

## Institutsmitteilung 2021



Institutsmitteilung 2021 (Nr. 46)



Mitteilungen aus dem  
Institut für Maschinenwesen  
der  
Technischen Universität Clausthal

Nr. 46

(Dezember 2021)

Herausgeber:

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

Redaktion und Layout:

Dr.-Ing. Günter Schäfer, Dennis Kaczmarek M. Sc.

Anschrift:

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

Tel: (0 53 23) 72-22 70  
Fax: (0 53 23) 72-35 01  
E-Mail: [info@imw.tu-clausthal.de](mailto:info@imw.tu-clausthal.de)  
<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Die neue *selective laser melting* (SLM) Anlage am IMW. Hier werden in Zukunft strahlgeschmolzene Bauteile hergestellt.

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





# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	1
---------------	---

## A: Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

<i>Stromberg, H.; Hochberger, I.; Lohrengel A.</i> Anwenderperspektive auf FEM-Software.....	6
<i>Stök, M.; Lohrengel, A.</i> Der Querelastizitätsmodul kunststoffummantelter Drahtseile .....	22

## B: Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

<i>Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.</i> Auswahlhilfe von Prozessmodellen und Prozessanalyse in Änderungsprozessen in der systemorientierten Entwicklung .....	32
<i>Maume, E.; Rehmet, R.; Lohrengel A.</i> Erweiterung der Forschungseinrichtungen am IMW und Einsatzpotentiale in der Akustikforschung .....	44
<i>Schumacher, T.; Inkermann, D.</i> Model-based Systems Engineering: Verständnis und Mehrwert für die Entwicklung komplexer Produkte .....	52
<i>Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.</i> Verschleißschätzer: Ideale Bewegungssimulation einer evolventische Zahnwellen Verbindungen .....	66
<i>Inkermann, D.; Lohrengel, A.</i> Towards a Design for Acoustics (DFAc) Methodology .....	78

## C: Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Heinrich, C.; Lohrengel, A.</i> Druckkammllagerung: Eingrenzung der Verlustleistungsreduktion bei optimaler Wälzlagerwahl.....	92
<i>Duchâteau, F.; Lohrengel, A.</i> Konstruktive Optimierung des Freilauf-Doppelprüfstandes.....	102

## **D: Hochschule und Kontakte**

*Wächter, M.*

15. Auflage Entwicklungsmethodik Projekt .....	110
--	-----

## **Ausstattung etc.**

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes .....	116
Veröffentlichungen des Institutes seit 2012 .....	122
Erschienene Institutsmitteilungen seit 2009.....	134
Autoren .....	136
Anfahrt.....	138



## Vorwort

Liebe Freunde des Instituts für Maschinenwesen,

unsere Wünsche aus der letzten Institutsmitteilung nach einem „*ganz normalen Jahr 2021*“ haben sich leider nicht erfüllt und so befinden wir uns alle immer noch im Pandemiegeschehen.

Obwohl Niedersachsen und insbesondere der Landkreis Goslar im bundesweiten Durchschnitt vergleichsweise niedrige Inzidenzwerte aufweisen, zeigt die Tendenz der Werte leider wieder bedrohlich nach oben. Und nachdem die Lehre im Wintersemester 21 / 22 erfreulicherweise weitgehend mit Präsenzveranstaltungen begonnen hatte, werden nun notgedrungen wieder die im letzten Jahr entwickelten Onlinelehrformate aktiviert.

Zahlreiche Dienstreisen, die IMW-Weihnachtfeier und diverse Jahrestagungen mussten inzwischen entweder komplett abgesagt oder auf Onlineformate umgestellt werden. Dann ist es eben wieder so! Wir kriegen das trotzdem hin.

Also nun ist es aber genug mit dem Trübsal blasen und wir wollen auf die positiven Ereignisse zurückblicken. Ein sehr positives Ereignis in diesem Jahr war natürlich die Berufung des Kollegen David Inkermann auf den Lehrstuhl für Integrierte Produktentwicklung. Wir freuen uns über die erfolgreiche Wiederbesetzung und die zukünftige Zusammenarbeit am IMW. Mit dieser Neubesetzung stärken wir die Forschung und Lehre in der modellbasierten Systementwicklung und dem Systems Engineering, der Lebenszyklusplanung von Produkten sowie der Entwicklung und Validierung von Methoden und Prozessen in der interdisziplinären Produktentwicklung.

