekomponierender Systemelemente (z. B. Systemelement *Steuergerät* in Abbildung 5) und bei der Festlegung von Verantwortlichkeiten im Rahmen des Entwicklungsprozesses. Die zentrale Zielstellung für die Einführung der Modellstereotypen ist jedoch eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Modellelemente, bspw. durch disziplinspezifische Eigenschaften oder Schnittstellenbeschreibungen, um ausgewählte Entwicklungsaktivitäten innerhalb des Model-based Systems Engineering zu unterstützen.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag erläutert die Notwendigkeit der gezielten Erweiterung der *Systems Modeling Language* (SysML) innerhalb des Model-based Systems Engineering. Hierzu wird eine Vorgehensweise zur Erweiterung der SysML durch Erzeugung von Modellelementstereotypen und Anwendung heterogener Produktmodelle erläutert. Anhand des Anwendungsfalls *Beschreibung logischer Systemarchitekturen mechatronischer Systeme* wurden konkrete SysML-Elementstereotypen definiert und diese anhand eines Anwendungsbeispiels angewendet. Außerdem wurde die Anwendung und der Nutzen heterogener Produktmodelle grundlegend dargestellt. Zukünftige Forschungsarbeiten fokussieren insbesondere die Vermeidung bzw. den Umgang mit Modellinkonsistenzen im MBSE. Dazu werden zunächst grundlegend verschiedene Typen von Modellinkonsistenzen und etablierte Lösungsansätze recherchiert. Anschließend soll die automatisierte Erzeugung heterogener Modelle, anhand technischer Schnittstellen (API) und Modellverknüpfungen das Auftreten von Modellinkonsistenzen im Model-based Systems Engineering reduzieren.

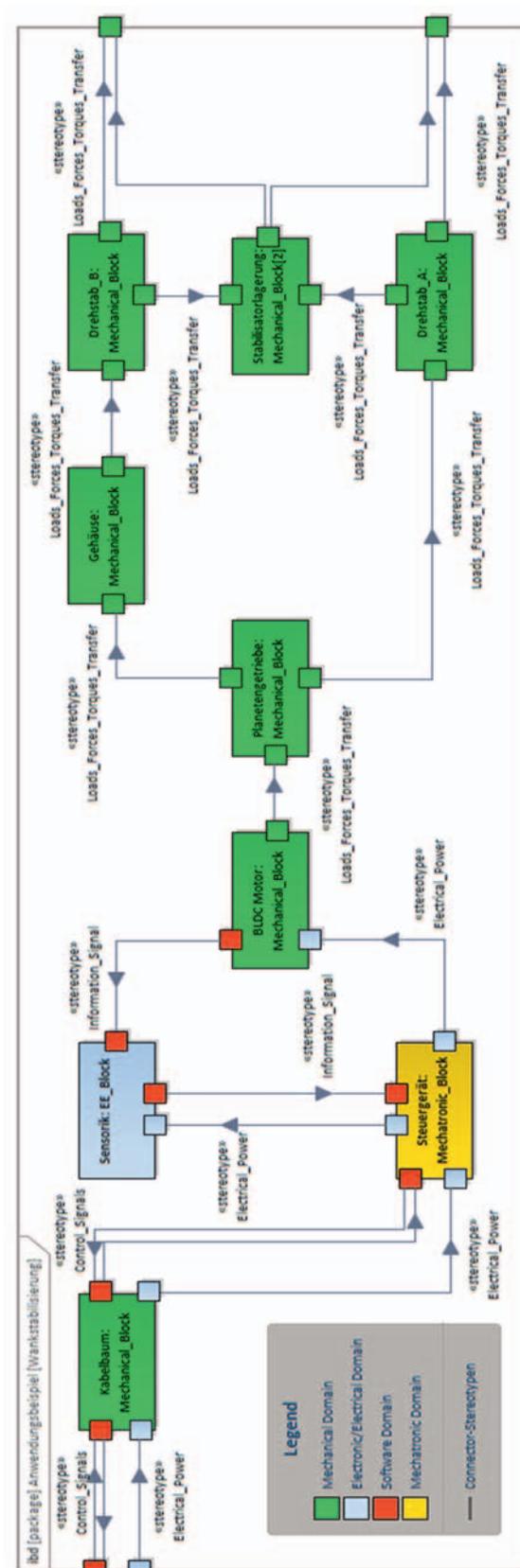


Abbildung 5: Logische Systemarchitektur am Beispiel Wankstabilisierung

Danksagung

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

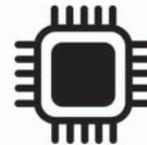
Literatur

- /1/ VDI/VDE 2206: Development of mechatronic and cyber-physical systems, Beuth Verlag, Düsseldorf, 2021
- /2/ Schumacher, T., Inkermann, D.: Heterogeneous models to Support Interdisciplinary Engineering – Mapping Model Elements of SysML and CAD, Proceeding of 32th CIRP Design Conference, Paris, 2022
- /3/ Kernschmidt, K.: Interdisciplinary structural modeling of mechatronic production systems using SysML4Mechatronics, Dissertation, TU München, 2019
- /4/ Friedenthal S. et al.: A Practical Guide to SysML, MK/OMG Press, Amsterdam, 2017
- /5/ Jansen, S., Welp, E. G.: A heterogeneous modelling approach for domain allocation in mechatronics, Proceedings of 16th International Conference on Engineering Design (ICED 2007), Paris, 2007
- /6/ Schumacher T., Inkermann D.: Heterogene Modellierung - Verknüpfung und Integration von Systemmodellen der SysML mit CAD-Modellen, Proceedings of 32th DfX-Symposium, 2021
- /7/ Weilkiens T.: Systems engineering with SysML/UML - Modeling, analysis, design, MK/OMG Press, Amsterdam, 2007
- /8/ Walden D.D., et al.: Systems engineering handbook, Wiley, Hoboken, 2015
- /9/ Wilms R., et al.: Identifying Cross-Domain Linkage Types to Support Engineering Change Management and Requirements Engineering, Proceedings of 29th CIRP Design, Póvoa de Varzim, 2019
- /10/ Kleiner S., Kramer C.: Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6, Proceedings of Smart Product Engineering, 2013

Ansätze und Verfahren zur Prognose der Lebensdauer von Systemen

Bauer, R.; Inkermann, D.

Lebensdauerprognosen sind von grundlegender Bedeutung um Sicherheit, Kosten, Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit von Produkten zu verbessern. Zur Modellierung der Lebensdauer von Systemen oder ihrer Komponenten und Subsysteme existieren unterschiedliche Verfahren und Modellansätze, welche nicht immer kompatibel sind. Dieser Beitrag gibt eine Übersicht zu den verschiedenen Modellansätzen und Modellierungsverfahren für Lebensdauerprognosen. Eine Kompatibilitätsstudie wurde durchgeführt um geeignete Ansatz-Verfahren-Kombinationen zu ermitteln. Die Ergebnisse dieses Beitrages können helfen, Lebensdauermodelle in frühen Entwicklungsphasen zu verbessern.



Lifetime prognoses are fundamentally important to improve products regarding safety, costs, availability and sustainability. To modelling the lifetime of a system or its components and subsystems different methods and model approaches are available, which are not compatible in any case. This paper gives an overview of the different model approaches and modelling methods for lifetime prognosis. A compatibility study was done to find out good options for approach-method combinations. The results of this paper can help to enhance lifetime models of products in early design phases.

Einleitung

Die Prognose der Lebensdauer von Produkten gewinnt zunehmend an Bedeutung, da so Betriebskosten reduziert und abgestimmte Wartungszyklen erstellt werden können, die Sicherheit sowie Verfügbarkeit von Systemen verbessert wird und somit Kundenzufriedenheit und Gewinn gesteigert werden /1/. Hinzu kommen wachsende Anforderungen an Nachhaltigkeit, wodurch Umweltwirkungen im Produktlebenszyklus minimiert werden müssen. Dazu ist es notwendig, frühzeitig im Entwicklungsprozess geeignete Systemarchitekturen zu entwerfen /2/, welche die geforderten Funktionen erfüllen und Lebenszyklusoptionen wie Wiederverwendung, Upgrade, Wartung oder Nachrüstung adressieren. Auch dabei ist die Prognose der Lebensdauer des Systems eine entscheidende Voraussetzung /3/. Jedoch setzen sich insbesondere im Hochtechnologiesektor Systeme aus einer Vielzahl verschiedener Komponenten und Subsysteme bzw. Entitäten zusammen. Ein Beispiel dafür sind elektrische Antriebsstränge in Flugzeugen, welche in Zukunft auf Kurzstreckenflügen eingesetzt werden sollen /4/. Eine vereinfachte Darstellung ist in Abbildung 1 zu sehen.

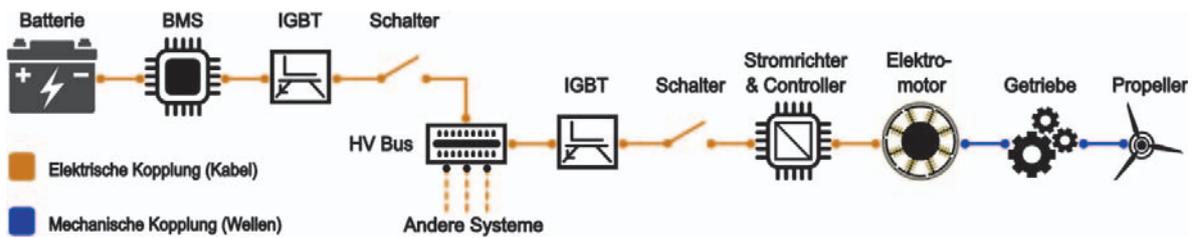


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines vollelektrischen Antriebsstranges eines Flugzeuges (in Anlehnung an /5/)

Die zahlreichen Entitäten solcher Systeme unterliegen dabei unterschiedlichen Schädigungsmechanismen, Wechselwirkungen und Anforderungen. Diese Einflussfaktoren führen zu einer Lebensdauerheterogenität auf Systemebene, was eine Lebensdauerprognose deutlich erschwert. Zudem können unterschiedliche Lebensdauereigenschaften betrachtet werden, wie z. B. neben physikalischen Eigenschaften auch die Kundenzufriedenheit, was zusätzlich zu einer Lebensdauerheterogenität auf Entitätenebene führt /2/, siehe auch Abbildung 2.

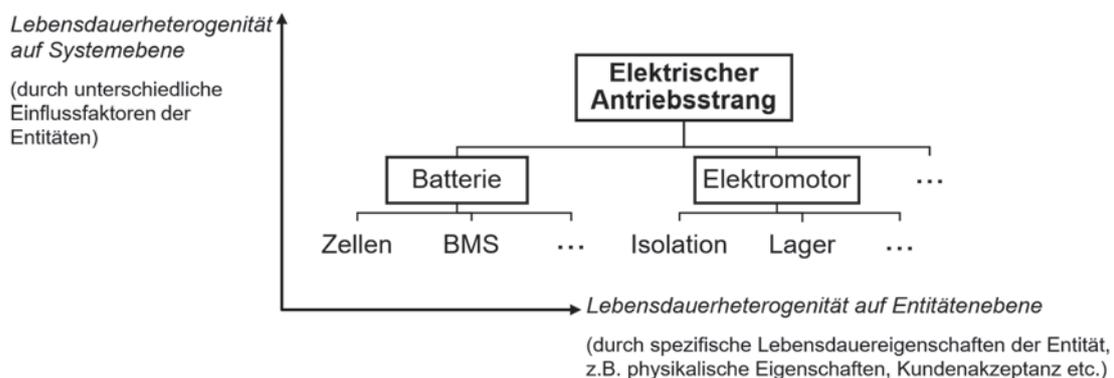


Abbildung 2: Ebenen der Lebensdauerheterogenität

Hinzu kommt eine unterschiedliche Verfügbarkeit von Daten zu den einzelnen Entitäten im frühen Entwicklungsprozess. So sind für Komponenten und Subsysteme, die bereits in ähnlicher Bauweise in anderen Anwendungen etabliert sind (z. B. IGBT, Schalter), meist mehr Informationen zur Lebensdauer oder dem Schädigungsverhalten vorhanden, als für an neue Anwendungsfälle angepasste Entitäten (z. B. Elektromotoren in Flugzeugen). Um das Schädigungsverhalten der einzelnen Entität und die Verfügbarkeit von Messdaten bei der Lebensdauerprognose zu berücksichtigen, kann aus einer Vielzahl an Ansätzen und Verfahren zur Lebensdauermodellierung ausgewählt werden.

Ziel dieses Beitrags

In diesem Beitrag soll eine Übersicht der Modellansätze und Modellierungsverfahren für Lebensdauerprognosen von Systementitäten geschaffen werden. Es sollen die Eigenschaften, Anforderungen, Vor- und Nachteile der Ansätze und Verfahren ausgearbeitet und übersichtlich dargestellt werden. Dazu werden

vorhandene Reviews zum Thema Lebensdauermodellierung gesichtet und davon ausgehend eine vertiefende Recherche vorgenommen. Anschließend soll die Kompatibilität einzelner Modellansätze mit den verschiedenen Modellierungsverfahren mit Hilfe der zuvor ermittelten Erkenntnisse beurteilt werden. Mit dem so erstellten Überblick ist eine Hilfestellung bei der Lebensdauermodellierung von Komponenten und Subsystemen gegeben, welche als Grundlage zu weiterführenden Forschungsarbeiten zur Lebensdauerprognose von Systemen verwendet wird, mit dem Ziel, in frühen Entwicklungsphasen die Lebensdauer der Entitäten eines elektrischen Antriebsstranges von Flugzeugen in Abhängigkeit vom Anwendungsfall möglichst genau zu bestimmen.

Ansätze zur Lebensdauermodellierung

Die Modellansätze werden in diesem Beitrag als grundlegende Prinzipien zur Definition, Darstellung und Ermittlung der Lebensdauer definiert, welche mittels der Modellierungsverfahren umgesetzt werden. Aus den bei der Recherche gewonnenen Erkenntnissen wurden im Wesentlichen drei Ansätze zur Lebensdauermodellierung abgeleitet, welche nachfolgend erläutert werden.

Degradation:

Nachteilige und kontinuierliche Änderung physikalischer Eigenschaften über die Zeit, woraus der Ausfall von Funktionen und die Verringerung der Leistungsfähigkeit des Produktes folgt /6/. Sie kann allgemein als Funktion d der Zeit t , der internen Eigenschaften der Entität \vec{x}_{int} , externer Umgebungseinflüsse \vec{x}_{ext} und der Betriebsgrößen \vec{x}_{op} angegeben werden.

$$d = f(t, \vec{x}_{int}, \vec{x}_{ext}, \vec{x}_{op}). \quad (1)$$

Dabei werden für die Degradation d ein oder mehrere Größen definiert, welche für die Funktionsfähigkeit des Produktes maßgeblich sind, wie z. B. der Kapazitätsverlust einer Batterie oder die maximale Risslänge in geschädigtem Material. Zudem wird ein kritischer Wert der Degradationsfunktion bestimmt, bei dem das Produkt den Anforderungen nicht mehr entspricht /7/.

Wahrscheinlichkeitsverteilung und Ausfallrate:

Die Lebensdauer eines Produktes unter festgelegten Bedingungen kann mittels der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Versagens beschrieben werden. Dabei handelt es sich um eine Funktion der Zeit $F(t)$, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der das System oder die Entität unter den definierten Randbedingungen über die Zeit ausfällt /8/. Die zeitliche Ableitung von $F(t)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichte $\delta(t)$. Mittels $F(t)$ und $\delta(t)$ kann wiederum die Ausfallrate $\lambda(t)$ durch die Gleichung

$$\lambda(t) = \frac{\delta(t)}{1 - F(t)} \quad (2)$$

bestimmt werden. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der das Bauteil innerhalb einer infinitesimalen Zeitspanne ausfallen würde, wenn es zum definierten Zeitpunkt noch funktionsfähig ist. Häufig hat die Ausfallrate einen Funktionsverlauf ähnlich wie in Abbildung 3. Ursache dafür ist, dass es bei Produkten zunächst verstärkt zu Frühausfällen kommt, unter anderem wegen Fertigungsfehlern. Dann sinkt die Ausfallrate zunächst, nimmt aber später wegen fortschreitender Schädigungsprozesse wieder zu /9/.

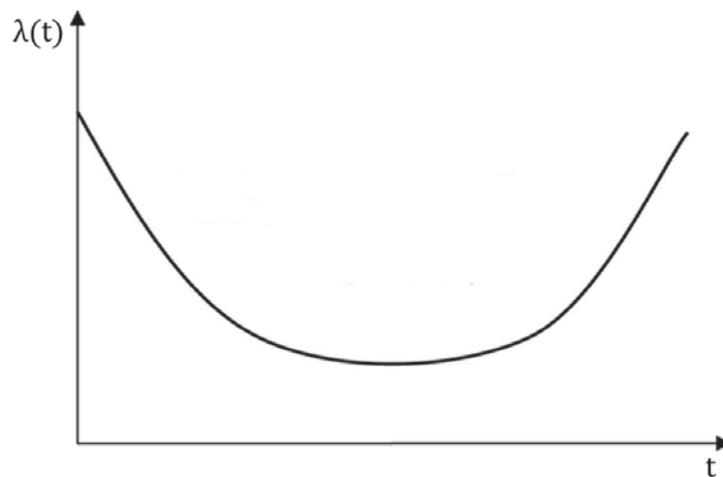


Abbildung 3: typischer zeitlicher Verlauf der Ausfallrate (in Anlehnung an /9/)

Lastzyklen:

Wird ein Produkt einer definierten zyklischen Belastung ausgesetzt, so kann aufgezeichnet werden, nach welcher Anzahl Lastzyklen es zum Versagen kommt. Durch Messversuche mit verschiedenen Lastamplituden können dabei Modelle oder Kurven erzeugt werden, welche Funktionen der Belastungsgröße und der Anzahl der Lastzyklen n sind. Dabei müssen die vorherrschenden Umweltbedingungen möglichst gleichartig sein /10/. Es ist auch möglich durch zusätzliche Messversuche unter Variation mehrerer Einflussgrößen die Anzahl der Lastzyklen bis zum Versagen N_f in Abhängigkeit von weiteren Betriebsgrößen und verschiedenen Umweltbedingungen zu modellieren /11/.

$$N_f = f(n, \vec{x}_{ext}, \vec{x}_{op}). \quad (3)$$

Im Gegensatz zur Degradation wird nicht die kontinuierliche Veränderung funktionsrelevanter Größen ermittelt, sondern ein Versagenskriterium modelliert. Dabei muss entweder der zeitliche Verlauf der zyklischen Belastung immer gleich oder das Schädigungsverhalten des betrachteten Systems unabhängig von der Zeit sein /10/.

Verfahren für die Lebensdauerprognose von Systemen

Um einen Überblick über vorhandene Verfahren zur Umsetzung der Ansätze für die Lebensdauermodellierung zu erhalten, wurden existierende Reviews zu diesem Thema gesichtet. Dazu wurde ein Suchstring der Form „review AND life OR lifetime AND model OR modelling OR estimation OR prognostic“ verwendet und mittels Google Scholar recherchiert. Da der Suchstring keine Fachgebiete und Themenfelder ausschließt, wurden zunächst 205 Artikel gefunden. Nach Analyse des Titels und ggf. Querlesen des Inhaltes wurden jedoch nur acht Quellen als geeignet beurteilt, um in diesen Beitrag einzufließen.