Erfreuliche Neuigkeiten gibt es auch aus dem Bereich Forschung zu vermelden. Ab Januar arbeiten wir mit im DFG Schwerpunktprogramm 2305 „*Sensorintegrierende Maschinenelemente*“ und im FVA Vorhaben „*Radiale Zusatzlasten*“ haben wir die 2. Phase bewilligt bekommen. Zudem ist das IMW am niedersächsischen Zukunftslabor Mobilität und einem BMBF-Verbundprojekt zum Thema Advanced Systems Engineering beteiligt. Aber auch weitere Projekte stehen in den Startlöchern und zeigen, dass unsere Forschungsthemen den Zahn der Zeit treffen. Für das kommende Jahr ist die weitere Schärfung unserer Schwerpunkte und die noch stärkere Zusammenarbeit der Lehrstühle ein wichtiges Ziel.

Das diesjährige Titelbild zeigt den Prozessraum unserer dringend benötigten und nun endlich neu beschafften SLM Maschine von der Firma Trumpf. Erste Forschungsideen sind auch schon in der Ausarbeitungsphase.

Trotz der Pandemie gab es in diesem Jahr auch wieder einen Konstruktionswettbewerb mit einem Industriepartner. Dank der großartigen Unterstützung von Dr. Andreas Kratzsch konnten die Studierenden in Zusammenarbeit mit der Firma Miele eine sehr aktuelle Problemstellung bearbeiten. Es ging um die Beseitigung von Mikroplastik aus der Waschlauge von Waschautomaten. Aktuell ist der diesjährige

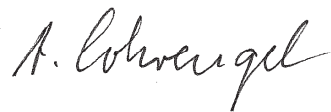


Konstruktionswettbewerb mit der Fa. Sennheiser angelaufen und zwar bis jetzt noch in Form von Präsenzveranstaltungen.

Ein weiteres Highlight 2021 war das Ehemaligentreffen im September bei der Siemens Energy AG in Görlitz. Die glückliche Kombination aus bundesweit niedrigen Inzidenzwerten und einer 100 % Impfquote der Teilnehmer ermöglichte uns ein außerordentlich positives Treffen in Präsenz mit allem Drum und Dran: Firmenbesichtigung, Abendveranstaltung, Workshop, Vorträge, Vereinssitzung und Stadtrundgang. Ein großer Dank geht an Dr. Detlef Haje und sein Team für den Mut, an der Veranstaltung festzuhalten und die hervorragende Organisation unter diesen schwierigen Bedingungen.

Das nächste Treffen wird 2022 voraussichtlich wieder in Clausthal-Zellerfeld stattfinden.

Wir als IMW-Mannschaft wünschen Ihnen nun viel Spaß bei der Lektüre der diesjährigen Institutsmitteilung, ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes Jahr 2022.

Handwritten signature in cursive script, appearing to read "A. Lohrer".Handwritten signature in cursive script, appearing to read "Detlef Haje".





## Anwenderperspektive auf FEM-Software

Stromberg, H.; Hochberger, I.; Lohrengel A.

*Der vorliegende Artikel befasst sich mit der Nutzerperspektive auf FEM- (Finite Elemente Methode) Software. Es wird eine Umfrage unter Anwendern durchgeführt und ausgewertet, die die aktuelle Nutzung sowie Benutzerwünsche nach Weiterentwicklung des Forschungsfeldes untersucht.*



*This article deals with the user's perspective on FEM (Finite Element Method) software. A user survey is undertaken and evaluated which examines the current use as well as the user's wishes for further development in the research field.*