Die einzelnen Quellen befassen sich teils vorrangig mit bestimmten Verfahrensarten, z. B. mit Ausgleichsrechnung /12, 13/, stochastischen Verfahren /14/ oder sogenannten intelligenten Verfahren, welche häufig Maschinelles Lernen anwenden /13, 15/. Weitere Beiträge versuchen allgemeine Übersichten der Modellierungsverfahren zu erstellen /16, 17, 18/, welche aber nicht alle Aspekte der anderen Untersuchungen berücksichtigen. Daher wurde auf Grundlage vorhandener Übersichten eine eigene Klassifikation der Verfahren zur Lebensdauermodellierung vorgenommen, welche in Abbildung 4 dargestellt ist.

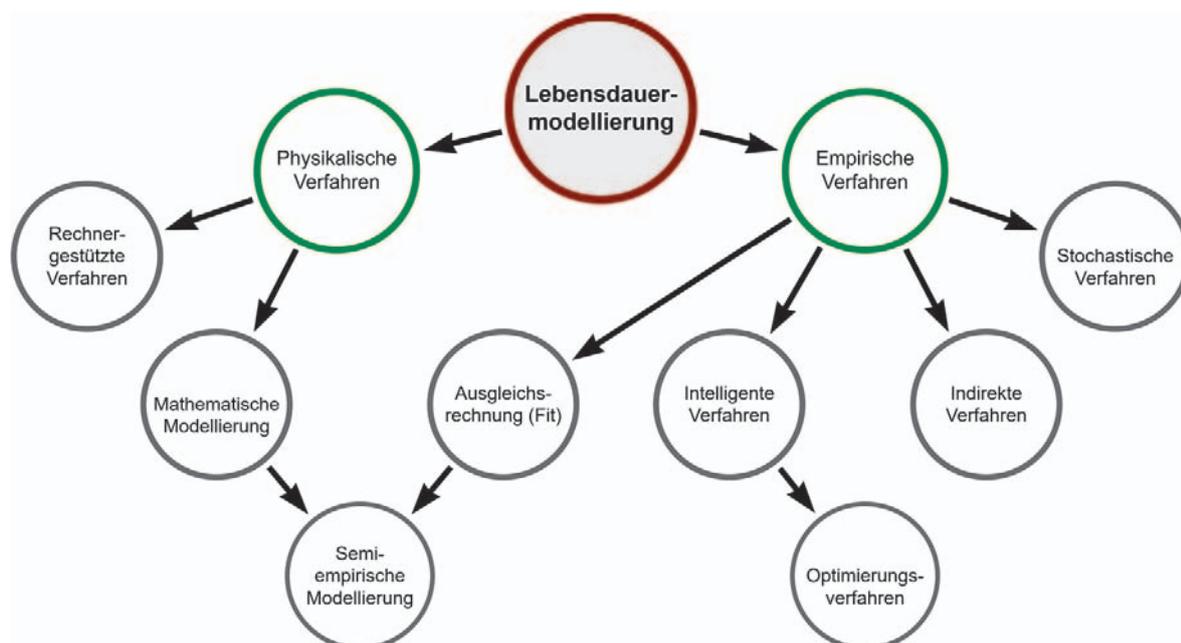


Abbildung 4: Übersicht zu den Verfahrensarten zur Lebensdauermodellierung

Bei physikalischen Verfahren werden anhand theoretischer Überlegungen mathematische Gleichungen aufgestellt, welche das Schädigungsverhalten eines Systems beschreiben, wohingegen bei empirischen Verfahren eine Lebensdauerprognose auf Grundlage von Messdaten vorgenommen wird /19/. Die Vor- und Nachteile der aus dieser Einteilung abgeleiteten Verfahrensarten sowie einige Beispiele sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Modellierungsverfahren und ihre Vor- und Nachteile

Verfahren mit Beispielen	Vorteile	Nachteile	Quelle
<p>Rechnergestützte Verfahren</p> <p>z. B. FEM, CFD</p>	<p>keine oder wenige Messwerte erforderlich</p> <p>Modellierung für verschiedene Anwendungsfälle verwendbar</p>	<p>gute theoretische Kenntnisse notwendig</p> <p>liefern Ersatz für Messwerte, müssen für Lebensdauerprognose aber durch weitere Verfahren ergänzt werden</p>	/20/
<p>Mathematische Modellierung</p> <p>z. B. SEI-Modelle bei Batterien</p>	<p>keine oder wenige Messwerte erforderlich</p> <p>Modellierung für verschiedene Anwendungsfälle verwendbar</p>	<p>aufwändig in der Erstellung, sehr gute theoretische Kenntnisse notwendig</p> <p>Modelle oft nur für bestimmtes System gültig</p>	/19, 21/
<p>(Semi-)empirische Ausgleichsrechnung</p> <p>z. B. exponentielle Ansatzfunktionen, Coffin-Manson-Modell</p>	<p>einfache Modellierung</p> <p>geringer Rechenaufwand</p> <p>einfache Implementierung</p>	<p>hoher Bedarf an Messdaten</p> <p>Modelle oft nur für bestimmtes System gültig und auf definierte Anwendungsfälle ausgelegt</p>	/13, 22/
<p>Intelligente Verfahren</p> <p>z. B. Neuronale Netze, Partikelschwarm-Optimierung</p>	<p>gute Übertragbarkeit auf unterschiedliche Problemstellungen</p> <p>keine Systemparameter erforderlich (z. B. Materialeigenschaften)</p>	<p>sehr hoher Bedarf an Messdaten</p> <p>hoher Rechenaufwand</p> <p>Optimierungsverfahren oft nur zur Verbesserung anderer Verfahren (z. B. Datenfit)</p>	/13, 18, 22/
<p>Indirekte Verfahren</p> <p>z. B. Verborgene Markov-Modelle, Kalman-Filter</p>	<p>gute Übertragbarkeit auf unterschiedliche Problemstellungen</p> <p>einige Verfahren bei fehlerhaften oder unvollständigen Messdaten anwendbar</p>	<p>dienen Aufarbeitung der Messwerte, Lebensdauerprognose erfolgt mit weiteren Verfahren</p> <p>teilweise fehlender Zusammenhang zwischen Messwerten und Ergebnissen</p>	/22, 23/
<p>Stochastische Verfahren</p> <p>z. B. Weibull-Verteilung, Wiener-Prozess</p>	<p>Angabe von Wahrscheinlichkeitsverteilung ermöglicht Risikoanalyse</p> <p>geringer Rechenaufwand</p> <p>einfache Implementierung</p>	<p>sehr hoher Bedarf an Messdaten</p> <p>Modelle oft nur für bestimmtes System gültig und auf einen bestimmten Anwendungsfall ausgelegt</p>	/8, 13/

Eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Verfahren und ihrer Beispiele findet sich in der angegebenen Literatur und soll nicht Teil dieses Beitrages sein. Zu beachten ist jedoch noch, dass es für empirische Verfahren verschiedene Modellierungsprinzipien mit unterschiedlicher Datengrundlage gibt /24/, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Modellierungsprinzipien empirischer Verfahren

Modellierungsprinzip	Beschreibung
Ähnlichkeitsbasiert	Prognose mittels Messdaten ähnlicher Systeme, zunächst keine Daten zu betrachtetem System, jedoch später Modellverbesserung mit solchen
Rekursiv	Prognose auf Grundlage aktueller Messdaten, daher kontinuierliche Bewertungsgrößen notwendig
Direkt	Nutzung aktueller Messwerte und vorhandener Daten ähnlicher Systeme

Zudem existiert noch eine hohe Anzahl hybrider Modellierungsverfahren, welche die Eigenschaften verschiedener Verfahren kombinieren /18/. Wegen der großen Menge an Kombinationsmöglichkeiten und individuellen Eigenschaften ist ihre Darstellung in einer Übersicht aber kaum möglich, weshalb sie nicht näher betrachtet werden.

Kompatibilität von Ansätzen und Verfahren

Nicht alle Modellierungsverfahren sind für jeden Modellansatz in gleicher Weise geeignet. Selbiges gilt für die verschiedenen Modellierungsprinzipien der einzelnen empirischen Verfahren (siehe Tabelle 2). So werden z. B. bei Ausgleichsrechnungen keine Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt /14, 19/, weshalb sie für die Berechnung von Ausfallraten ungeeignet sind. Rekursive Modellierung ist in der Regel nur für Degradationsmodelle sinnvoll anwendbar, da aktuelle und kontinuierliche Werte des betrachteten Systems verlangt werden und so keine Vergleichsmöglichkeit mit ähnlichen Systemen besteht /14, 24/. Deshalb können bei rekursiver Modellierung auch die meisten intelligenten Verfahren nicht genutzt werden, da diese häufig auf Maschinellern anhand von Referenzdaten basieren /18/. Mittels solcher logischen Zusammenhänge sowie mit Hilfe der bisher verwendeten Literatur wurde eine Übersicht erstellt, in der die Kompatibilität von Verfahren und Ansätzen zur Lebensdauermodellierung bewertet wird. Für empirische Verfahren wurde dabei das ähnlichkeitsbasierte (ä), rekursive (r) und direkte (d) Modellierungsprinzip separat bewertet. Bei der Bewertung wurden als Symbole ein + für eine gute, ein Ø für eine mäßige und ein - für eine schlechte Kompatibilität verwendet, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Kompatibilität von Modellansätzen und Modellierungsverfahren für die Lebensdauerprognose

Verfahren \ Ansatz	Degradation	Ausfallrate	Lastzyklen
Rechnergestützt	∅	-	+
Mathematische Modellierung	+	-	∅
Ausgleichsrechnung	ä: + r: + d: +	ä: - r: - d: -	ä: + r: - d: ∅
Intelligent	ä: + r: - d: +	ä: + r: - d: +	ä: + r: - d: +
Indirekt	ä: ∅ r: ∅ d: ∅	ä: + r: + d: +	ä: ∅ r: ∅ d: ∅
Stochastisch	ä: - r: - d: -	ä: + r: - d: +	ä: ∅ r: - d: ∅

Zusammenfassung und Ausblick

Die Prognose der Lebensdauer von Systemen bzw. den zugehörigen Entitäten ist eine wichtige Voraussetzung für deren Sicherheit, Verfügbarkeit und Kostenreduktion, sowie für die Planung von Lebenszyklusoptionen in frühen Entwicklungsphasen. In diesem Beitrag wurden die unterschiedlichen Ansätze von Lebensdauermodellen betrachtet und erläutert, sowie eine Übersicht zu den verschiedenen Verfahren zur Lebensdauermodellierung erstellt und deren Vor- und Nachteile aufgeführt. Anhand der so ermittelten Erkenntnisse wurde die Anwendbarkeit der einzelnen Verfahren für die unterschiedlichen Modellansätze beurteilt und die Ergebnisse kompakt dargestellt. Die in diesem Beitrag erstellten Übersichten sind eine Hilfestellung bei der Lebensdauermodellierung im frühen Entwicklungsprozess und können bei der Auswahl geeigneter Lebensdauermodelle unterstützen. In weiterführenden Forschungsarbeiten sollen zusätzlich Kriterien zur Auswahl von Ansätzen und Verfahren der Lebensdauermodellierung in Abhängigkeit vom betrachteten System und den verfügbaren Daten definiert werden. Das dabei entwickelte Vorgehen soll am Beispiel eines elektrischen Antriebsstranges angewendet werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategien – EXC 2163/1 – Sustainable and Energy Efficient Aviation – Projektnummer 390881007.

Literatur

- /1/ Wang, T.: Trajectory Similarity Based Prediction for Remaining Useful Life Estimation. Dissertation, University of Cincinnati, ProQuest, 2010. DOI: 10.1109/PHM.2008.4711421
- /2/ Inkermann, D. et al.: Die Produktarchitektur als zentrales Konzept in der Produktentwicklung. In: 30. DfX-Symposium (2019), S. 263-278. DOI: 10.35199/dfx2019.23
- /3/ Umeda, Y., Daimon, T., Kondoh, S.: Life Cycle Option Selection Based on the Difference of Value and Physical Lifetimes for Life Cycle Design. In: 16th International Conference on Engineering Design (2007), Artikel-Nr. DS42_P_47. ISBN 1-904670-02-4
- /4/ Karpuk, S., Elham, A.: Influence of Novel Airframe Technologies on the Feasibility of Fully-Electric Regional Aviation. In: Aerospace 8 (2021), Nr. 6., Artikel-Nr. 163. <https://doi.org/10.3390/aerospace8060163>
- /5/ Stückl, S.: Methods for the Design and Evaluation of Future Aircraft Concepts Utilizing Electric Propulsion Systems. Dissertation, Technische Universität München, mediaTUM, 2016. <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1255732>
- /6/ Mcpherson, J.: Reliability Physics and Engineering. Springer, New York, 2010. ISBN: 978-1-4419-6348-2
- /7/ Petit, M., Prada, E., Sauvart-Moynot, V.: Development of an Empirical Aging Model for Li-ion Batteries and Application to Assess the Impact of Vehicle-to-Grid Strategies on Battery Lifetime. In: Applied Energy, Nr. 172 (2016), S. 398-407. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.119
- /8/ Härtler, G.: Statistik für Ausfalldaten - Modelle und Methoden für Zuverlässigkeitsuntersuchungen. Springer Spektrum, Berlin, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-50303-4_3
- /9/ Finkelstein, M.: Failure Rate Modelling for Reliability and Risk. Springer, London, 2008. ISBN: 978-1-84800-986-8
- /10/ Weißbach, W.: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. DOI: 10.1007/978-3-658-03919-6
- /11/ Stroe, D.: Lifetime Models for Lithium-Ion Batteries Used in Virtual Power Plant Applications. Dissertation, Aalborg Universitet, 2014. <http://www.et.aau.dk/events/show/phd-defence-by-daniel-ioan-stroe-on-lifetime-models-for-lithium-ion-batteries-used-in-virtual-power-plant-applications.cid131015>
- /12/ Kalayci, C. B., Karagoz, S., Karakas, Ö.: Soft Computing Methods for Fatigue Life Estimation: A Review of the Current State and Future Trends. In: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure, Nr 43 (2020), S. 2763–2785. DOI: 10.1111/ffe.13343
- /13/ Li, Y. et al.: Data-Driven Health Estimation and Lifetime Prediction of Lithium-Ion Batteries: A Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Nr.113 (2019), Artikel-Nr. 109254. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109254

- /14/ Si, X.-S. et al.: Remaining Useful Life Estimation – A Review on the Statistical Data Driven Approaches. In: *European Journal of Operational Research* 213, Nr.1 (2011), S. 1–14. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018
- /15/ Fang, X. et al.: A Review of Data-Driven Prognostic for IGBT Remaining Useful Life. In: *Chinese Journal of Electrical Engineering* 4, Nr. 3 (2018), S. 73–79. DOI:10.23919/cjee.2018.8471292
- /16/ Chen, X. et al.: Remaining Useful Life Prognostic Estimation for Aircraft Subsystems or Components: A Review. In: *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (2011), S. 94–98. DOI:10.1109/icemi.2011.6037773.
- /17/ Lipu, M. et al.: A Review of State of Health and Remaining Useful Life Estimation Methods for Lithium-Ion Battery in Electric Vehicles: Challenges and Recommendations. In: *Journal of Cleaner Production*, Nr. 205 (2018), S. 115–133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.065
- /18/ Su, C., Chen, H. J.: A Review on Prognostics Approaches for Remaining Useful Life of Lithium-Ion Battery. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 93, Nr. 1 (2017), Artikel-Nr. 12040. DOI: 10.1088/1755-1315/93/1/012040
- /19/ Zagorowska, M. et al.: A Survey of Models of Degradation for Control Applications. In: *Annual Reviews in Control* (2020), S. 150–173. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.08.002
- /20/ Mlikota, M. et al.: Numerical Determination of Paris Law Constants for Carbon Steel Using a Two-Scale Model. In: *Journal of Physics: Conference Series*, Nr. 843 (2017), Artikel-Nr. 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/843/1/012042
- /21/ Prada, E. et al.: Simplified Electrochemical and Thermal Model of LiFePO₄-Graphite Li-Ion Batteries for Fast Charge Applications. In: *Journal of The Electrochemical Society* 159, Nr. 9 (2012), S. A1508-A1519. DOI: 10.1149/2.064209jes
- /22/ Heng, A. et al.: Rotating Machinery Prognostics: State of the Art, Challenges and Opportunities. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*, Nr. 23 (2009), S. 724–739. DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.06.009
- /23/ Peng, Y., Dong, M., Zuo, M. J.: Current Status of Machine Prognostics in Condition-Based Maintenance – A Review. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 50 (2010), S. 297–313. DOI: 10.1007/s00170-009-2482-0
- /24/ Soualhi, M. et al.: Dealing with Prognostics Uncertainties: Combination of Direct and Recursive Remaining Useful Life Estimations. In: *Computers in Industry*, Nr. 144 (2023), Artikel-Nr. 103766. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103766>

Grundlegende Konstruktionsrichtlinien für das Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM)



Quanz, M.; Lohrengel, A.

Um es Konstruierenden zu ermöglichen, Bauteile WAAM-gerecht gestalten zu können, sind Konstruktionsrichtlinien notwendig, die Restriktionen und Freiheiten des Fertigungsprozesses gezielt zusammenfassen. In diesem Artikel werden in der Literatur vorhandene Grenzwerte dargestellt und Forschungspotentiale aufgezeigt.

In order to enable designers to design components in a WAAM-compatible manner, design guidelines are necessary that specify the restrictions and freedoms of the manufacturing process. In this article, a literature review is conducted to present existing limit values and research potentials are identified.

Einleitung

Zu den wichtigsten additiven Fertigungsverfahren, die geeignet sind, um Metallteile herzustellen, zählen neben dem Selective Laser Melting (SLM) und dem Selective Laser Sintering (SLS) auch das Wire Arc + Additive Manufacturing (WAAM). Dabei wird das Bauteil gefertigt, indem ein verfahrbarer Schweißbrenner den Schweißdraht aufschmilzt und das flüssige Material auf dem Substrat wieder erstarrt. Mithilfe der Positionierungsmöglichkeiten werden so Schweißpfade abgefahren, bis eine Schicht des Bauteils fertig gestellt wurde, der Schweißbrenner um eine Schichtdicke nach oben gefahren wird und mit der nächsten Lage fortfährt.

Ein Vorteil des WAAM-Prozesses ist die maximale Bauteilgröße. Es sind Bauteile herstellbar, deren Größe nur von dem Bauraum der Fertigungsmaschine anhängig ist. Im Vergleich zum SLM-Verfahren sind so deutlich größere Bauteile herstellbar, die so auch geringe Stückzahlen mit hoher Komplexität wirtschaftlich werden lassen. Zu den nutzbaren Materialien zählen Stahl, Aluminium und Titanlegierungen [2]. Die Legierung ist dabei abhängig vom verwendeten Schweißzusatzwerkstoff.

Der Fertigungsprozess WAAM bietet dem Konstrukteur viele Freiheiten, da komplexe Metallteile mit Geometrieelementen wie z. B. Hinterschneidungen herstellbar sind. Die WAAM-Fertigung bedingt jedoch ein hohes Maß an Expertenwissen. Um die konstruktiven Freiheiten nutzen zu können und das Prozessverständnis zu verbessern, werden konstruktive Richtlinien benötigt, die dem Konstruierenden Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens aufzeigen und dadurch die Produktentwicklungszeit verkürzen. Durch solche Richtlinien sind weniger Iterationen notwendig, um Bauteile WAAM-gerecht zu optimieren.