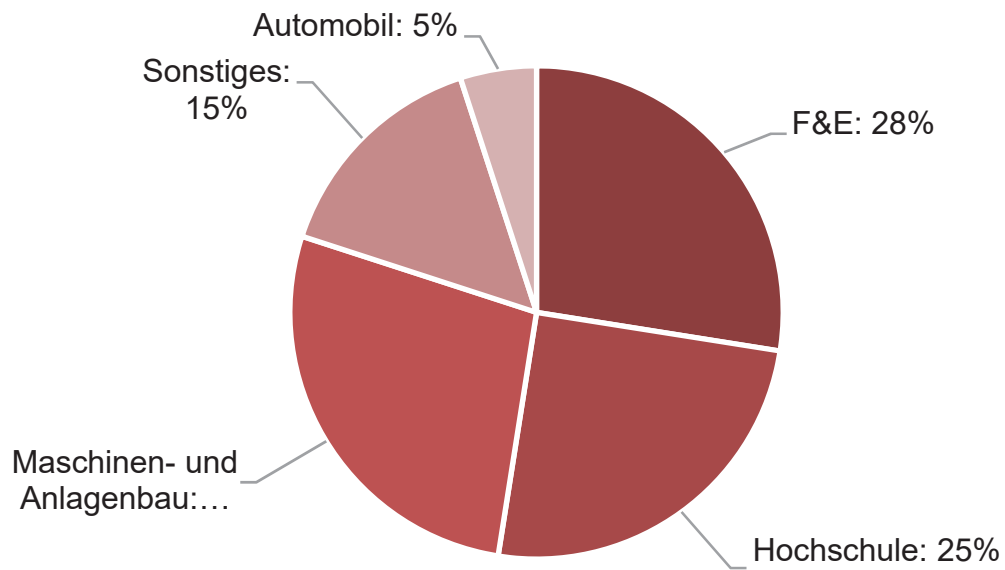
### Zielsetzung der Studie

Kommerzielle Programme zur Durchführung von Simulationen auf Basis der Methode der Finiten Elemente (FEM) sind seit den 1970 Jahren im Einsatz. Obwohl seitdem intensiv an der Weiterentwicklung der FEM-Softwarealgorithmen geforscht wird, findet sich die jüngeren Ergebnisse kaum noch in der verfügbaren kommerziellen Software wieder. Um also Forschungsfelder mit hohem Mehrwert für die Endanwender zu identifizieren, ist eine Befragung zielführend.

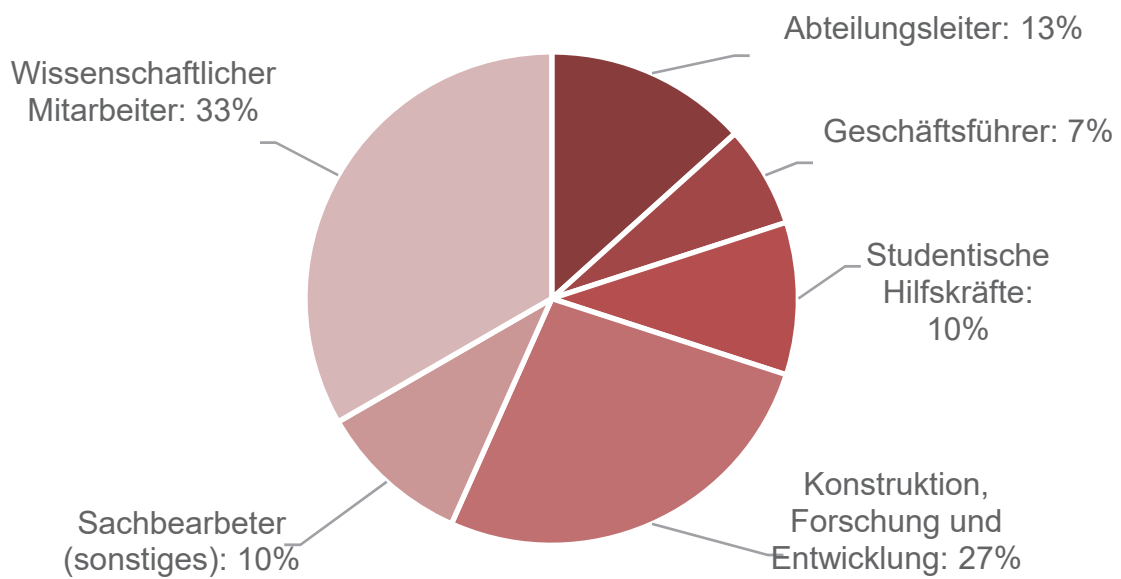
### Zusammensetzung der Stichprobe

Die Umfrage wurde über eine Website durchgeführt und primär über das Ehemaligenetzwerk des Institutes verbreitet. Es wurden 44 auswertbare Fragebögen eingereicht. 56 % der Befragten sind in Dienstleistungsunternehmen beschäftigt, 44 % im produzierenden Gewerbe. Die Befragten sind zu jeweils etwa ein Viertel in Hochschulen, Dienstleistungsunternehmen für Forschung und Entwicklung, sowie dem Maschinen- und Anlagenbau tätig (vgl. Abbildung 1). Eine überwiegende Mehrheit der Befragten (97 %) hat Erfahrung in der Anwendung von FEM-Software, wobei 92 % bereits in der Hochschule mit FEM-Software in Berührung gekommen sind.

Die größte Gruppe (70 %) der Befragten ist in ausführenden Tätigkeiten beschäftigt, 20 % in Leitungsfunktionen und 10 % als studentische Hilfskräfte (vgl. Abbildung 2). 49 % der Teilnehmer geben bis zu fünf Jahre Berufserfahrung an, 24 % bis zu zehn Jahre, 5 % bis zu 20 Jahre und 22 % mehr als 20 Jahre.

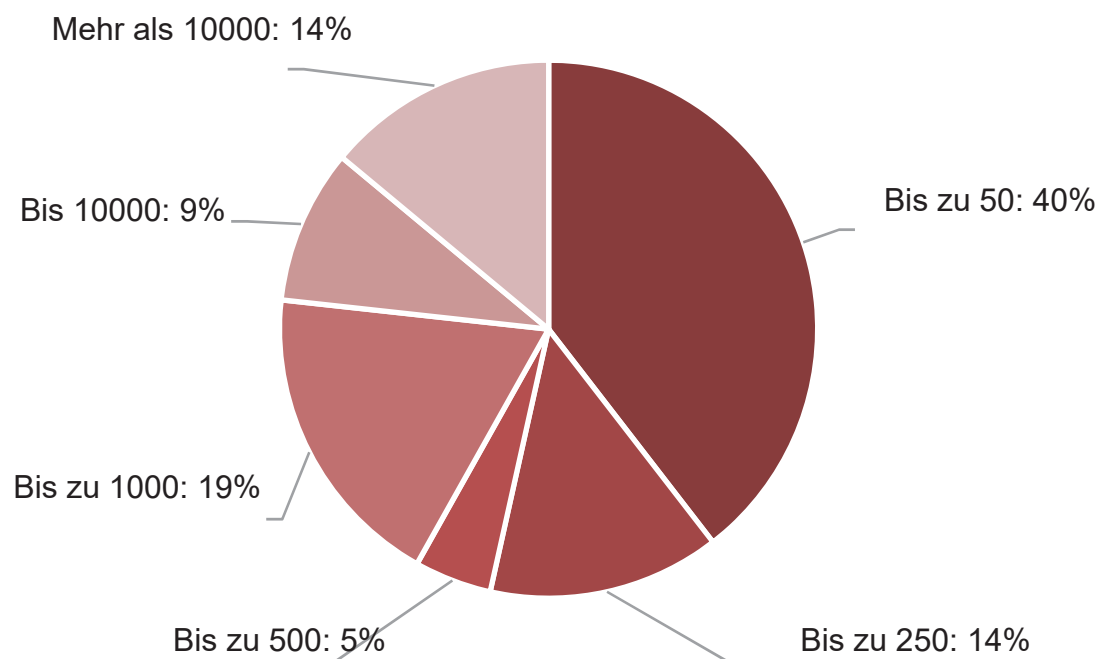


**Abbildung 1:** Branche der Befragten

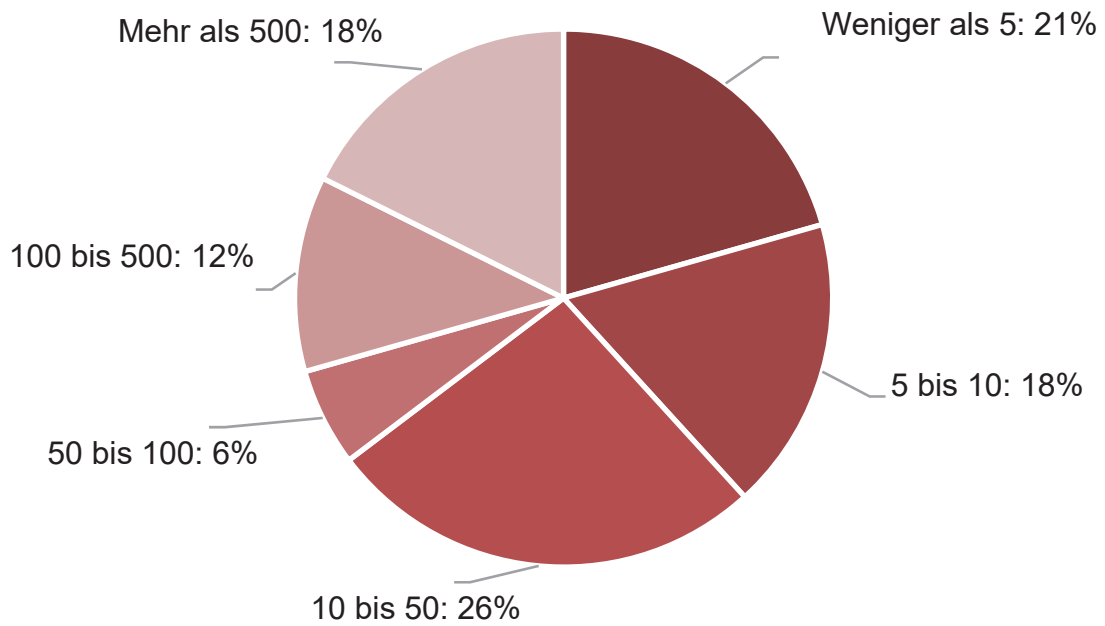


**Abbildung 2:** Unternehmerische Position der Befragten

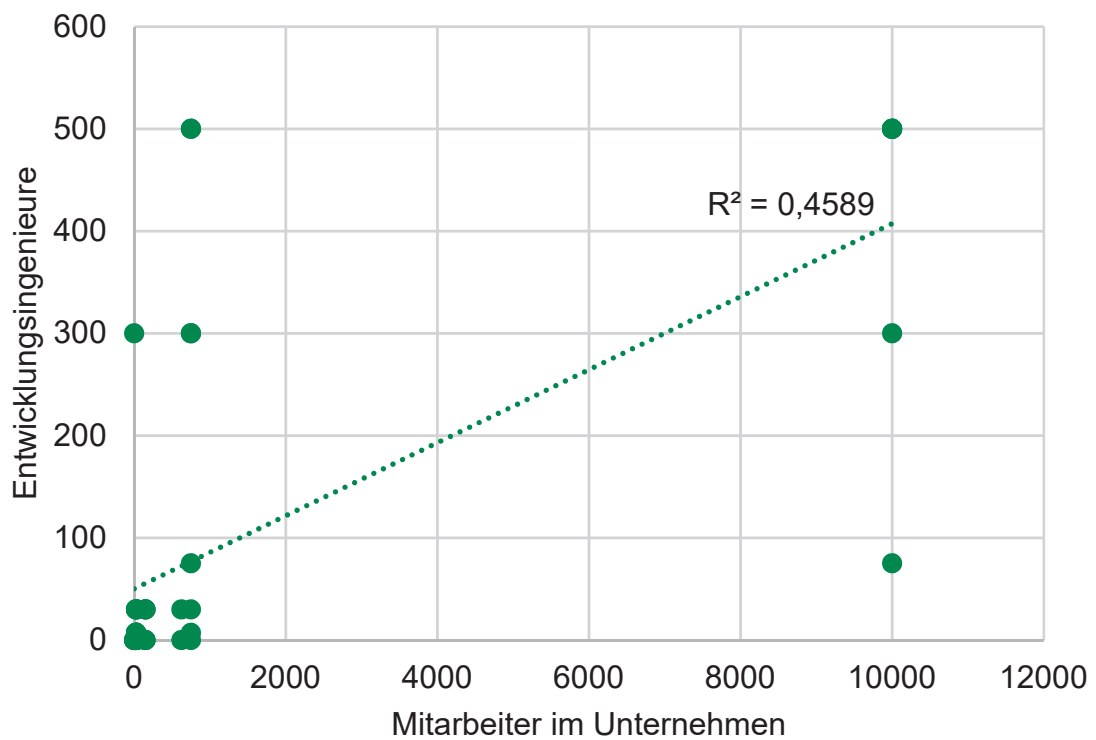
Im Sinne der EU-Empfehlung 2003/361/EG /1/ sind 40 % der Unternehmen der Teilnehmer als Klein- oder Kleinstunternehmen mit bis zu 50 Mitarbeitern einzuordnen; weitere 24 % als mittlere Unternehmen mit bis zu 250 Mitarbeitern (vgl. Abbildung 3). Das verbleibende Drittel ist Großunternehmen zuzuordnen. Um den Anteil der Entwicklung am jeweiligen Unternehmen beurteilen zu können, wurde zudem die Anzahl der unternehmenseigenen Entwicklungsingenieure abgefragt (vgl. Abbildung 4). 26 Teilnehmer haben sowohl die Anzahl der Mitarbeiter als auch die der Entwicklungsingenieure angegeben. Aus dem ermittelten Korrelationskoeffizient von  $r = 0,65$  lässt sich jedoch nur ein schwacher Zusammenhang zwischen Unternehmensgröße und Personalbestand der F&E ableiten (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 3:** Anzahl der Mitarbeiter im Unternehmen