Hauptteil

Die Forschung beschäftigt sich damit, den WAAM-Prozess immer weiter zu verbessern. Für Konstruierende ist es von großem Interesse, Fähigkeiten und Limitierungen des Prozesses zu kennen, um Bauteile entsprechend auslegen zu können. Nachfolgend werden einige der wichtigsten Konstruktionskenngrößen dargestellt, zu denen bereits in der Literatur Kennwerte existieren.

Überhänge

Als Überhänge werden Schweißlagen bezeichnet, die im Vergleich zur darunter liegenden Lage so versetzt sind, dass ein Teil der oberen Lage übersteht. Zur Visualisierung sind Überhänge in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. Sie sind besonders kritisch, da es abhängig vom Winkel zu Schweißfehlern kommen kann. Wenn der Winkel des Überhangs zu klein wird, die obere Lage also zu weit übersteht, verbleibt das Material nicht an der Position, an der es aufgebracht wurde. Das flüssige Metall fließt im schlimmsten Fall an der Körperkante herunter. Song et. al. haben 2005 dargestellt, dass Überhänge von 45° ohne eine Schrägstellung des Schweißbrenners und ohne Stützstrukturen herstellbar sind /5/.

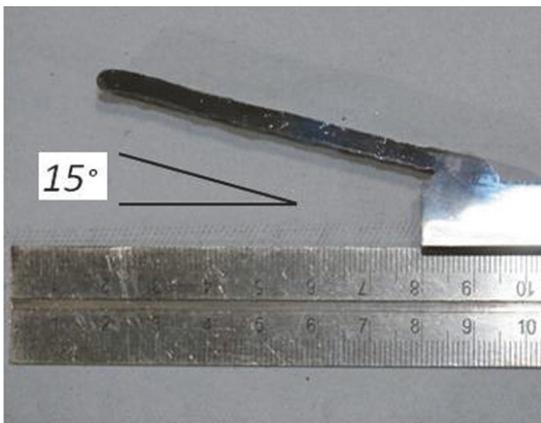


Abbildung 1: Beispielhafter Überhang im Winkel von 15° zum Substrat /1/



Abbildung 2: Horizontaler Überhang mit schräggestelltem Schweißbrenner /1/

2012 haben Kazanas et. al. eine Methode aufgezeigt, mit der Überhänge bis zu 0° fertigbar sind. Um das zu erreichen, wurde der Winkel des Schweißbrenners auf den Winkel der Wand eingestellt. Dadurch konnten im Gegensatz zu /5/ noch deutlich kleinere Winkel gefertigt werden. In Abbildung 2 wird dargestellt, dass sogar horizontale Überhänge möglich sind, wenn der Schweißbrenner passend eingestellt wird. /1/

Durch die Positionierung des Schweißbrenners haben Kazanas et. al. gezeigt, dass es möglich ist, Überhänge beliebiger Größe zu fertigen. Um diese Möglichkeit zu

nutzen ist ein entsprechende Fertigungsmaschine mit genügend bewegbaren Achsen notwendig.

Minimale Wandstärken und Lagenhöhen

Durch den schichtweisen Aufbau von WAAM-Bauteilen sind theoretisch beliebig große Wandstärken herstellbar. Von besonderem Interesse ist jedoch die minimal herstellbare Wandstärke. Die in /1/ gefertigten Proben wiesen Wandstärken zwischen 4-5 mm auf. In /4/ wird dagegen eine minimale Wandstärke von 2 mm angegeben. Die erzielbaren minimalen Wandstärken sind abhängig von den Schweißparametern und vom Schweißzusatzwerkstoff. Falls Wandstärken technologisch notwendig sind, die diesen Wert unterschreiten, ist eine abtragende Nachbearbeitung notwendig. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch den Wärmeeintrag bei der Bauteilfertigung Eigenspannungen im Bauteil vorhanden sein können, die durch die Nachbearbeitung zu Verzug führen können.

Die minimal fertigbare Höhe von Geometriefeatures entspricht einer Schweißraupe, diese liegt ungefähr bei 0,5-2mm /3, 5/. Um geringere Höhen herzustellen, ist ebenfalls eine abtragende Nachbearbeitung notwendig.

Maximale Bauteilgröße

In /3/ wird beschrieben, dass die maximal herstellbare Bauteilgröße für Stahl und Aluminiumbauteile nur vom Bauraum der Maschine abhängig ist. Lockett et. al. geben dafür einen maximalen Wert von 10 m an /4/.

Für Bauteile aus Materialien wie Titan, die in einer Schutzgasatmosphäre hergestellt werden müssen, ist die Größe der Einhausung ausschlaggebend /3/. In /7/ wurde dagegen eine Abschirmeinrichtung entwickelt, die keine Einhausung der kompletten Fertigungsmaschine erfordert. Mit der Verwendung einer solchen Abschirmung ist die maximale Bauteilgröße von Titanbauteilen ebenfalls nur noch vom Bauraum der Maschine abhängig.

Aufmaß für Nachbearbeitungsflächen

Im Vergleich zum Gießen müssen Funktionsflächen ebenfalls nachbearbeitet werden, um notwendige Toleranzen und Oberflächenqualitäten einzustellen. In /5/ wird eine erreichbare Maßtoleranz von $\pm 0,5$ mm angegeben. Um genug Material zu haben, um eine Nachbearbeitung durchführen zu können, ist deshalb ein Aufmaß von mindestens 1 mm notwendig.

Erreichbare Oberflächenqualität

In /5/ wird ebenfalls angegeben, dass ein Mittenrauwert von $R_a = 150 \mu\text{m}$ erreicht werden kann. Zum Vergleich: In /6/ werden nach der zurückgezogenen DIN 4766-1 erreichbare Mittenrauwerte für diverse Fertigungsverfahren aufgelistet. Durch Fräsen sind Mittenrauwerte von $R_a = 0,4 - 25 \mu\text{m}$ und durch Sandformgießen Mittenrauwerte von $R_a = 12,5 - 100 \mu\text{m}$ erzielbar /6/.

Konstruktionsrichtwerte für WAAM

In der Literatur ist es gängige Praxis, Prozesswissen von Fertigungsverfahren in Konstruktionskatalogen zu sammeln, in denen für verschiedene Problemstellungen Lösungsvorschläge beschrieben werden. Für die additive Fertigung sind bisher jedoch nur erste Ansätze vorhanden.

Für die Fertigung von Titanlegierungen im SLM-Verfahren wurden von Kranz et. al. bereits Konstruktionsrichtlinien veröffentlicht. Darin werden für diverse konstruktive Probleme Lösungen präsentiert. Die Problemstellungen beziehen sich dabei unter anderem auf nicht fertigbare Geometrielemente, für die SLM-gerechte Alternativen dargestellt werden. /8/

In /4/ werden Konstruktionsrichtlinien für WAAM aufgelistet. Darin wird unter anderem die Symmetrie von Bauteilen ausgenutzt, um sie möglichst verzugsarm herstellen zu können. Weiterhin werden Vorschläge zur Optimierung gemacht, indem beispielsweise scharfe Innen- und Außenkanten vermieden werden und durch Radien ersetzt werden. /4/

Um das in der Literatur vorhandene Prozesswissen Konstruierenden zugänglich zu machen, werden die oben beschriebenen Kenngrößen nachfolgend in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: WAAM Konstruktionsrichtwerte

Geometrielement	Richtwert	Zusätzliche Beschreibungen / Quellen
Erreichbare Winkel von Überhängen	$\alpha \geq 45^\circ$	ohne Schrägstellung des Brenners und ohne Stützstrukturen, /5/
	$\alpha = 0^\circ - 90^\circ$	mit Schrägstellung des Brenners, /1/

Geometrieelement	Richtwert	Zusätzliche Beschreibungen / Quellen
Minimal erreichbare Wandstärken	$t = 2 - 5 \text{ mm}$	/1, 4/
Maximale Bauteilgröße	abhängig von der Bauraumgröße der Maschine	für Stahl, Aluminium /3/
	abhängig von der Bauraumgröße der Maschine und der zur Verfügung stehenden Einhausung	für Titan /3/
	abhängig von der Bauraumgröße der Maschine	für Titan, falls eine Abschirmeinrichtung wie in /7/ verwendet wird
Minimale Schichthöhe	$h \geq 0,5 - 2 \text{ mm}$	/3, 5/
Gestaltung von Ecken	Kanten müssen verrundet werden (innen und außen)	/4/
Aufmaß für Nachbearbeitungsflächen	$\geq 1 \text{ mm}$	/5/
Mittenrauwert R_a	$R_a = 150 \text{ }\mu\text{m}$	ohne Nachbearbeitung, /5/

Zusammenfassung

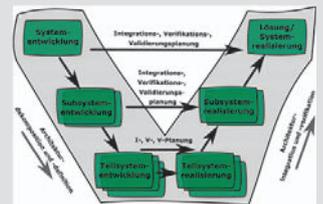
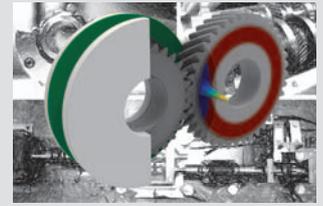
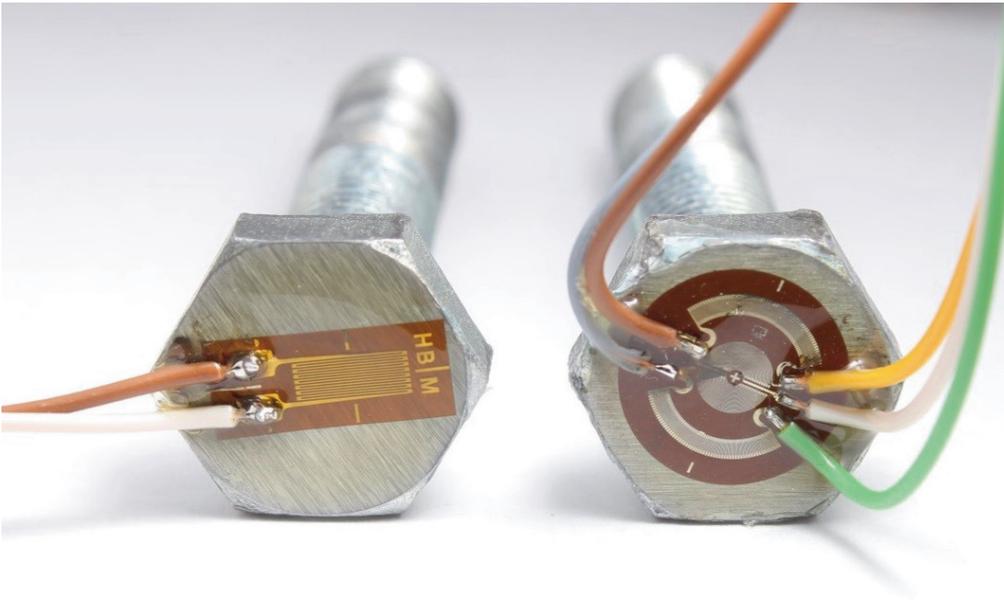
Der WAAM-Prozess bietet neue Möglichkeiten, aber auch neue Herausforderungen in der Bauteilentwicklung und der anschließenden Fertigung. Um das in der Literatur vorhandene Prozesswissen zu sammeln, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und die gefundenen Kenngrößen dokumentiert.

Grundlegende Konstruktionskataloge wie in /4/ wurden bereits vorgeschlagen, um das Bauteildesign zu optimieren. Ein vollständiger Konstruktionskatalog ist jedoch

noch nicht vorhanden und bedarf weiterer Forschung, um Fähigkeiten und Grenzen des Prozesses weiter zu dokumentieren und nutzbar zu machen, um so WAAM als gängiges Fertigungsverfahren in der Industrie zu etablieren.

Literatur

- /1/ Kazanas, P.; Deherkar, P.; Almeida, P.; Lockett, H.; Williams, S.: Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Volume 226 Issue 6; S. 1042-1051; 2012; DOI: 10.1177/0954405412437126
- /2/ Mehnen, J.; Ding, J.; Lockett, H.; Kazanas, P.: Design study for wire and arc additive manufacture. In: International Journal of Product Development. Volume 19, No. 1-3; S. 2-20; 2014; DOI: 10.1504/IJPD.2014.060028
- /3/ Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P.: Wire + Arc Additive Manufacturing. In: Materials Science and Technology. Volume 32 Issue 7, S. 641-647; 2016; DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073
- /4/ Lockett, H.; Ding, J.; Williams, S.; Martina, F.: Design for Wire + Arc Additive Manufacture: design rules and build orientation selection. In: Journal of Engineering Design. Volume 28 Issue 7-9, S. 568-598; 2017; DOI: 10.1080/09544828.2017.1365826
- /5/ Song, Y.-A.; Park, S.; Choi, D.; Jee, H.: 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture. Volume 45 Issue 9. S. 1057-1062; 2005; DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.021
- /6/ Wittel, H.; Spura, C.; Jannasch, D.: Roloff/Matek Maschinenelemente. 25. Auflage; S. 992; 2021; ISBN 978-3-658-34160-2
- /7/ Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams S.; Wiktorowicz, R.; Palt, M. R.: Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture. In: Journal of Materials Processing Technology; Volume 226, S. 99-105; 2015; DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005
- /8/ Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. In Journal of Laser Applications. Volume 27, S14001; 2015; DOI: 10.2351/1.4885235



Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik



Entwicklung von anwendungs- angepassten akustischen Absorbern unter Nutzung von Simulations- technik

Rehmet, R.; Lohrengel, A.

Innerhalb eines Forschungsprojekts in Kooperation mit der Universität Göttingen wurden im Projekt Abocorn Absorbermaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen qualifiziert. Im Rahmen von weiteren Studien werden die Materialien und Modelle weiter angepasst, um eine bestmögliche Konstellation eines akustischen Absorbers herzustellen.



Within a research project in cooperation with the University of Göttingen, absorber materials made of renewable raw materials were qualified in the Abocorn project. In the course of further studies, the materials and models will be further adapted to produce the best possible constellation of an acoustic absorber.

Ausgangslage

Lärm macht krank – diese These wurde durch verschiedenste Studien belegt. Beispielsweise wird in der medizinischen Studie von Maschke et al. belegt, dass es einen Zusammenhang zwischen dauerhafter Lärmexposition am Wohnort und der Anzahl von Erkrankungen am Herz-Kreislauf-System gibt, vgl. /1/. Zur Senkung der Lärm-Exposition an Arbeitsplätzen oder auch im privaten Umfeld existieren verschiedenste Konzepte. Weit verbreitet ist die Nutzung von Schallabsorbern aus Materialien, die aufgrund ihrer mechanischen Beschaffenheit als Absorber besonders geeignet sind. Solche akustischen Absorber kommen dann zum Einsatz, wenn es durch bereits festgelegte, bauliche Randbedingungen zu einer ungeeigneten Raumakustik kommt. Zusätzlich zu den baulichen Randbedingungen wird die ungünstige Raumakustik zum Problem, wenn durch Maschinen und Geräte, Bediener:innen, Kolleg:innen, Gespräche und Telefonate der Pegel im Raum zu hoch wird. Das Arbeiten an einem Büroarbeitsplatz oder ohne Gehörschutz in einer Fertigungshalle wird dann zu einem Gesundheitsrisiko.

Übliche passive Schallabsorber aus faserigen oder offenporigen Materialien werden auf Basis von Mineralien wie Stein, Glas, Holz oder Kunststoffschäumen hergestellt. Weit verbreitet ist zum Beispiel ein Schaum aus Melaminharz, das auf Basis von fossilen Brennstoffen hergestellt wird.

Im abgeschlossenen ZIM-geförderten Projekt Abocorn wurden Materialien aus Popcorn als akustische Absorber qualifiziert. Hierzu wurden die Platten in unterschiedlichen Material- und Herstellungsparametern produziert. Durch die Variation dieser Parameter können für Absorber hochrelevante Einflussgrößen geändert und damit das akustische Verhalten eines Absorbers angepasst werden, vgl. /2/.

In dem grundlagenorientierten Projekt wurde das neuartige Material experimentell qualifiziert, die Qualifizierung erfolgte durch Versuche im Impedanzrohr nach DIN EN ISO 10534-2. Variiert wurden die Dicke und die Dichte der Absorberplatten, die Zusammensetzung des Bindemittels und die Größe und Geometrie des aufgepufften Korns.

Mess-und Zielgrößen

Für die akustische Erstqualifizierung des Materials wird eine Messung im Impedanzrohr durchgeführt. Dabei werden zwei Schalldrücke an definierten Positionen gemessen. Durch das Superpositionsprinzip können die Schalldrücke in eine auf den Absorber einfallende und eine ausfallende Welle zerlegt werden. Der Messaufbau und weitere Randbedingungen der Messung sind in EN ISO 10534-2 und /2/ beschrieben. Das Material wird in einem festgelegten Parameterplan qualifiziert, es werden die Parameter Dichte, Dicke, Bindemittelzusammensetzung und Korngröße variiert.

Als Ergebnisgröße des Versuchs im Impedanzrohr wird der Absorptionskoeffizient α bestimmt. Um diese Größe bestimmen zu können, wird zunächst der Reflektionskoeffizient aus den Übertragungsfunktionen zwischen den Mikrofonorten berechnet. Bei Annahme einer vernachlässigbar kleinen Transmission aufgrund des Messaufbaus kann der Absorptionskoeffizient direkt bestimmt werden, Gleichung (1):

$$\alpha = 1 - r \quad (1)$$

Der Absorptionskoeffizient ist eine Funktion der Frequenz, am Markt befindliche Akustik Absorber werden mit gemessenen Absorptionskurven ausgeliefert. Je nach Einsatzzweck können diese Kurven genutzt werden, um die Eignung am Einsatzort festzustellen, z. B. mit einer Absorberklasse „A“ bis „E“ nach EN ISO 11654 für den Einsatz in Innenräumen oder am Arbeitsplatz. Für diese Bewertung ist es entscheidend, dass über ein Frequenzband zwischen 250 und 4000 Hz ein möglichst konstanter Absorptionskoeffizient erzielt wird.

Theoretischer Hintergrund und Ergebnisse

Die Variation der Dicke des Absorbers liefert Ergebnisse, die mit Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmen. In Abbildung 1 ist der theoretische Einfluss der Absorberdicke auf das Absorptionsverhalten dargestellt. Im Vergleich mit Abbildung 2, die Messdaten aus dem Projekt darstellt, wird deutlich, dass sich das untersuchte Popcorn-Material bei steigender Dicke ähnlich Verhält: Bei Steigerung der Dicke von 20 auf 55 mm verschiebt sich der Anstieg der Absorptionskurve in einen niederfrequenten Bereich.