**Abbildung 4:** Anzahl der Entwicklungsingenieure im Unternehmen



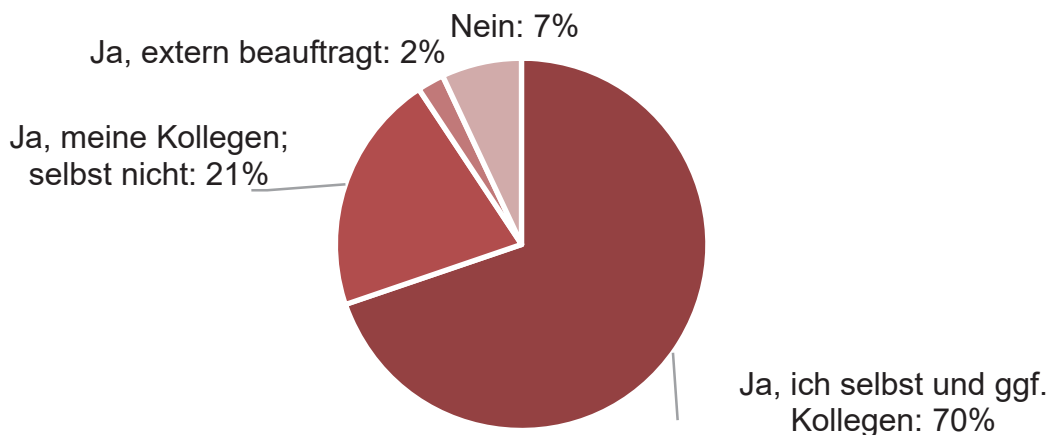
**Abbildung 5:** Anzahl der Entwicklungsingenieure und aller Mitarbeiter im Unternehmen

## Bewertung von FEM-Software

91 % der Befragten geben an, dass in ihrem Unternehmen FEM-Software genutzt wird. In zwei Dritteln dieser Fälle nutzt der Befragte selbst FEM-Software (vgl. Abbildung 6). Die Umfrageteilnehmer nutzen vorwiegend *Ansys*. Da die TU-Clausthal universitätsweit *Ansys* einsetzt, kann vermutet werden, dass eine wesentliche Verzerrung der Statistik durch Teilnehmer aus der Universität entsteht. Um dies zu untersuchen, wurden für eine zweite Auswertung die Stichprobe um alle Teilnehmer, die nach Ihren Antworten zu Branche und Position im Unternehmen wahrscheinlich Mitarbeiter der TU Clausthal sind, bereinigt. In dieser Auswertung ergibt sich für *Ansys* ein Marktanteil von 75 % (vgl. Abbildung 7), sodass von einem Fehler von etwa 6 % durch die Auswahl des universitätsnahen Teilnehmerkreises ausgegangen werden kann.