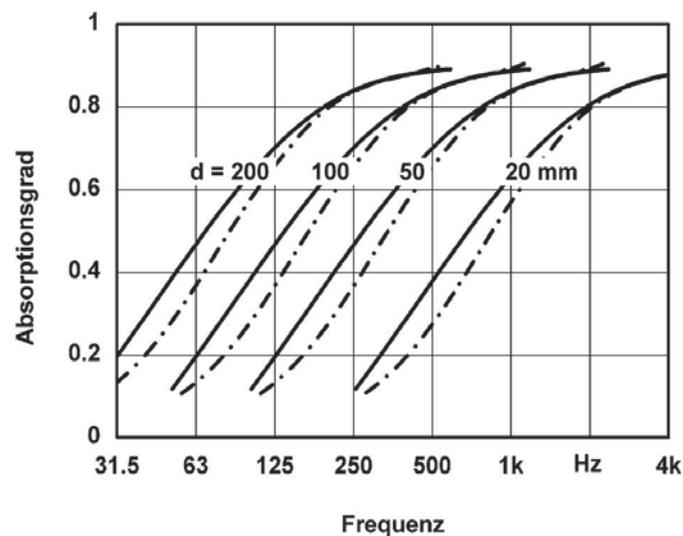


Abbildung 1: Absorptionsgrad α für faserige u. poröse Absorber bei senkrechtem (Linienart - -) bzw. diffusem Schalleinfall (Linienart -) /4/

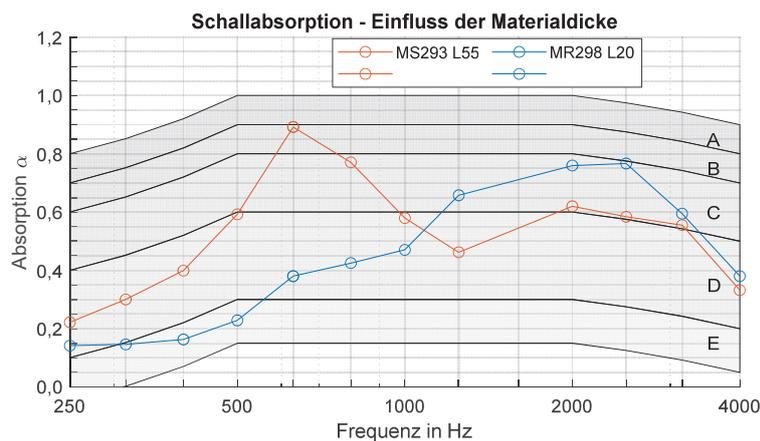


Abbildung 2: Absorptionsgrad von Abocorn bei Variation der Absorberdicke

Gleichzeitig fällt die Verschiebung und leichte Erhöhung des Hochpunktes der Absorptionskurve auf. Obwohl bei diesen beiden Proben dieselbe Rohdichte des

Materials genutzt wurde, wird durch die veränderten Bedingungen beim Pressen der Platte die lokale Dichte variiert.

Es kommt zu einer Dichteverteilung über die Dicke, die sich in einer Änderung der Porengeometrie niederschlägt.

Bei Veränderung der Porengeometrie ändern sich wesentliche Faktoren, die das Absorptionsverhalten maßgeblich beeinflussen:

- Porosität, also Verhältnis zwischen verbundenen Luftvolumina zu Festkörpervolumen
- Strömungswiderstand
- Turbosität, auch Grad der Verschlungenheit der Transportwege

Im direkten Vergleich können für das untersuchte Material eine hohe und eine geringe Rohdichte hinsichtlich der Absorptionskurve verglichen werden, vgl. Abbildung 3. Die Einflüsse der oben genannten Parameter lassen sich nicht isoliert betrachten, da bedingt durch das Fertigungsverfahren mehrere Parameter gleichzeitig verändert werden.

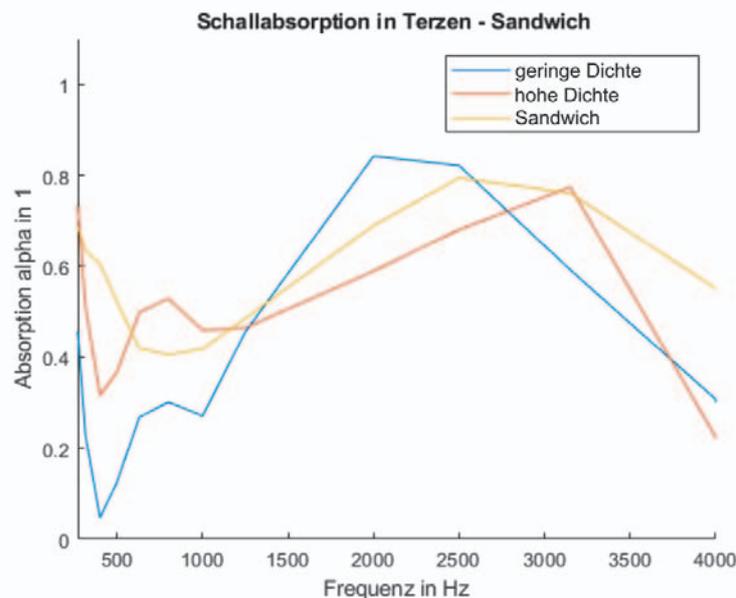


Abbildung 3: Nutzung von Sandwichaufbauten aus Popcornabsorbern /3/

Die Nutzung einer Kombination aus Absorber mit hoher Porosität in der vorderen Lage, also der Schallquelle zugewandt, und einem Absorber mit höherem Flächengewicht in der hinteren Lage ist nach ersten Erkenntnissen vielversprechend. Ein solcher Sandwichaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Das vorteilhafte Absorptionsverhalten der Platte mit einem höheren Grad an Porosität durch geringe Rohdichte zeigt sich zwischen 1500 Hz und 2500 Hz, während der Anteil der Platte mit höherer Dichte, also mit höherem Strömungswiderstand und

höherem Turtositätsgrad sich in Frequenzbereichen zwischen 200 Hz und 1500 Hz zeigt. Durch die Nutzung der Platten als Sandwichabsorber kann ein breitbandiger Absorber durch einen „akustischen Absorberbaukasten“ umgesetzt werden.

Simulationstechnik

Die Erkenntnisse aus der experimentellen Phase des Projektes können genutzt werden, um eine weitergehende Analyse der Wirksamkeit und der Abhängigkeit von physikalischen Absorberparametern umzusetzen. Diese Entwicklung wird durch die Nutzung von Simulationstechnik unterstützt.

Hierzu wird ein Simulationsmodell genutzt, das die Absorptionskurve des Materials auf Basis von einigen Eingangsparametern, unter anderem die oben genannten Größen, vorhersagt. Das Modell zur Berechnung basiert auf den Erkenntnissen von Champoux, Allard et. al [5] und benötigt sechs Eingangsparameter um das komplexe Schubmodul und die dynamische Massendichte zu bestimmen. Aus diesen Größen kann die Impedanz, der Reflektions- und Absorptionskoeffizient abgeleitet werden. Ziel der Anwendung der Simulationstechnik ist die Erarbeitung eines Zusammenhangs zwischen akustisch relevanten Absorberparametern und Fertigungsparametern, um eine Optimierung der Fertigungsparameter zu erreichen. Durch Anwendung eines parametrischen Modells zur Berechnung des Absorptionsverhaltens kann ein vollfaktorielles Feld bestimmt und der Absorptionskoeffizient berechnet werden. Das Ziel ist hierbei, einen Zusammenhang zwischen Messdaten und Simulationsdaten, sowie zwischen Materialparametern und Simulationsparametern, herzustellen.

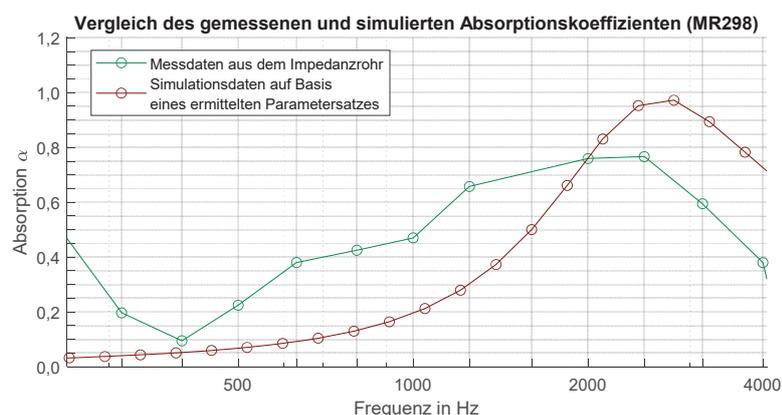


Abbildung 4: Vergleich zwischen Impedanzrohrdaten und Simulationsansatz

In der folgenden Abbildung 4 sind exemplarisch die Daten eines Impedanzrohrversuches aus dem Projekt und dem Simulationsansatz dargestellt. Zur Ermittlung der Simulationsparameter wurden die Ergebnisdaten aus dem vollfaktoriellen Modell genutzt und die bestmöglichen Parameter gefittet. Neben der Parameterfitting-Methode existieren weitere, vielversprechende Ansätze zur Generierung von Parametersets für die Simulation des Absorptionsverhaltens.

Zusammenfassung

Im abgeschlossenen Projekt Abocorn wurden Absorptionsdaten zu einem Absorber entwickelt, der aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird. Es wurden Materialeigenschaften und akustische Eigenschaften ermittelt, um Absorbermaterialien durch Nutzung einer Datenbank so herzustellen, dass sie dem Anforderungsprofil entsprechen.

Mithilfe dieser Datenbank wird ein Simulationsmodell abgeglichen, um weitere Erkenntnisse über die notwendige Materialbeschaffenheit und Fertigungsempfehlungen zu generieren. Durch die Nutzung von Sandwich-Materialien kann der Absorptionskoeffizient weiter angepasst werden.

Literatur

- /1/ Maschke, C.; Wolf, U.; Leitmann, T.: WaBoLu-Hefte. Bd. 02/2003: Epidemiologische Untersuchungen zum Einfluss von Lärmstress auf das Immunsystem und die Entstehung von Arteriosklerose: Abschlussbericht. Umweltbundesamt, 2003, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/epidemiologische-untersuchungen-einfluss-von>
- /2/ Rehmet, R.; Freundt, F.; Weilandt, T.: Schallabsorber-Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen: Institutsmitteilung Nr. 44, Seite 81-86, IMW TU-Clausthal, 2019, ISSN 0947-2274
- /3/ Rehmet, R.; Lohrengel, A.; Freundt, F.; Kharazipour, A.: Akustische Qualifizierung von neuartigen Verbundwerkstoffen auf Basis von stärkehaltigen Granulaten: 18. Gemeinsames Kolloquium Konstruktions-technik (KT 2020), Duisburg, 2020, ISBN: 978-3-940402-43-1
- /4/ Raum-Akustik und Lärminderung; Fuchs, H. V.; Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch); Berlin, Heidelberg; 2017
- /5/ Champoux, Yvan; Allard, Jean-F.: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media;: Journal of Applied Physics, 1991, doi.org/10.1121/1.419690

Messung der Relativbewegung zwischen einer Achse und Nabe

Stök, M.; Schäfer, G.; Lohrengel A.

Das IMW war an der maschinenakustischen Ursachenfindung von knackenden Geräuschen in einer Industrieanlage beteiligt. Aufgrund des geringen zur Verfügung stehenden Bauraums ist ein Sensor entwickelt worden, der die Relativbewegung zwischen einer Achse und Nabe messen kann. Als Ursache für die Geräuschentwicklung konnte mit der Messung eine diskontinuierliche axiale Relativbewegung an der äußeren Nabenkante nachgewiesen werden.



The IMW was involved in identifying the origin of cracking noises in an industrial plant. Due to the limited space available, a sensor was developed that can measure the relative movement between an axle and hub. A discontinuous sliding movement on the outer edge of the hub can be detected as the cause of the noise.

Problemstellung

Das Institut für Maschinenwesen ist gebeten worden bei der Ursachensuche für die Geräuschentwicklung in einer Industrieanlage zu helfen. Im Vorfeld sind verschiedene Hypothesen zwischen dem Auftraggeber und dem IMW diskutiert worden, was für die knackenden oder metallisch schlagenden Geräusche verantwortlich ist.

Eine Hypothese zur Schallursache postuliert, dass es bei dem Presssitz der Achsen-Nabe-Verbindung bei einer Umdrehung an den Kanten zu einer axialen Mikrogleitbewegungen unter Stick-Slip-Konditionen kommt. Durch den plötzlichen Übergang im Kontakt von der Haftreibung in die Gleitreibung geht ein Impuls durch die Nabe, der an großen, frei schwingfähigen Blechen von Körperschall in Luftschall übergeht, was als Knacken oder metallischer Schlag wahrgenommen werden kann. Die axiale Relativbewegung von der Achse zur Nabe im Kantenbereich soll zur Überprüfung der Hypothese messtechnisch erfasst werden.

Anforderungen

Auf einer Achse sitzt eine in axialer Richtung unterbrochene Nabe, die durch eine näherungsweise räumlich konstante Querkraft beansprucht wird. Die Nabe sitzt auf Achsabsätzen, die mit einem Übergangsradius verrundet sind. Zwischen den beiden Nabenabschnitten hat die Achse eine verrundete Nut. An den Außenseiten ist die

Achse gelagert, wodurch der Sensor nur auf dem Übergangsradius appliziert werden kann. Der Abstand zwischen der Nabe und dem Lagergehäuse beträgt 40 mm. In radiale Richtung steht quasi unbegrenzter Bauraum zur Verfügung. Die halbe symmetrische Achsen-Nabe-Verbindung ist in Abbildung 1 zu sehen.

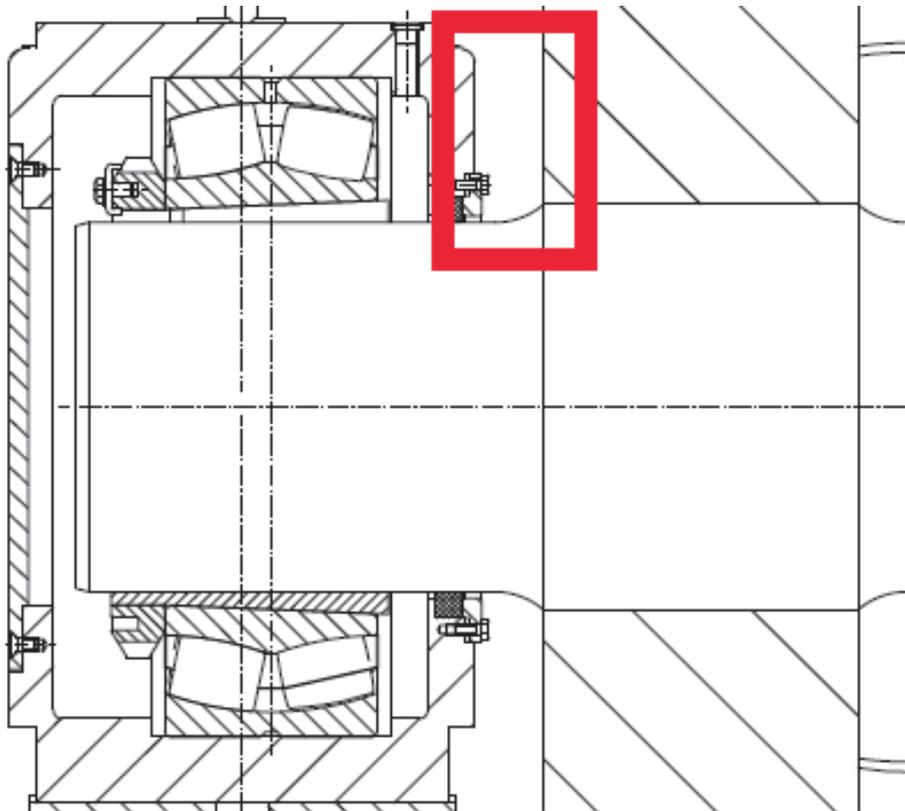


Abbildung 1: Die zu untersuchende Achse-Nabe-Verbindung mit markiertem Bauraum für den Sensor

Der Sensor soll die Relativbewegung zwischen der Achse und der Nabe möglichst direkt an den Kontaktflächen messen, damit eine Winkelschiefstellung zwischen Achse und Nabe aufgrund der Querkraft, nicht mitgemessen wird.

Aus der Simulation der Pressverbindung wird eine Relativbewegung zwischen der Nabenkante und der Achse von $\pm 34,5 \mu\text{m}$ erwartet. Der Sensor sollte diesen Bereich also gut auflösen und muss gleichzeitig in den Bauraum passen. Abstandstaster oder Lasersensoren entfallen hierfür aufgrund Ihrer Längsausdehnung, sodass eine Eigenentwicklung geplant wurde.

Sensorentwicklung

Um den Sensor nicht unnötig kompliziert zu bauen, sollen handelsübliche DMS auf einem Körper verklebt werden. In /1/ wird zur Messung paralleler Kräfte der

Doppelbiegebalken in unterschiedlichen Ausführungen vorgeschlagen. Alle Entwürfe eint eine Bohrung in der Mitte des Sensors. Wird der Doppelbiegebalken auf Scherung belastet, bilden sich an jeder Stirnfläche des Sensors zwei Bereiche aus, in dem der Biegebalken einmal auf Zug und einmal auf Druck belastet wird. Diese vier Bereiche können zu einer Biegevollbrücke verschaltet werden. In Abbildung 2 sind die beiden Dehnungsbänder und die DMS-Positionen auf der Stirnseite des Sensors erkennbar.

Aufgrund der Kreisbohrung würde der Sensor jedoch recht hoch werden und nicht mehr die Verschiebung möglichst dicht an der Nabenkante messen. Mit einer FEM Simulation ist die Geometrie des Sensors iterativ optimiert worden. Das Ziel war es die Stirnseiten des Sensors und die zu applizierende Fläche möglichst zu minimieren, gleichzeitig soll die Dehnungen über die Messgitterlänge möglichst homogen sein. Dies stellt einen Zielkonflikt dar, denn eine homogene Dehnung über das Messgitter wird durch einen großen Bohrungsdurchmesser und eine kleine Stirnfläche über einen möglichst kleinen Bohrungsdurchmesser erreicht.

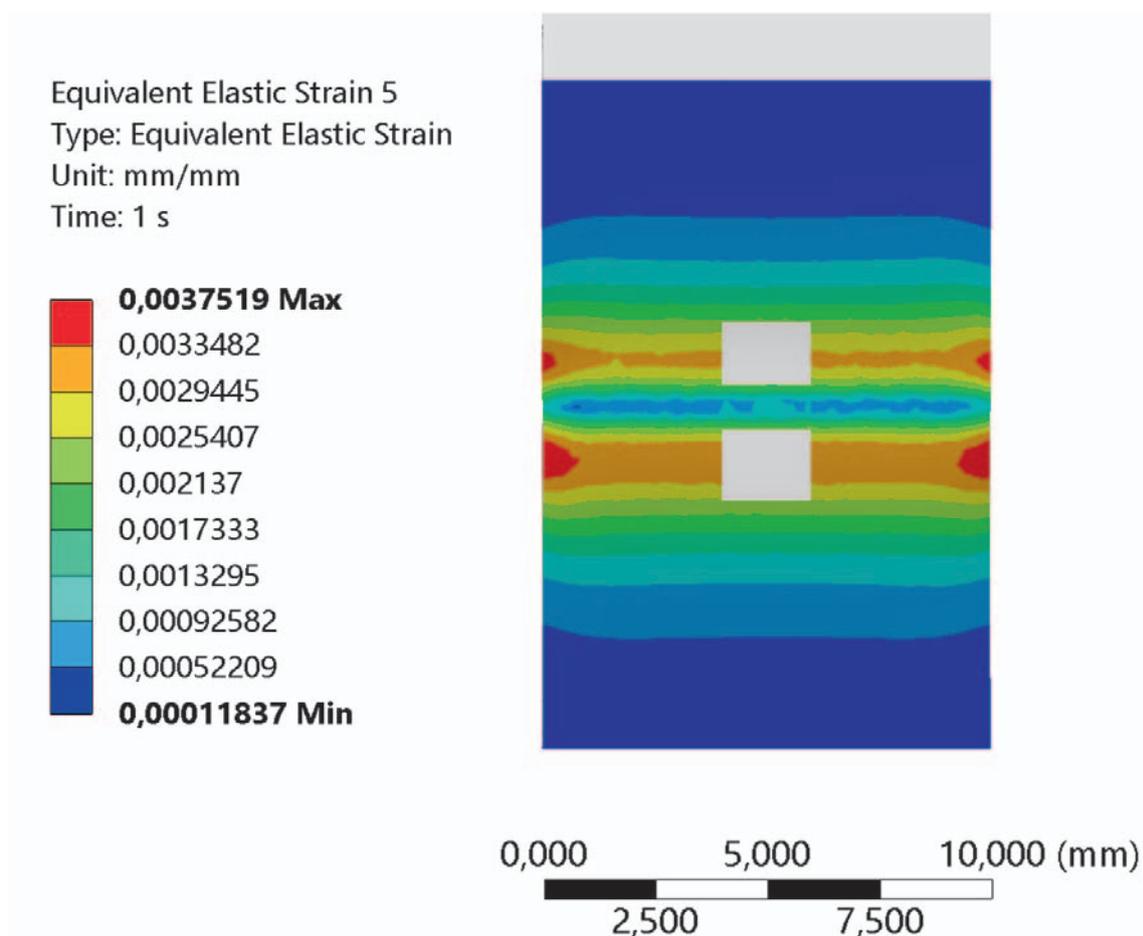


Abbildung 2: Stirnseite des Sensors mit den beiden Dehnungsbändern und der Position der Messgitter als weiße Flächen

Die kleinsten linearen Messgitter mit Anschlussbändchen haben nur eine Länge von 0,3 mm auf einem 2 x 1,2 mm Träger. Hinzu kommt dann jedoch noch ein Lötstützpunkt, der die zu beklebende Fläche erheblich vergrößert. Eine Alternative stellen vorverkabelte DMS dar, bei denen die kürzesten linearen Messgitter eine Länge von 1 mm auf einem 3,8 x 3,5 mm Träger haben. Aus der Größe der DMS ergibt sich der minimale Abstand zwischen den beiden Dehnungsbändern und damit der minimale Bohrungsdurchmesser.

Jeder Sensor ist, inklusiver der gesamten Messkette, individuell eingemessen worden um das von der Biegevollbrücke gemessene Signal in einen Weg umrechnen zu können.

Messung an der Achsen-Nabe-Verbindung

Auf der Achse sitzen zwei Nabenabschnitte, an deren Außenseite zum Lager hin jeweils ein Sensor appliziert wird. Mit diesen sollen die Relativbewegungen zwischen der Achse und der Nabe gemessen werden. Da die Geräuschentwicklung nur an einzelnen Verbindungen auftritt, wird zu Vergleichszeiten an knackenden und an geräuschlosen Verbindungen gemessen. Insgesamt werden 4 Relativbewegungen aufgezeichnet. Die Verläufe der vier Signale sind in Abbildung 3 für die geräuschlosen und in Abbildung 4 für die knackende Verbindung dargestellt. Bei den Verläufen der Verschiebungen B und C sind Peaks zu erkennen, die auf eine Übertragungsunterbrechung der Telemetrie zurückzuführen sind und zu einem Vollausschlag des Signals führen. Diese treten regelmäßig an der immer gleichen Position auf.

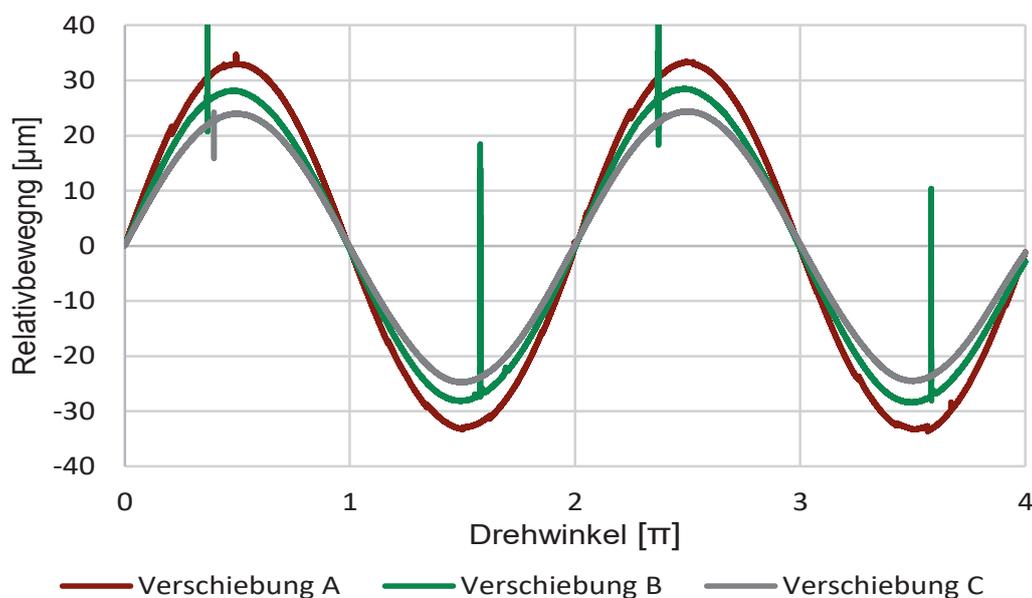


Abbildung 3: Gemessene Relativbewegungen an den Verbindungskanten geräuschloser Verbindungen

In allen vier Pressverbindungen kommt es an der äußeren Kante der Pressverbindung zu einer Relativbewegung. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Pressverband versagt und die gesamte Nabe sich axial auf der Achse verschiebt. Die Relativbewegung resultiert aus den unterschiedlichen Durchbiegungen der Achse und Nabe resultierend aus den unterschiedlichen Biegesteifigkeiten. Die Achse biegt sich unter der Querkraft stärker durch als die Nabe. In einem weiten mittleren Bereich sitzt die Nabe fest auf der Achse, nur zu den Rändern hin kommt es zu einer relativen Verschiebung der Oberflächen. An drei Verbindungen ist die Verschiebung ein kontinuierliches Gleiten, welches in Abbildung 3 zu sehen ist. Bei der Verbindung D kommt es immer wieder zu Sprüngen im Signal, vgl. Abbildung 4. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Gleitreibungs- und Haftreibungskoeffizient deutlich unterschiedlich sind. Es kommt somit immer wieder zu einem Anhaften der Oberflächen (Stick-Slip). Es bauen sich Kräfte auf, bis diese groß genug sind die Haftung zu überwinden und durch das schlagartige Rutschen ein Impuls entsteht, der als Körperschall durch die Nabe läuft. An Oberflächen, die frei schwingen können, wird der Körperschall in Luftschall gewandelt, was als ein Knacken wahrgenommen wird.

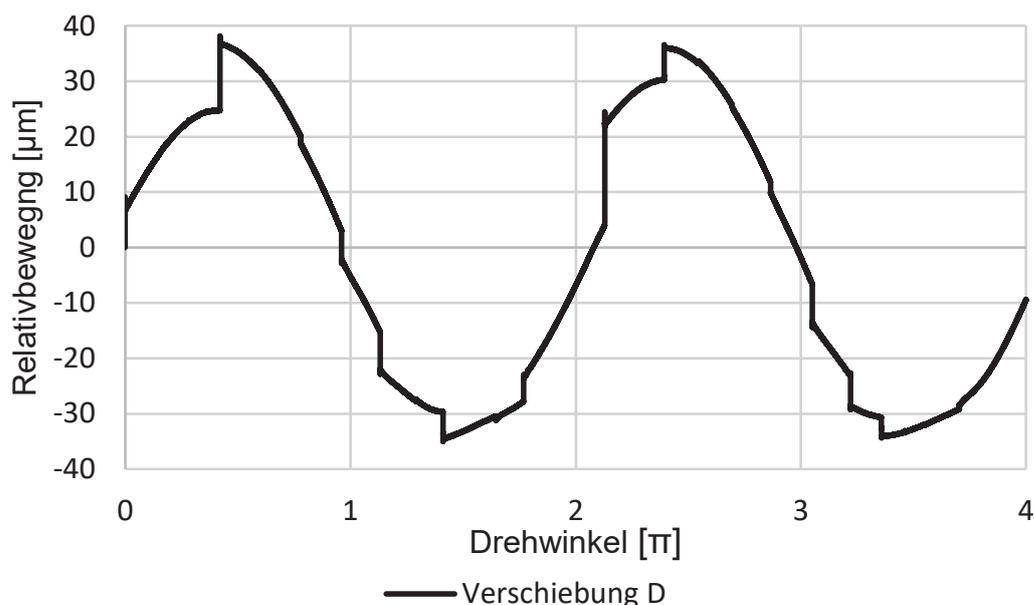


Abbildung 4: Gemessene Verschiebung D an der knackenden Verbindung

Um sicher zu gehen, dass die Sprünge im Wegsignal der Achse-Nabe-Verbindung mit den Knackgeräuschen übereinstimmen sind an der Nabe zusätzlich Beschleunigungssensoren angebracht worden. Um auch kleine Sprünge im Wegsignal gut sichtbar zu machen, ist die Ableitung des Verschiebungssignals gebildet worden. Dieses ist mit den Beschleunigungssignalen gegenübergestellt worden. Bei jedem Sprung im Wegsignal ist auch ein Peak im Beschleunigungssignal zu finden. Es ist jedoch nicht bei jedem Beschleunigungspeak ein Sprung im Wegsignal. Dies liegt darin begründet, dass über den Umfang der Nabe nur ein Verschiebungssensor appliziert wurde und somit nur die Verschiebung an diesem einem Punkt gemessen

wird. Eine Verschiebung die nicht hier stattfindet kann vom Sensor nicht erfasst werden und somit ist kein Sprung im Wegsignal vorhanden. In Abbildung 5 sind die beiden Signale gegenübergestellt.

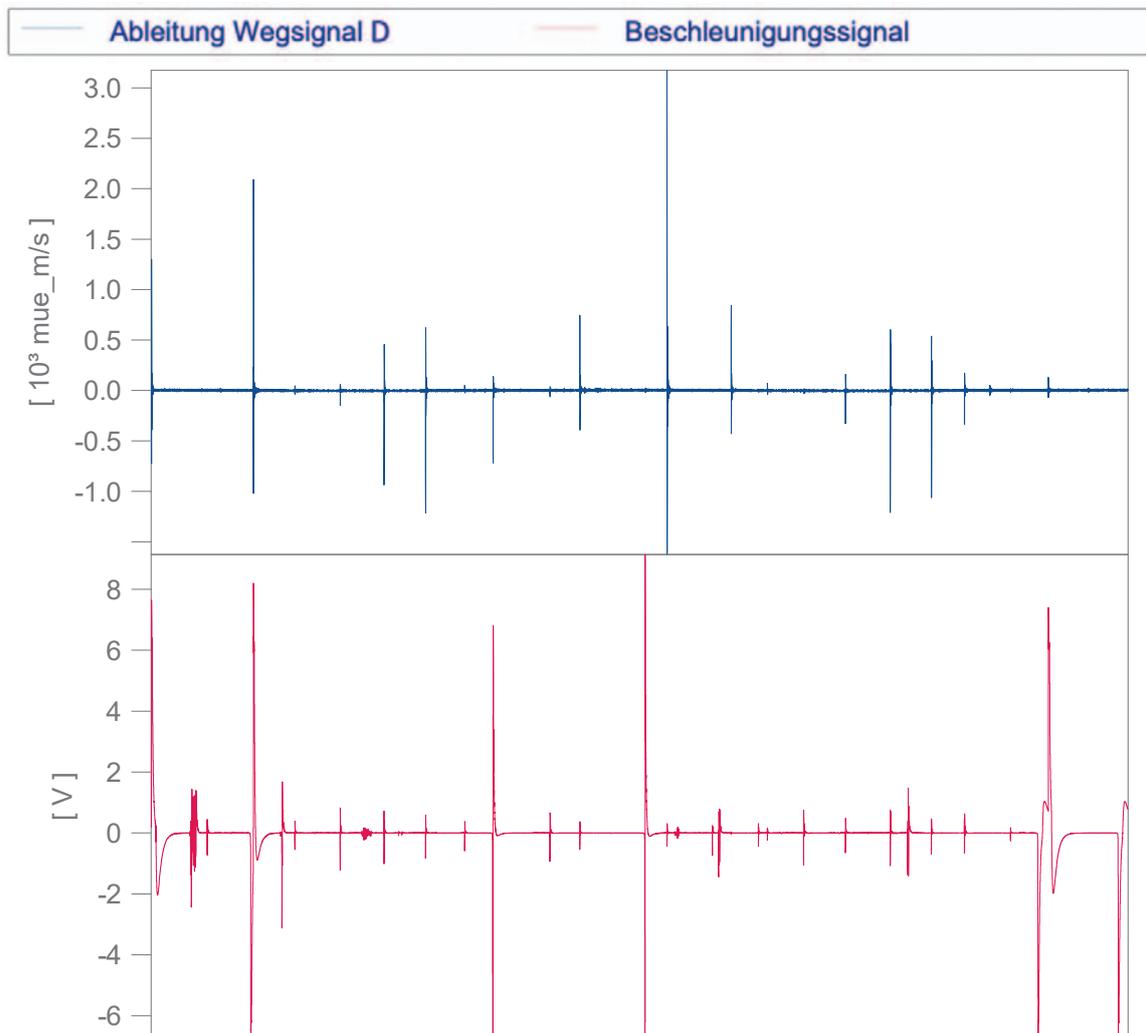


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Ableitung des Weg- und des Beschleunigungssignals

Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse

Die Relativbewegung im Kontakt von Achse und Nabe kann in einer Simulation berechnet werden, vgl. Abbildung 6. Das gelöste Modell wurde dem IMW zur Auswertung vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Die gemessene axiale Verschiebung in der Verbindungsfuge kann in der Simulation als die „Sliding distance“ also Verschiebungsweg mit dem Kontakt-Tool ausgewertet werden. Die Sliding distance wird aus den drei im Raum möglichen Verschiebungen, per dreidimensionalem Pythagoras, berechnet. Für den zylindrischen Achse-Nabe-Kontakt sind dies die

axiale, radiale und tangentielle Verschiebung. Da die Verbindung als eine Presspassung ausgeführt ist, entfällt eine radiale Verschiebung. Da kein Drehmoment übertragen wird, ist eine tangentielle Verschiebung von der Achse und Nabe ebenfalls zu vernachlässigen. Die relative Verschiebung kann somit nur noch eine axiale Verschiebung der Oberflächen zueinander sein. In der Mitte der Pressverbindung ist ein dunkelblauer Bereich zu sehen, in diesem kommt es zu keiner Verschiebung. Der Pressverband versagt somit nicht in dem Sinne, dass sich die gesamte Nabe axial verschiebt.

An der linken Seite des dargestellten Kontaktes befindet sich das Achsenende im Lager. Die Verschiebung oben im Kontakt beträgt etwa 36 μm , seitlich in der neutralen Faser 11,5 μm und unten 56 μm . Die unterschiedlich starke Verschiebung zwischen der Ober- und der Unterseite des Kontaktes liegt darin begründet, dass der Kontakt reibbehaftet ist. Aufgrund des höheren Drucks auf der oberen Kontaktseite wirken höhere Reibkräfte, die ein Abgleiten der Flächen vermindern. Gegenätzlich ist es unten, aufgrund des geringeren Anpressdrucks können die Flächen hier besser aneinander abgleiten. In der neutralen Faser entsteht ein „Offset“ durch die Durchbiegung im Vergleich zur unbelasteten Verbindung.

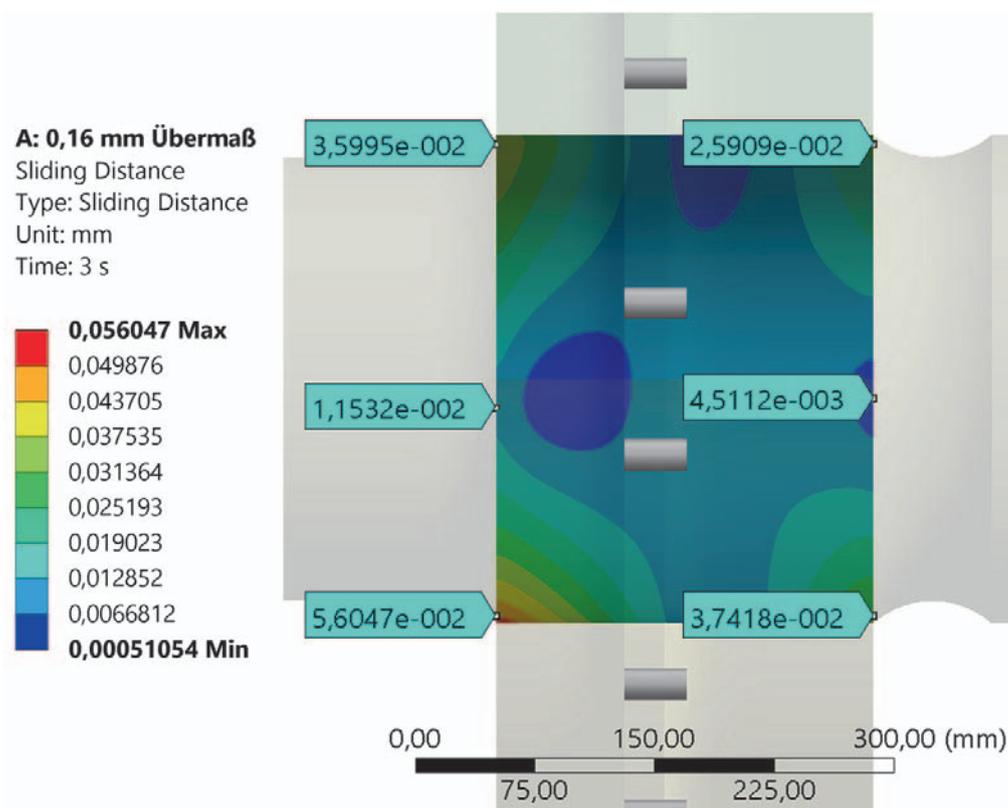


Abbildung 6: Relativbewegung der Kontaktflächen im Pressverband

Um die Amplitude beim Umlauf der Achse zu berechnen, wird die Verschiebungsdifferenz zwischen der oberen Verschiebung und der neutralen Faser, sowie der neutralen Faser und der unteren Verschiebung berechnet. Damit ergibt sich die Amplitude zu

$$A = \frac{(36 \mu m - 11,5 \mu m) + (56 \mu m - 11,5 \mu m)}{2} \quad (1)$$
$$= 34,5 \mu m.$$

Die gemessene Amplitude an den Verbindungen treffen dieses Ergebnis sehr gut.

Zusammenfassung

Mit dem am IMW entwickelten und gefertigten Sensor konnte der Nachweis erbracht werden, dass es zu einer diskontinuierlichen Relativbewegung zwischen der Achse und der Nabe an der äußeren Kante des knackenden Pressverbands kommt. Die Messungen stimmen dabei gut mit den aus Simulationen erwarteten Verschiebungen überein.

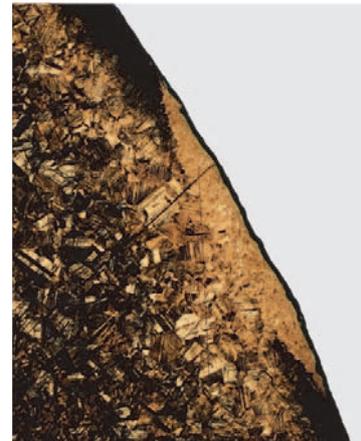
Literatur

- /1/ HBM GmbH: Der Weg zum Messgrößenaufnehmer, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2008

DFG SPP 2305: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff als sensorintegriertes Maschinenelement

Heinrich, C.; Gansel, R.*; Schäfer, G., Barton, S.*;
Lohrengel, A.; Maier, H. J.*

* Institut f. Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover



Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 2305 „Sensorintegrierte Maschinenelemente“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird eine Zahnwellenverbindung entwickelt, welche kabellos und ohne Beeinflussung der Form und Primärfunktion Informationen zur Belastungshistorie bereitstellen kann.