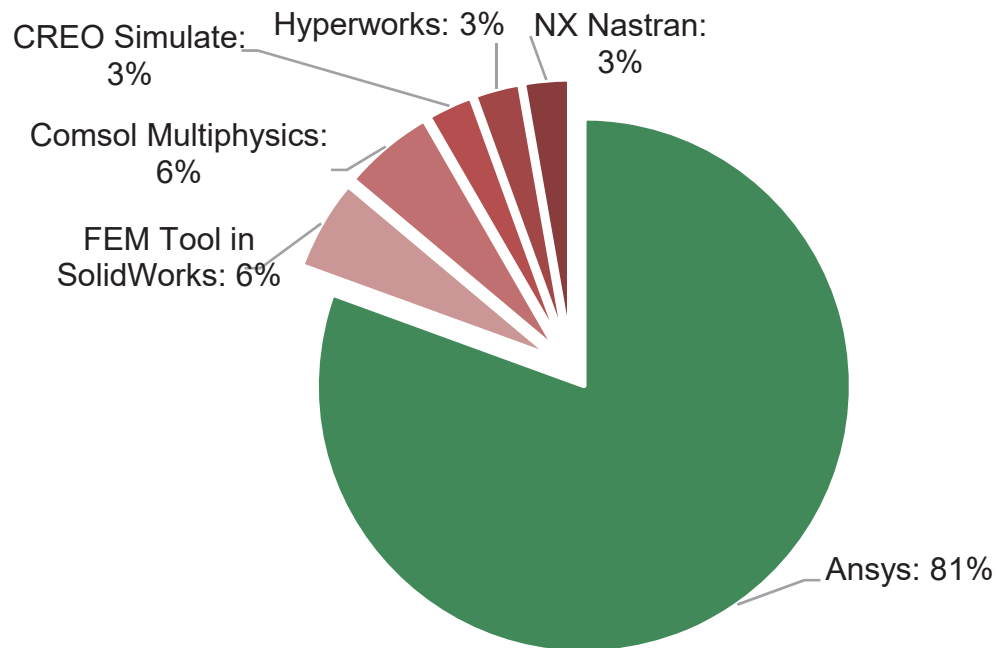
Für eine bessere Untersuchung von Korrelationen sollte der Teilnehmerkreis in einer etwaigen Folgeuntersuchung nach Möglichkeit erweitert werden. Zudem hat die vorliegende Studie gezeigt, dass die Wahrnehmung von Hochschulmitarbeitern und Mitarbeitern in der Industrie sich in einigen Fragen wesentlich unterscheidet. Daher könnte gegebenenfalls auch eine getrennte Befragung dieser Gruppen zielführend sein.

Der Stellenwert von Simulationssoftware im eigenen Unternehmen wurde auf einer Skala von 1 bis 5 abgefragt. Der überwiegende Anteil der Befragten gibt an, dass sein Unternehmen der Thematik einen hohen (4) oder sehr hohen (5) Stellenwert beimisst (vgl. Abbildung 8). Die Frage nach der individuellen Sicht des Befragten zeigt eine noch größere Wahrnehmung der Relevanz, da 35 % der Teilnehmer den Stellenwert persönlich höher ansetzen als ihr Unternehmen. 9 % sehen ihn geringer und 56 % geben identische Werte an. Mögliche Erklärung für diese Diskrepanz sind technikferne Entscheidungsträger sowie wirtschaftliche Zwänge, die auf Ebene der Befragten weniger bekannt sind.