A splined shaft connection is developed within the framework of priority program 2305 “Sensor-integrating machine elements” of the German Research Foundation (DFG), which can wirelessly provide information on the load history without affecting its shape or primary function.

Sensorintegrierte Maschinenelemente

Sensorintegrierte Maschinenelemente (SiME) in der Klassifikation nach /1/ zeichnen sich dadurch aus, dass sie als Austauschlösung zu konventionellen, nicht mit Sensoren ausgestatteten Maschinenelementen funktionieren, da die Sensorintegration bauraumneutral und kabellos erfolgt. Demgegenüber steht der klassische Sensoranbau („sensortragendes Maschinenelement“), bei welchem zusätzlicher Bauraum für den Sensor sowie für Lösungen für Datentransfer und Energieversorgung wie z. B. Schleifringübertrager vorgesehen werden muss, was erheblichen konstruktiven Aufwand bedeutet.

Mit Mikroelektronikbausteinen, welche für Massenprodukte wie Smartphones eingesetzt werden, ist die flächendeckende Anwendung von SiME im Feld, und nicht nur in Sonderanwendungen oder im Prototypentest, denkbar. Damit ist die Auslegung mit geringerer rechnerischer Sicherheit möglich, wenn ein Prüfsystem existiert, welches den Nutzer bei Überlastung frühzeitig informieren kann. Zudem können zeitfest ausgelegte Bauteile bei Sensornutzung im Feld unter präziserer Bewertung der Restlebensdauer zweckdienlich ausgetauscht werden. Weiterhin lassen sich deutlich hochwertigere Daten für die Produktentwicklung gewinnen, als wenn wie bisher nur einige wenige Testfahrzeuge o. Ä. eingesetzt werden.

Forschungsherausforderung ist u. A., die Sensorik ohne nennenswerte Schwächung des Maschinenelements zu integrieren, und eine Messkette mit äußerst

geringem Energiebedarf aufzubauen, um auch bei langlebigen Maschinen mit kleinen Pufferspeichern und Energy Harvesting auf dem Bauteil arbeiten zu können.

Konzept

Die konventionelle Belastungserfassung per Dehnungsmessstreifen (DMS) würde eine konstante elektrische Energieversorgung und eine konstante Abtastung mit hoher Frequenz erfordern. Zur Minimierung des Energiebedarfs wird daher die Nutzung eines sensorischen Werkstoffs vorgesehen, welcher zu beliebig weit auseinanderliegenden Zeitpunkten elektrisch ausgelesen werden kann, selber jedoch keine elektrische Energie benötigt.

Metastabiler Austenit, welcher bspw. beim oft eingesetzten Edelstahl X5CrNi18-10 (1.4301) vorliegt, wandelt bei Belastung oberhalb einer Grenzlast zu Martensit um. Diese irreversible Gefügeänderung kann mittels Wirbelstromprüfung zur digitalen Datenverarbeitung erfasst werden, da sich insbesondere die magnetischen Werkstoffeigenschaften ändern, und ist somit sensorisch nutzbar. Nach entsprechend vielen Lastzyklen über der Auslösegrenze oder einer besonders hohen Überlast ist die sensorische Nutzbarkeit „verbraucht“, da der Martensitanteil maximal ist, und bei folgender Belastung nicht mehr weiter steigen kann.

Während die Wirbelstromprüfung durch einen Techniker mit einem Handgerät bei planmäßigen Wartungen denkbar ist, wird für das sensorintegrierte Maschinenelement ein Wirbelstromsensor in Form einer Spule in Folienbauweise (ähnlich DMS) und eine Auswerteeinheit zur Informationsverarbeitung in das Bauteil fest verbaut (Abbildung 1), so dass im laufenden Betrieb bei einer ausreichenden zur Verfügung stehenden Energiemenge Informationen erfasst werden können.

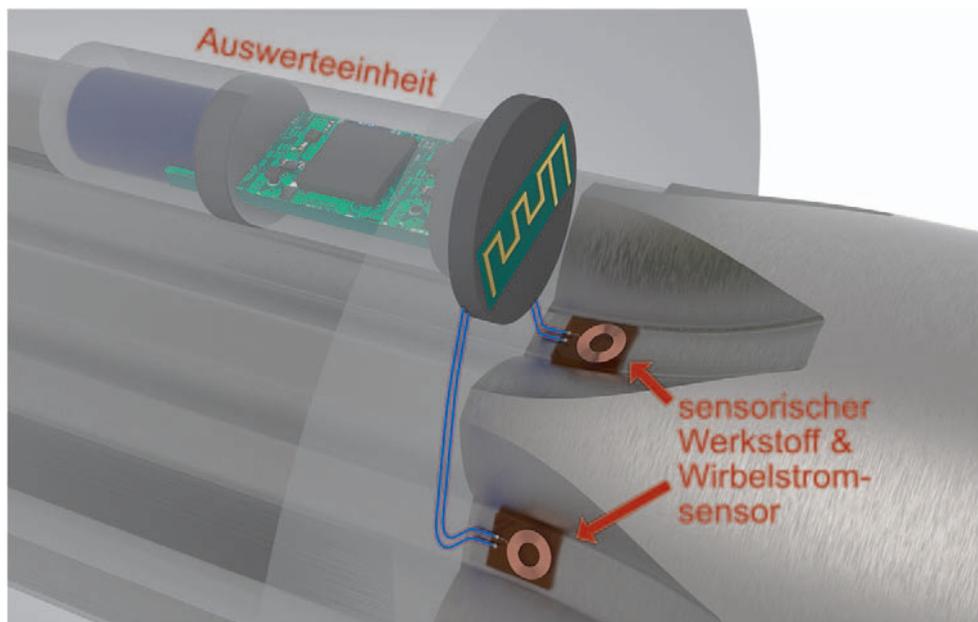


Abbildung 1: Konzept

Sensorischer Werkstoff

Die Nutzung der sensorischen Werkstoffeigenschaft in technischen Anwendungen wurde bereits von verschiedenen Forschungsstellen demonstriert.

In /2/ wurde eine Überwachungslösung für Brücken vorgestellt, in welcher ein Stab aus metastabilem Austenit angeschraubt wird und so die Dehnungen des darunter liegenden Bauteils erfährt (in der Klassifikation nach /1/ wird so ein sensortragendes Bauteil erzeugt). Ähnlich wurden in /3, 4/ Drähte als Sensor in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff eingewebt, um später deren Gefügeänderungen auslesen zu können. In /5/ wurden Felsanker mit einem Abschnitt aus sensorisch nutzbarem Stahl sowie komplett aus sensorisch nutzbarem Stahl hergestellte Felsplatten für die Einsatzgebiete Streckenausbau im Bergbau und Hängebrückenverankerung entwickelt. Eine testweise am Bauteil angebrachte Auswerteeinheit war zu groß und enthielt die eingesetzte Batterie zu schnell. Vorgesehen wurde die Auswertung durch Techniker bei Inspektionen mit Handgeräten. Analog wurde in /6/ die Restlebensdauerbewertung von kompletten Edelstahlbauteilen von Atomkraftwerken durch die Erfassung des magnetischen Anteils bei Inspektionen beschrieben. In /7/ wurden Legierungen für Sensorschrauben entwickelt, die höhere Zugfestigkeiten als kommerziell verfügbare Stähle im metastabilen austenitischen Zustand aufweisen. Eine Auslesespule wurde in eine mitverbaute Unterlegscheibe integriert, an welche vom Wartungstechniker ein Auslesegerät angeschlossen werden kann.

Für ein sensorintegriertes Maschinenelement als Austauschlösung muss der sensorisch nutzbare Werkstoff mit dem vorher eingesetzten, nicht sensorisch nutzbarem, vergleichbare Festigkeitseigenschaften aufweisen. Im austenitischen Zustand haben die kommerziell erhältlichen in Frage kommenden Legierungen jedoch vergleichsweise niedrige Fließgrenzen, während sie im nicht mehr zur Lastaufzeichnung nutzbaren („bereits ausgelöst“) martensitischen Gefüge konkurrenzfähig sind. Wenn von der Entwicklung von Speziallegierungen wie in der oben angesprochenen Quelle /7/ abgesehen werden soll, ist es naheliegend, das Bauteil mit martensitischem Gefüge herzustellen, und lokal per Laserwärmebehandlung zu Austenit umzuwandeln um so einen definierten Sensor zu erzeugen. Dies wurde in /8/ an Werkstoffproben demonstriert. Das Artikeltitelbild zeigt einen Schliff durch solchen Sensorpunkt. Abseits der Zahnwellenanwendung bieten sich so Bauteile für gelaserte Werkstoffsensoren an, die während ihrer Fertigung ohnehin schon eine Laserkabine durchlaufen wie z. B. zu schweißende Fahrwerkteile.

Die Umwandlungskinetik hängt signifikant von der Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit ab /9/, was die Interpretierbarkeit des Messsignals erschwert. Zu beiden Einflüssen existieren Modelle /9/, mit denen ein Umrechnungsversuch unternommen werden kann. Die Messsignalbewertung ist somit Forschungsherausforderung.

Systemstruktur

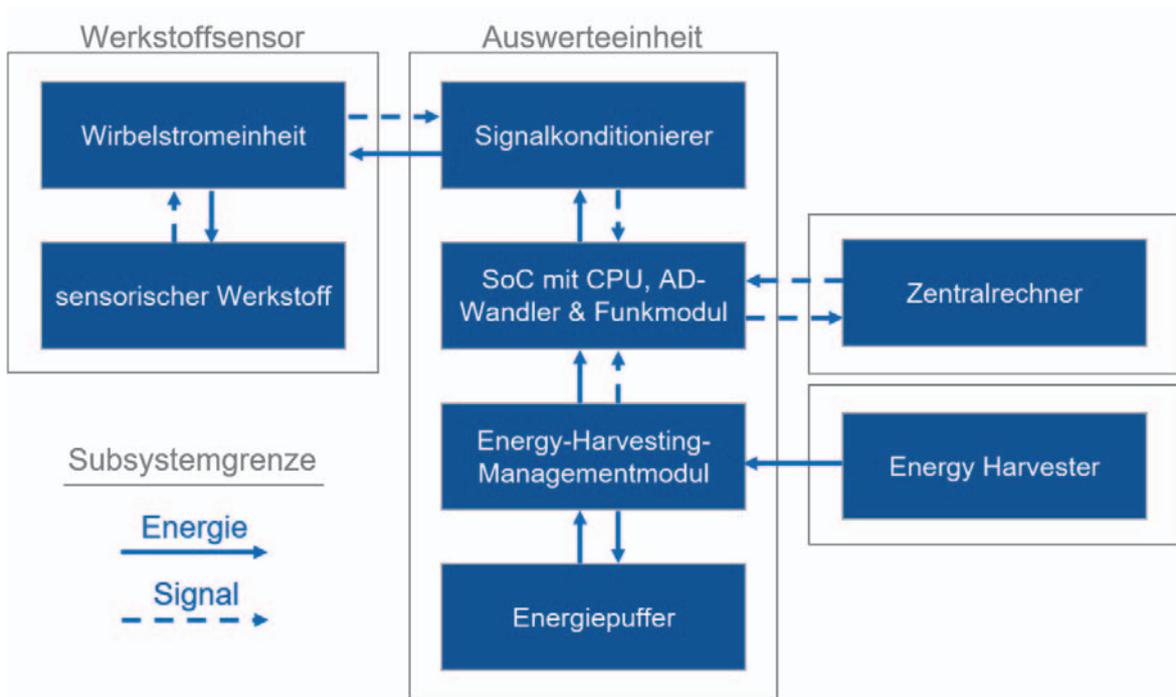


Abbildung 2: Systemstruktur

Die Systemstruktur des in Abbildung 1 dreidimensional gezeigten Konzepts zur Sensorintegration an der Zahnwelle ist in Abbildung 2 als Blockdiagramm dargestellt. Räumlich getrennt und nur durch an der Bauteiloberfläche verlegte Kabel elektrisch verbunden sind die Subsysteme Werkstoffsensor und Auswerteeinheit mit SoC (system on a chip), welche die Signalverarbeitung, das Energiemanagement und die Kommunikation übernimmt. Der Energy Harvester kann je nach Anwendungsfall auch mit dem System Auswerteeinheit zusammengelegt werden. Der Zentralrechner fasst die Informationen verschiedener SiME zusammen und stellt eine Benutzerschnittstelle dar bzw. kommuniziert mit weiteren, zu anderen Maschinen gehörenden Rechnern bzw. Rechenzentren.

Für die Integration der Auswerteeinheit wurden je nach Anwendungsfall zwei Positionen und Bauformen als sinnvoll zur Erfüllung von Anforderungen hinsichtlich der Fertigbarkeit, Kerbwirkung, Positionsverfügbarkeit etc. identifiziert /10/. Für den Längenausgleich von Gelenkwellen und Systemverbindungen wie Getriebeeingänge befindet sich direkt neben der Zahnwelle die Wellenstirnseite, so dass der gering belastete Wellenkern genutzt werden kann. Bei Verbindungen in der Wellenmitte, bspw. bei der Zahnradmontage kann in vielen Fällen Bauraum im Nabenkörper gefunden werden, welcher deren Primärfunktion nicht behindert, wie es bspw. von Leichtbaubohrungen in Zahnradkörpern bekannt ist (Abbildung 3).

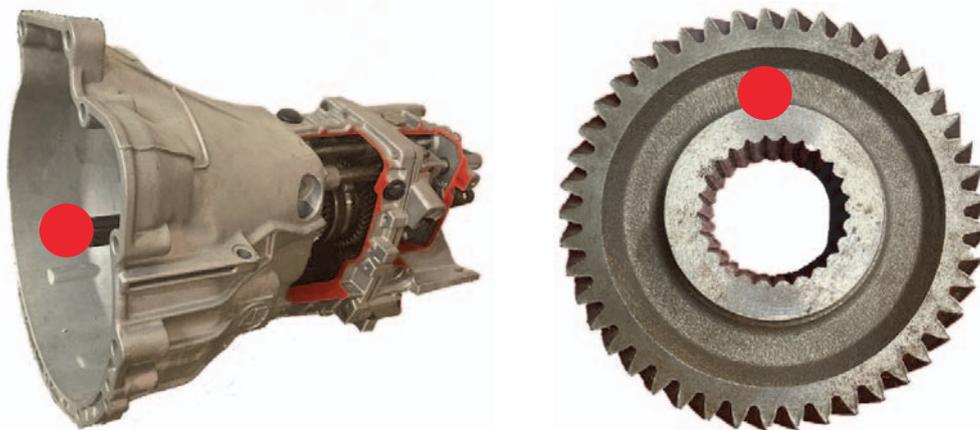


Abbildung 3: sinnvolle Positionen für Auswerteeinheit, rot markiert an Wellen-(links) bzw. Nabenstirnseite (rechts)

Forschungsausblick

Ziel des Forschungsvorhabens ist der Funktionsnachweis des beschriebenen Konzepts eines sensorintegrierten Maschinenelements, was im Prototypentest auf einem Zahnwellenprüfstand mündet. Dazu werden Werkstoffeignung und Laserwärmehandlungsverfahren untersucht. Die Schwächung des Bauteils durch den Sensor und die Interpretierbarkeit des Martensitanteils als schädigungsäquivalentes Signal werden simulativ untersucht. Eine kompakte Auswerteeinheit mit einem Energy-Harvesting-System wird entwickelt.

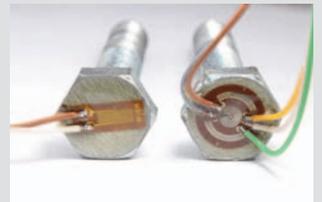
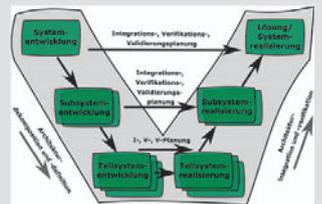
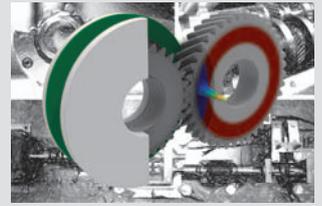
Danksagung

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

Literatur

- /1/ Vorwerk-Handing, G.; Gwosch, T.; Schork, S.; Kirchner, E. & Matthiesen, S.: Classification and examples of next generation machine elements. *Forschung im Ingenieurwesen* Bd. 84 (2020), Nr. 1, S. 21–32
- /2/ Thompson, L. D. & Westermo, B. D.: New strain measurement technology for material damage assessment. *Smart Structures and Materials 1994: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*. Bd. 2191 : SPIE, 1994, S. 380–391
- /3/ Lavere, K. A.; Thompson, L. D. & Kline, R. A.: Embodied passive sensor development for composites. *AIP Conference Proceedings* Bd. 615, American Institute of Physics AIP (2002), Nr. 1, S. 929

- /4/ Wielage, B.; Mäder, Th.; Nestler, D.; Schurig, Th.; Michaelis, B. & Sievers, S.: Belastungsmonitoring an Faserverbundwerkstoffen unter Ausnutzung der Gefügeumwandlung von Sensordrähten. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* Bd. 41 (2010), Nr. 6, S. 430–436
- /5/ Bemont, C. P.: Trip steels as smart sensor alloys. Dissertation Universität KwaZulu-Natal, 2013
- /6/ De Backer, F.; Schoss, V. & Maussner, G.: Investigations on the evaluation of the residual fatigue life-time in austenitic stainless steels. *Nuclear Engineering and Design* Bd. 206 (2001), Nr. 2, S. 201–219
- /7/ Vugampore, J.-M. V.: Development of high strength material for smart aircraft bolt. Dissertation Universität KwaZulu-Natal, 2005
- /8/ Mroz, G.; Reimche, W.; Frackowiak, W.; Bruchwald, O. & Maier, H. J.: Setting Discrete Yield-stress Sensors for Recording Early Component Loading Using Eddy-current Array Technology and Induction Thermography. *Procedia Technology* Bd. 15 (2014), S. 484–493
- /9/ Stringfellow, R. G.; Parks, D. M. & Olson, G. B.: A constitutive model for transformation plasticity accompanying strain-induced martensitic transformations in metastable austenitic steels. *Acta Metallurgica et Materialia* Bd. 40 (1992), Nr. 7, S. 1703–1716
- /10/ Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; & Maier, H. J.: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff. Tagungsband zur 9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2022), S. 253–257



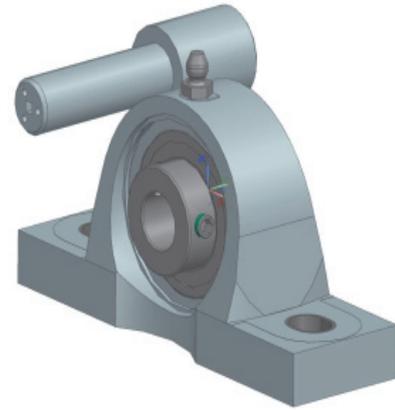
Hochschule und Kontakte

D

CAD-Umstellung am IMW

Losch, M.; Meyer, J.; Lohrengel, A.; Inkermann, D.

CAx- und PDM-Systeme unterstützen heute verschiedene Aufgaben im Entwicklungsprozess und stellen vielfältige Funktionen zur Erstellung und Analyse von Produktmodellen sowie der Handhabung von Produktinformationen bereit. Im Rahmen der Neukonzeption der CAD-Lehre wurde am IMW ein neues CAx- und PDM-System eingeführt. Durch diese Umstellung soll eine praxisnahe Ausbildung von CAD-Grundkenntnissen und erweiterten Techniken der virtuellen Produktentwicklung vermittelt werden.



CAx and PDM systems support various tasks within the development process and provide a wide range of functions for generating and analyzing product models as well as handling product information. As part of the redesign of CAD teaching, a new CAx and PDM system was introduced at IMW. Through this conversion, a practical training of CAD basic knowledge and advanced techniques of virtual product development shall be taught.

Ausgangssituation und Zielsetzung

Bisher wurde am IMW PTC Creo Parametric als CAD-System in Lehre und Forschung verwendet. Schwerpunkte der Lehre waren die grundständige CAD-Ausbildung für eine Vielzahl von Studierenden sowie weiterführende Lehrveranstaltungen, wie beispielsweise das Fachpraktikum Konstruktion und Simulation. Um zukünftig weitere Anwendungen wie beispielsweise Virtuelle Inbetriebnahme in der Lehre abbilden zu können, wurden zusätzliche Softwarelösungen eingesetzt. In Abbildung 1 sind exemplarische Anwendungsfälle dargestellt. Letztlich sind ebenfalls neue Ausbildungskonzepte, wie beispielsweise eine projektbezogene Lehre relevant. Eine kollaborative Generierung und Verwaltung von CAD-Baugruppen scheint gerade in Teamprojekten interessant. Ebenfalls sollen Lernziele wie das Arbeiten mit modernen Workflows für eine Produktdatenverwaltung bereits in der Grundlagenausbildung umgesetzt werden. Dabei soll beispielsweise erlernt werden, wie eine ordnungsgemäße Freigabe von CAD-Modellen oder eine Verfolgung von Änderungen erfolgen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die praktisch orientierte Virtuelle Inbetriebnahme, welche im Praktikum Konstruktion und Simulation mit 3D-CAD Anwendung finden soll. Weitere Themenfelder wie das Produktdatenmanagement, das Anforderungsmanagement, Änderungsmanagement, sowie das Struktur- und Konfigurationsmanagement sind Bestandteile eines neuen Ausbildungskonzeptes.

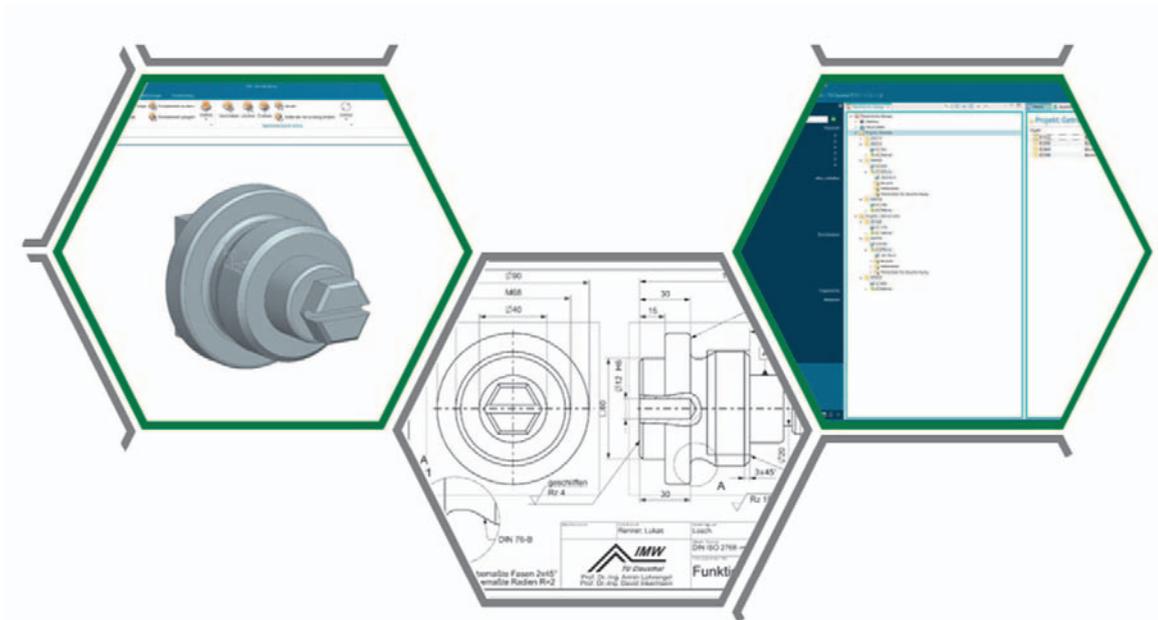


Abbildung 1: Vernetzung CAD und weitere Themenfelder

Im Rahmen der Umstellung des Hochschulrahmenvertrags wurden die neuen Anforderungen an ein CAX-System erhoben und mit dem bestehenden Funktionsumfang abgeglichen. Hierbei wurden primär die in Tabelle 1 aufgeführten Anwendungsfälle zugrunde gelegt. Die Übersicht zeigt auf, dass die zukünftigen Anwendungen deutlich über die Geometriemodellierung (z.B. Konstruktion einfacher Baugruppen) hinausgehen. Hieraus hat sich insbesondere die Anforderung an eine möglichst durchgängige Lösung mit minimalem Aufwand für die Realisierung und Pflege von Schnittstellen ergeben. Diese Anforderungen haben im Abgleich mit weiteren Hochschulen in Niedersachsen zur Auswahl der Siemens Produkte für CAX- und PDM-Lösungen geführt. Für die Lehre und Forschung stehen an der TU Clausthal campusweit zukünftig Siemens NX und TeamCenter mit unterschiedlichen Funktionsmodulen zur Verfügung.

Tabelle 1: Vorgesehene Anwendungsfälle für die CAX und PDM-Lehre, grundlegende Anforderungen und Grobbewertung von Siemens NX

Anwendungsfall	Anforderungen	Siemens NX
Systemanbindung Produktdaten- management	CAD-systeminterne Anbindung an ein Produktdatenmanagement- system, wie z.B. TeamCenter	<i>Umfangreich möglich</i>
Virtuelle Inbetriebnahme	Integration von Sensor- signalen (z.B. Anschläge) in die kinematische Simulation, Beschreibung der Steuerungslogik	<i>Mit zusätzlichem Modul einfach möglich</i>
Varianten- management	Erstellung und Management von Teilefamilien und Varianten von Baugruppen	<i>In Grundversion und Verbindung mit TeamCenter möglich</i>
Anforderungs- management	Definieren und Handhaben von Anforderungen	<i>Mit zusätzlichem Modul (Concept- Modeller) möglich</i>
Mehrkörper- simulation	Simulationsentwicklung und programminterne Fortführung zur Virtuellen Inbetriebnahme	<i>Durchführbar und fortsetzbar</i>
Anbindung von Virtual Reality	Umsetzung von VR-Szenen mit umfangreichen Geometriemodellen	<i>Gut umsetzbar</i>

Einführung von Siemens NX in der Grundlagenausbildung

Im ersten Schritt sollte die Lehre im Fach Technisches Zeichnen/CAD im Sommersemester 2022 mit der neuen CAD-Software Siemens NX starten. Für dieses Semester wurden für das CAD-Projekt noch PTC Creo Parametric (für die Wiederholenden) und Siemens NX parallel angeboten. Nach und nach sollten alle weiteren Lehrveranstaltungen auf Siemens NX wechseln. Hierbei stand an erster Stelle, dass die Studierenden, die mit PTC Creo Parametric den Umgang mit einer CAD-Software erlernt haben, die folgenden Lehrveranstaltungen im Regelstudienplan, wie z.B. das Maschinenelemente Projekt, oder das Praktikum Konstruktion & Simulation mit 3D-CAD mit der erlernten Software absolvieren sollten, ohne sich grundlegend in ein neues Programm einarbeiten zu müssen.

Doch bevor Siemens NX in der Lehre eingesetzt werden konnte, mussten die Lehrverantwortlichen und Mitarbeiter:innen des Instituts den Umgang mit dem Programm erlernen. Hierfür wurde eine dreitägige Online-Schulung Ende März durch ein externes Unternehmen durchgeführt.

Neben einzelnen Herausforderungen bei der Vorbereitung der CAD-Software Siemens NX für den Lehrbetrieb mussten studentische Hilfskräfte als Tutoren ausgebildet werden. Hierzu wurden motivierte CAD-HiWis intern geschult und auf die wichtigen Aufgaben in der Lehre vorbereitet. Ebenso musste das CAD-Skript und die Lehrunterlagen auf Siemens NX umgestellt werden.

Nachdem Siemens NX auf allen Lehr-Pool-PCs installiert war, konnte der erste CAD-Durchlauf mit Siemens NX starten. In den ersten Tutorien traten noch einzelne Problemstellungen auf, die schrittweise gelöst werden konnten.

Fazit

Bedingt durch die kurze Umstellungszeit, der wenigen vorlesungsfreien Wochen zwischen Winter- und Sommersemester, war die praktische Umstellung von PTC Creo Parametric auf Siemens NX eine Herausforderung. Gleichzeitig wurde mit der Einführung in der Lehre die Grundlage für die Realisierung weiterer Anwendungsfälle für die Virtuelle Produktentwicklung gelegt. Die Einarbeitung der Lehrenden hat einige Anstrengung erfordert. Der kontinuierliche Lernprozess wurde von den Studierende motiviert aktiv mitgestaltet. Eine Softwareumstellung ist immer mit zeitlichem Aufwand und unerwarteten Fehlern behaftet, so auch die Umstellung auf Siemens NX. Die investierte Zeit hat sich jedoch ausgezahlt, da der erste Durchlauf mit der neuen CAD-Software, bis auf kleinere Zwischenfälle, durchaus positiv verlief.

50 Jahre Institutsmitteilung

Schäfer, G.; Wächter, M.

Dieser Artikel bietet eine Zusammenfassung über die Entwicklung der Institutsmitteilung in den letzten 50 Jahren. Überzeugen Sie sich selbst, dass in dieser Zeit die Institutsmitteilung erwachsen geworden ist.



This article provides a summary of the development of the Institute Communication over the last 50 years. See for yourself that during this time the Institute Communication has come of age.

Rückblick auf 50 Jahre wissenschaftliches Wirken

Im Jahre 1972 erschien die erste Mitteilung aus dem Institut für Maschinenwesen herausgegeben vom damaligen Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. Albert Kuske. Im Vorwort der Herausgeber ist nachfolgendes zu lesen:

„Die Arbeiten, die an dem Institut für Maschinenwesen ausgeführt werden, beziehen sich in erster Linie auf die Spannungsanalyse an Bauteilen verschiedener Form und Belastungsart. Hierfür werden analytische, numerische und experimentelle Verfahren benutzt. Das Ziel solcher Untersuchungen ist stets, Unterlagen für die Beurteilung bzw. Verbesserung von Konstruktionen zu schaffen.

Hierüber wird zwar in Veröffentlichungen, Dissertationen, Vorträgen usw. berichtet, jedoch wünschen an diesem Gebiet Interessierte konzentrierte Hinweise z. T. bereits vor der Veröffentlichung. Diesem Zweck sollen diese Mitteilungen dienen, die in unregelmäßigem Abstand erscheinen werden.“

Dieser Intention sind wir auch noch heute, nach 50 Jahren und in der 47. Auflage verpflichtet.

Die erste Auflage im Umfang von 30 Seiten beinhaltete sieben Artikel, z. B. „Auswertung Spannungsoptischer Stoßuntersuchungen“ oder „Verminderung der Spannungskonzentration in Kerben durch Entlastungskernen“ auch heute noch ein spannendes Thema. Die mit Schreibmaschine verfassten Artikel waren teils mit schwarz-weiß Fotografien oder Zeichnungen ergänzt.

In den Folgejahren wurden die aktuellen Forschungsthematiken nahezu jährlich in einer durchschnittlich 20-seitigen Mitteilung veröffentlicht. Im Jahre 1978 erschien die letzte Institutsmitteilung unter dem Herausgeber Prof. Kuske. Die

Weiterentwicklung war ersichtlich, so rundet ein Titelbild und auch ein Inhaltsverzeichnis diese Ausgabe ab.

Die 9. Ausgabe erschien dann unter dem nachfolgenden Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz im März 1981. In dem Vorwort stellt sich Prof. Dietz vor und weist darauf hin, dass *„die Lehr- und Forschungsaufgaben des Institutes einige neue Schwerpunkte erhalten. Die Konstruktion von Maschinenelementen, ihre Berechnung und Gestaltung ist nach wie vor Hauptaufgabe in Lehre und Forschung.*

....

Die Methoden einer modernen Konstruktionssystematik werden neben den Lehrgebieten über Werkzeugmaschinen und Fertigungsmethodik neu in die Ausbildung der Studenten aufgenommen. Dadurch zeichnen sich neben den bisherigen Schwerpunkten künftig auch neue Forschungsgebiete des Institutes für Maschinenwesen ab.“

So findet man in dieser Ausgabe, neben den Thematiken zur statischen und dynamischen Spannungsoptik auch Themen wie „Umformen und Drehen - Ein Verfahrensvergleich und neue Folgerungen für den wirtschaftlichen Maschineneinsatz“ auch den Hinweis, dass die Finite Elemente Berechnung Einzug hält in die Forschungsfragen des Institutes „Vergleichende Betrachtung der Kerbspannungsanalyse an einem Walzenständer, durchgeführt mit der Spannungsoptik und der Methode der Finiten Elemente“.

Die nächste Institutsmitteilung erscheint im Jahre 1982 und weist erstmalig ein Autorenverzeichnis auf. Durch das Vorwort erhält der interessierte Leser Einblicke in die allgemeine Situation des Institutes wie z. B. allgemeine Haushaltssperre, Personal- und Studierendenzahl oder Umstrukturierung im Lehrbetrieb. In dieser Ausgabe musste leider das Ableben von Prof. Kuske angezeigt werden. Zum Gedenken an Prof. Kuske wird an sein Wirken für die Lehre und Forschung auf zwei Seiten erinnert. Die Institutsmitteilung weist mittlerweile einen Umfang von 90 Seiten auf, dies ist neben einer Vielzahl von Artikeln auch dem Umstand geschuldet, dass auch aktuelle Auszüge aus Fachpublikationen sowie Berichte aus der Lokalpresse angefügt sind.

Von 1982 bis 1988 erscheinen die Institutsmitteilungen jeweils im zweijährigen Rhythmus.

In der 11. Auflage deutet sich der Wandel im Institut auch an den Themen der Institutsmitteilung an, so findet man neben der Spannungsoptik Themen aus dem Bereich der Akustik, der FE-Berechnung, dem Festigkeits- und Verformungsverhalten von Seiltrommeln oder der Dauerfestigkeit von Schrauben. Auch im Layout kann ein Wandel festgestellt werden, ein zweiseitiges Layout zeigt, dass die Erstellung mit Schreibmaschine der Vergangenheit angehört, die Textverarbeitung hält Einzug im Institut.

Im Jahr 1989 kann das Institut für Maschinenwesen auf 60 Jahre zurückblicken und dies wird unter anderem im Titelbild der Institutsmitteilung gewürdigt. Ein Blick in die

Maschinenhalle von etwa 1930, Abbildung 1, durchbricht die bisherige Darstellung spannungsoptischer Aufnahmen. Im Jahr 1989 weist das Institut 18 wissenschaftliche Mitarbeiter auf, diese bearbeiten Fragestellungen aus dem 1986 eingerichteten Sonderforschungsbereich 180 "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen", der Zahnwellenforschung, der CAD-NC-Kopplung, der Konstruktionstechnik und der Spannungsoptik um nur einen kleinen Einblick zu geben.



Abbildung 1: Titelbild der Institutsmitteilung 1989

Die Leonardsätze und Marmortafeln mit Anzeigeeinstrumenten sind inzwischen z. B. Maschinen für die additive Fertigung metallischer Bauteile, Abbildung 2, und einem Biomechaniklabor zur Entwicklung von ergonomisch optimierten Trainingsgeräten, Abbildung 3, gewichen.

Von 1989 an erscheinen die Institutsmitteilungen wieder im jährlichen Rhythmus zur Weihnachtszeit.

In der 16. Auflage ist der Fokus neben den Forschungsthemen zum Sonderforschungsbereich 180, den Welle-Nabe-Verbindungen und auch den Neuerungen in der Lehre mit der Einrichtung des CIM-Labors gewidmet.

Die Institutsmitteilung ist im Jahr 1993 nun auch den Jugendjahren entwachsen, ein nochmals überarbeitetes ansprechendes Layout und farbige Abbildungen, einer

Vielzahl unterschiedlicher Artikel auf über 100 Seiten sind das Ergebnis. Die einzelnen Artikel sind neben der Druckversion nun auch auf der Internetseite des Institutes abrufbar.

https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmitteilungen/1993_InstMit.pdf

Im Vorwort von Prof. Dietz steht zu lesen *„Bei all diesen Forschungsaktivitäten wird das Institut immer voller: Mit jetzt 32 wissenschaftlichen Mitarbeitern (bei nur 3 Planstellen) und 4 Gastwissenschaftlern ist das Gebäude bis unter den letzten Dachsparren angefüllt, die Zeichensäle mit Computern und Lehrveranstaltungen voll ausgelastet und selbst der ehemalige Kaffeeraum mit drei Mitarbeitern belegt.“* Anmerkung der Redaktion: Im Vorwege hatte Prof. Dietz sich natürlich um einen neuen „co working space“ im Dachgeschoss des Instituts gekümmert.

Ab der 19. Auflage im Jahr 1994 werden die Berichte zu den Forschungsthemen gegliedert in der Institutsmitteilung, so findet man Berichte zu „Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen“, „Konstruktionssystematik und Informationstechnik“, „Verfahrenstechnische Maschinen“, „Maschinenakustik und Pneumatik“, „Experimentelle Festigkeitsermittlung“ oder Wissenschaftliche Kooperationen“, ferner wird ein Abschnitt „Das Institut: Ausstattung und Aktivitäten“ neu aufgenommen, so dass mittlerweile von einem Buch mit 157 Seiten gesprochen werden kann.

Im Jahre 1997 wird in der 22. Institutsmitteilung neben den üblichen Artikeln zur tagesaktuellen Forschung von der neuen Professorenstelle „Rechnerintegrierte Produktentwicklung“ berichtet, die seit dem 01. Oktober mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller besetzt ist. *„Alte IMW'ler kennen Herrn Müller aus seiner Zeit an diesem Institut 1985 bis 1990, wo er unter anderem KCIM-Forschung einwarb und sich um den Aufbau des CIM-Labors bemühte.“*

Das Highlight des Jahres 1999 war ohne Frage der 60. Geburtstag von Prof. Dietz, welcher zünftig mit Familie, Freunden, Kollegen und Angehörigen des Institutes gefeiert wurde. Die Umtriebigkeit von Prof. Dietz kann auch heute noch in der Institutsmitteilung nachgelesen werden.

https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmitteilungen/1999_InstMit.pdf

Im Jahr 2000 erfährt die Institutsmitteilung ihr erstes Jubiläum, die 25. Mitteilung erscheint. Ferner feiert die TU Clausthal ihr 225-jähriges Bestehen, diesem Umstand ist auch ein Beitrag gewidmet. Die Amtszeit von Prof. Dietz als Rektor der TU Clausthal endet und er kann sich nach eigenen Aussagen *„...wieder dem Tragfähigkeitsverhalten und dem Verschleiß an Maschinenelementen widmen statt diese an Politikern und Kollegen zu erproben.“*

In der 31. Institutsmitteilung wird der Nachfolger von Prof. Dietz auf die Professur für Maschinenelemente und Konstruktionslehre für den 01. Februar 2007 mit Prof. Lohrengel angekündigt und damit sein Eintritt in den Ruhestand nach mehr als 27 Jahren als Leiter des Instituts für Maschinenwesen für den März 2007. Zu den fachlichen Themen des Institutes ist festzuhalten, dass die Maschinenakustik ein weiteres Standbein des Institutes geworden ist und sich das Prüffeld kontinuierlich erweitert hat.

Auch im Jahr 2007 gibt es eine Institutsmitteilung diesmal unter den Herausgebern Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel und Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller. Es ist für die TU Clausthal das Jahr der Vorbereitung auf die Gründung der NTH (Niedersächsische Technische Hochschule), ein Zusammenschluss der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der Uni Hannover. In den grundsätzlichen Themenstellungen der laufenden Forschungsaufgaben im IMW hat dies keinen Einfluss, da die Zahnwellen, Seiltrommeln und Körperschallanalysen innerhalb der NTH Alleinstellungsmerkmale sind.

Waren die Institutsmitteilungen der Vergangenheit als DIN A4 Format erschienen, so zeigt sich die 33. Auflage in einem handlichen DIN A5 Format, der Lesbarkeit und dem Informationsgehalt tut dies in keiner Weise einen Abbruch.

Die 35. Institutsmitteilung von 2010 steht unter der traurigen Nachricht vom tödlichen Unfall von Prof. Dietz in Südamerika im Alter von 70 Jahren. Mit 25 Fachartikeln über 200 Seiten und zeigt sich die Forschungslandschaft des Institutes aber auch in diesem Jahr auf vielfältige Weise.

Wie schon in der Vergangenheit muss das Institut auch in den folgenden Jahren auf die politischen Rahmenbedingungen in Forschung und Lehre reagieren und kann sich neuen Problemstellungen zu aktuellen Forschungsaufträgen aus Sicht der Mittelgeber oder der Industrie stellen, Themen wie Rapid Tooling oder Kreislaufwirtschaft bestimmen neben den klassischen Themen der Welle-Nabe-Verbindungen oder Seiltrommelforschung das Bild im Institut. Aber auch das Thema Umbau und Renovierung ist ein Dauerbrenner im IMW.

Die 41. Auflage aus dem Jahre 2016 berichtet vom Besuch des Ministers für Wissenschaft und Technologie der Volksrepublik China Herrn Dr.-Ing. Wan Gang im IMW. *„Im Vorfeld der Verleihung der Honorarprofessur der TU Clausthal traf sich Herr Dr.-Ing. Wan Gang mit ehemaligen Weggefährten am IMW zu einem gemütlichen und sehr persönlichen Austausch, um die gemeinsamen Momente aus alten Zeiten wieder zu beleben. Die angenehme und warmherzige Atmosphäre dieses Ereignisses wird den Teilnehmern noch lange im Gedächtnis bleiben.“*

Das Ausscheiden von Prof. Norbert Müller aus dem IMW und damit aus der TU Clausthal nach 22 Jahren als Inhaber der Professur für Rechnerintegrierte Produktentwicklung zeigt die Institutsmitteilung von 2019 auf. Glücklicherweise konnte die Professur bis zur Wiederbesetzung durch Herrn Dr.-Ing. David Inkermann

verwaltet werden, so dass die langjährige IMW-Tradition, alle Hebel für eine hohe Studierendenzufriedenheit in Bewegung zu setzen, bewahrt wurde.

Herausgeber der 46. Auflage der Institutsmittteilung im Jahre 2021 sind Herr Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel und Herr Prof. Dr.-Ing. David Inkermann, der zum 01. September 2021 auf die Professur für Integrierte Produktentwicklung berufen wurde und somit das Team im IMW erweitert. Seine Forschungsaktivitäten ließen sich bereits in seinem ersten Wirkungsjahr in der Institutsmittteilung unter der Rubrik Konstruktionsmethodik und rechnerintegrierte Produktentwicklung wiederfinden.



Abbildung 2: Lasersinteranlage

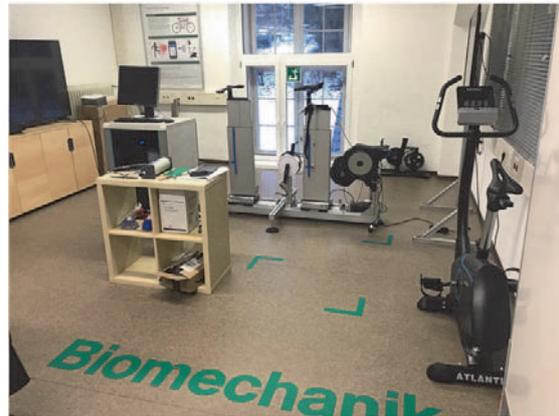


Abbildung 3: Biomechaniklabor

Zusammenfassung

In den 50 Jahren, in denen die Institutsmittteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen bisher erschienen sind, haben die Herausgeber Prof. Kuske, Prof. Dietz, Prof. Lohrengel, Prof. Müller sowie Prof. Inkermann durch die Unterstützung der wechselnden Redakteure dafür gesorgt, dass es vorrangig zur Weihnachtszeit Interessantes und Wissenswertes aber auch Lustiges zu lesen gab. Diese Zeit fordert in der Regel von den Mitarbeiter:innen noch einmal ihren vollen Einsatz für die Sache, aber dann ist Weihnachten!

In fast 800 Artikeln verfasst durch mehr als 200 unterschiedliche Autoren wurde bisher über die Forschung und Lehre aus dem Institut berichtet. Einige Ausgaben umfassen mehr als 30 Artikel. Die Neuigkeiten zur technischen Ausstattung oder Berichte zu Tagungen und hochschulpolitische Gegebenheiten runden die Informationen ab. Und nicht zu vergessen das Vorwort der Herausgeber, welches jedes Jahr mit Spannung im Institut erwartet wird.

Wir hoffen, dass auch diese Ausgabe im 50. Erscheinungsjahr Ihnen interessante Einblicke in das Institut liefert und Sie Freude am Blättern und Lesen haben.

20. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik an der TU Clausthal

Krahl, S.; Wächter, M.

Am 28. und 29. September fand das 20. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik in Clausthal statt. Damit beteiligte sich das IMW erneut nicht nur als Vortragender, sondern auch als Ausrichter an der Veranstaltung.



On September 28 and 29, the 20th "Joint Colloquium on Design Engineering" took place in Clausthal. Thus, the IMW participated in the event not only as a speaker but also as an organizer.

Ein Rückblick auf das KT-Kolloquium

Wie kann ein digitaler Zwilling die Entwicklung ergonomischer Hilfsmittel unterstützen? Welche Vorteile hat die Reflexion in einer agilen Produktentwicklung? Oder welche spezifischen Faktoren in Unternehmen müssen bei einer Kreislaufgerechten Konstruktion Berücksichtigung finden?



Abbildung 1: Blick in die Aula Academica der TU Clausthal

Diese und weitere Fragen sind im gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik, welches in der Aula Academica und im Institut für Maschinenwesen stattfand, behandelt worden.

Die RWTH Aachen, die Universität Rostock, die Otto von Guericke Universität Magdeburg, die Bergische Universität Wuppertal, die Universität Duisburg-Essen, die Universität Bayreuth, die TU Dresden und die TU Clausthal bilden einen Freundeskreis und sind wechselseitig für die Organisation des gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik verantwortlich.

Zum 20. Jubiläum fand das Kolloquium mit 45 Teilnehmer:innen in Clausthal statt. Das Kolloquium war ins Leben gerufen worden, um sich angesichts wachsender Herausforderungen bei Industrie- und Forschungsprojekten besser zu vernetzen. Es bietet jungen Wissenschaftler:innen die Möglichkeit dem Reifegrad ihrer Arbeit angemessenes Feedback zu erhalten. In ihrer Begrüßung lobte Frau Prof. Dr. Heike Schenk-Mathes, Vizepräsidentin für Gleichstellung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, dieses Format eines Austausches von jungen Nachwuchswissenschaftler:innen. Neben den Hochschulwissenschaftler:innen aus den verschiedensten Ingenieurgebieten, denen das Kolloquium ein kreatives Forum des Austauschs bot, waren Vertreter aus der Wirtschaft (Siemens) dabei. Insgesamt umfasste die Konferenz 24 Fachvorträge zu den Themen Modellbasierte Systementwicklung, Digitaler Zwilling, Produktdatenmanagement und Agile Methoden, KI-Methoden, Simulation und Produktentwicklung und Ressourceneffiziente Produktentwicklung. Vom IMW gehörten Theresa Ammersdörfer, M. Sc. und Phillip Wallat, M. Sc. zu den Referent:innen.



Abbildung 2: Theresa Ammersdörfer („Reflexion in der agilen Produktentwicklung“) und Phillip Wallat („Kreislaufgerechte Konstruktion mit Berücksichtigung spezifischer Faktoren in Unternehmen“) vom IMW bei der Vorstellung ihrer Forschungsthemen

Zum Rahmenprogramm zählten eine Führung durch das Oberharzer Bergwerksmuseum mit anschließendem Ausklang im Pferdegaipel sowie eine Abendveranstaltung im Glück-Auf-Saal. „Die Organisation ist gut gelaufen, das Feedback der Teilnehmer war positiv“, zog Prof. Dr.-Ing. Lohrengel eine zufriedene Bilanz. Im kommenden Jahr wird das Kolloquium fortgesetzt, die Ausrichtung wird dann der Lehrstuhl Konstruktionstechnik der Universität Rostock übernehmen.



Abbildung 3: *Impressionen vom 20. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktions-technik 2022*

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 aus 14 wissenschaftlichen Mitarbeitern /-innen. Weitere 8 Mitarbeiter/-innen arbeiten in der Verwaltung, IT, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

Technische Ausrüstung

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

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

vier Telemetrieanlagen (64, 32, 8, 4 Kanäle) bewältigt, die auch für ICP-Beschleunigungssensoren geeignet sind. Für die optische Beanspruchungs- und Verformungsmessung steht ein 3D-DIC-Messsystem der Firma LIMESS/DANTEC auf Basis der Digital-Image-Correlation zur Verfügung. Ein Schleuderprüfstand bis 40.000 U/min für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter) und ein Prüfstand zur mechanischen Zerkleinerung und einer zur Verinselung ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen. 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 und Creo Parametric (früher: Pro / Engineer Wildfire mit Pro / Manufacturing) eingesetzt.

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

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

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

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

Veröffentlichungen des Institutes seit 2013

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: Frühjahrskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften (GfA), Magdeburg (2022)

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

Veröffentlichungen 2021

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

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

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

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

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.: Hybride Simulationstechnik – 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 Füge-technik auf die Konstruktion von Produkten für das Kreislaufwirtschaftssystem; Enthalten in: 32nd Symposium Design for X, <https://doi.org/10.35199/dfx2021.22>

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

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

Veröffentlichungen 2020

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2019

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2018

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2017

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

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

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

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

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

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

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

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

Hess, M.: An Laufflächen von Prüflingen zur Bestimmung des Übergangsverhaltens von Druckkammerlagern aus der Mischreibung in die Vollschröpfung 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 Druckkammlagern. 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

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

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

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

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

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

Wendler, J.; Wild, J.: Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen: Tragfähigkeit von 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

Veröffentlichungen 2015

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2014

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2013

Amorim, F.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Czelusniak, T.: A study on the SLS manufacturing and experimenting of TiB₂-CuNi EDM electrodes; Rapid Prototyping Journal 19(6), 418-429, Emerald Group Publishing Limited, 2013/9/27

Shen, L.J.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Plain-fretting fatigue competition and prediction in spline shaft-hub connection. International Journal of Fatigue 52, 68-81, Elsevier, 2013/7/31

Lohrengel, A.; Heß, M.: Verbesserung des Tragfilmaufbaus in Druckkamm-lagerungen durch Anpassung der Laufflächengeometrie; In: Gleit- und Wälzlagerungen : Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung ; Schweinfurt, 23. und 24. April 2013. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013 (VDI-Berichte, 2202). ISBN 978-3-18-092202-7, S. 367-370

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Beanspruchungsgerechte Gestaltoptimierung von Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit modernen Fasergeflechten; 21. Internationale Kranfachtagung "Krane – Nachhaltigkeit in Entwicklung und Betrieb" (2013) S. 223-234, ISBN: 3-89194-205-2

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Simulation of fibre ropes and their effects on the strain scenario of multilayer wound rope drums; Simulating rope applications; Proceedings of the OIPEEC Conference 2013, Dr. I.M.L. Ridge, Oxfordshire, UK, ISBN: 978-0-9552500-4-0

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Potentiale sowie Auswirkungen von Hochfestfaserseilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln im Bergbau-, Offshore- als auch Kranbereich; Technical Report Fakultät für Mathematik/ Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal; November 2013, ISSN 1869-8018

Amorim, F.L.; Lohrengel, A.; Müller, N.; Schäfer, G.; Czelusniak, T.: Performance of sinking EDM electrodes made by selective laser sintering technique. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 65 (9-12), 1423-1428, Springer-Verlag 2013/4/1

Langenbach, J.; Müller, N.; Lohrengel, A.: Demonstration der flexiblen Prozessführung in modularen, integrierten Entwicklungsumgebungen, in: Brökel, K.; Feldhusen, J. et. al. (Hrsg.): 1. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2013, Shaker Verlag, Aachen, 2013, S. 53 – 62, ISBN 978-3-8440-2182-0

Schmelter, R.: FVA-505-II, Reibkraft- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich, Zwischenbericht, Forschungsreport 2013, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013

Nagler, N.; Lohrengel, A.: Axiale Belastbarkeit der Freiläufe; Zwischenbericht; Forschungsreport 2013; Band 2; S. 203-214; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013

Nagler, N.; Lohrengel, A.; Qian, B.; Rienäcker, A.; Ochse, G.: Freilauf kombinierte Lasten; Zwischenbericht; Forschungsreport 2013; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2013; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013

Wendler, J.; Wild, J.: FVA-467 II, Tragfähigkeit von Profilwellen (Zahnwellen-Verbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen, Zwischenbericht, Forschungsreport 2013, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013

Mänz, T.: FVA-658 I, Untersuchungen von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Zwischenbericht, Forschungsreport 2013, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013

Langenbach, J.; Müller, N.: Softwareprototyp zur Evaluation eines flexiblen Prozessmanagements in modularen, integrierten Entwicklungsumgebungen; Technical Report Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal; März 2013, ISSN 1869-8018

Schmelter, R.; Lohrengel, A.: Effects of locale property changing of hardable sheetmetals to transmission of sound; In: AIA-DAGA 2013: Proceedings of the International Conference on Acoustics; 18. – 21. März 2013 in Meran, S. 1545 - 1549; ISBN: 978-3-939296-05-8, Berlin 2013

Erschienenene Institutsmitteilungen seit 2010

 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2010



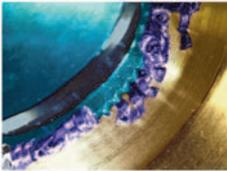
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2011



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2012



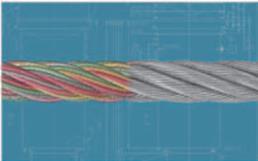
 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2013



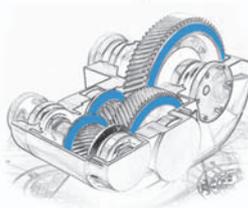
 TU Clausthal

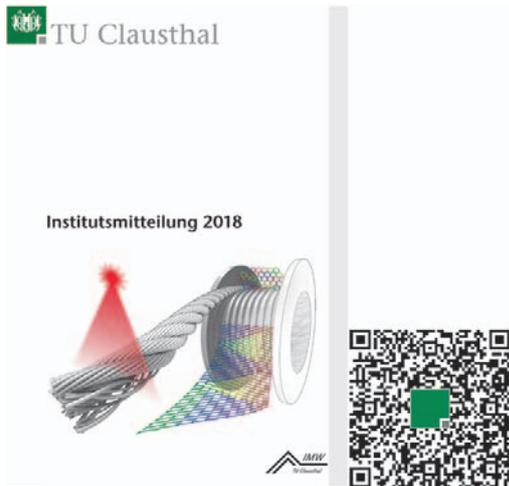
Institutsmitteilung 2014



 TU Clausthal

Institutsmitteilung 2015





Die jeweiligen Institutsmitteilungen finden Sie ebenso auf unserer Webseite

Autorinnen und Autoren

Ammersdörfer, Theresa: Jahrgang 1992, studierte Technische Betriebswirtschaftslehre an der TU Clausthal, seit 01.04.2021 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.
ammersdoerfer@imw.tu-clausthal.de

Bauer, Robin: Jahrgang 1995, studierte Maschinenbau an der Universität Kassel, seit 19.04.2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
bauer@imw.tu-clausthal.de

Duchâteau, Florian: Jahrgang 1994, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.04.2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
duchateau@imw.tu-clausthal.de

Heinrich, Christian: Jahrgang 1995, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 15.10.2018 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, seit 10/2019 Verwalter des Lehrstuhls Rechnerintegrierte Produktentwicklung am IMW, ab 09/2021 Übernahme der Professur für den Lehrstuhl Rechenintegrierte Produktentwicklung am IMW.
inkermann@imw.tu-clausthal.de

Klügel, Niklas: Jahrgang 1994, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.02.2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
kluegel@imw.tu-clausthal.de

Krahl, Sören: Jahrgang 1992, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 15.06.2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
krahl@imw.tu-clausthal.de

Lohrengel, Armin: Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau/ Konstruktionstechnik an der TU Clausthal und RWTH Aachen, bis 09/1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und -gestaltung der RWTH Aachen, Promotionsthema: Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Freiläufen, bis 01/2007 Leiter Maschinenentwicklung Paul Hartmann AG Heidenheim, seit 01.02.2007 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW.
lohrengel@imw.tu-clausthal.de

Losch, Miriam: Jahrgang 1988, studierte Wirtschaftsingenieurwesen und Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.10.2018 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.
losch@imw.tu-clausthal.de

Meyer, Johannes: Jahrgang 1996, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.12.2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

johannes.meyer@tu-clausthal.de

Quanz, Markus: Jahrgang 1997, studierte Maschinenbau an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, seit 17.01.2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

quanz@imw.tu-clausthal.de

Rehmet, Raphael: Jahrgang 1991, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.05.2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

rehmet@imw.tu-clausthal.de

Schäfer, Günter: Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.11.1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion im November 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 01.05.2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

schumacher@imw.tu-clausthal.de

Springorum, Jakob Friedrich: Jahrgang 1988, studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Werkstoff- und Prozesstechnik an der RWTH Aachen, von 01.05.2015 bis 31.03.2019 externer Doktorand an der Universität Siegen, Lehrstuhl für Werkstoffsysteme für den Fahrzeugleichtbau, Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt.

Stök, Max: Jahrgang 1991, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 22.10.2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

stoek@imw.tu-clausthal.de

Wächter, Martina: Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.04.1985 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.

waechter@imw.tu-clausthal.de

So finden Sie das IMW

Anschrift

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



Routenplan



Aus Richtung Hannover / Hamburg:

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

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

B242 → Richtung Ortsteil Zellerfeld abbiegen

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

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

Aus Richtung Göttingen/Kassel:

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

In Katlenburg auf die B241 Richtung Osterode abbiegen.

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

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

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

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