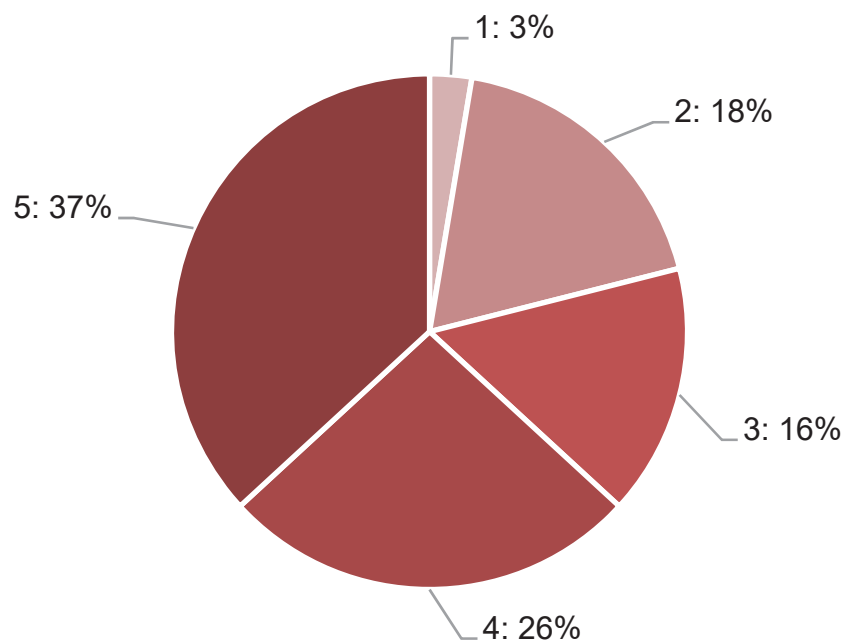


**Abbildung 6:** Nutzung von FEM-Software im Unternehmen





**Abbildung 7:** Marktanteile FEM-Software



**Abbildung 8:** Stellenwert von FEM-Software im Unternehmen, von sehr gering (1) bis sehr hoch (5)

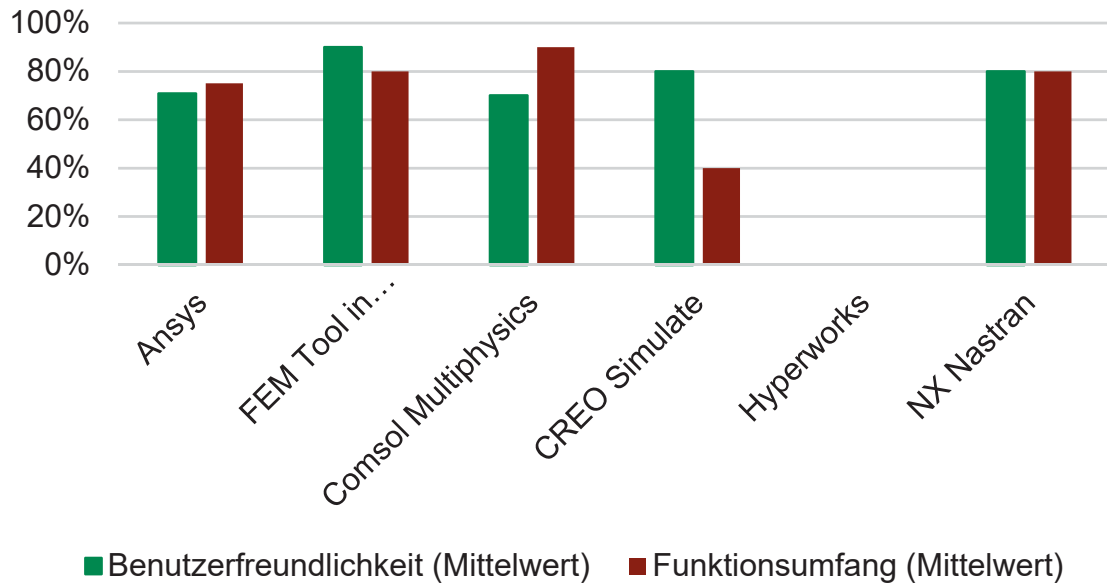
Die Zufriedenheit mit der aktuell genutzten Software wurde sowohl über die Auswahl einer Bewertung von Funktionsumfang und Benutzerfreundlichkeit auf einer Skala von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch) als auch mit einem Freitextkommentar zu Verbesserungswünschen erfasst. Für die Auswertung ist es zweckmäßig vollständige FEM-Programme und CAD-integrierte FEM-Löser zu unterscheiden, da diese einen wesentlich geringeren Funktionsumfang ausweisen. *Comsol Multiphysics* nimmt eine Sonderrolle ein, da die Software keinen Strukturmechanik-Schwerpunkt hat und ausschließlich unstrukturierte Tetraeder-Netze zulässt.

Allgemein kann beobachtet werden, dass die angegebenen Werte im oberen Viertel liegen (vgl. Abbildung 9). Der einzige Ausreißer ist hierbei der Funktionsumfang von *Creo Simulation*. Dies deckt sich mit den zur Software abgegebenen Verbesserungswünschen nach der Bestimmung von Reaktionskräften, Kontaktberechnung und Bauteiloptimierung im Grundumfang der Software. Auffällig ist zudem, dass für die vollwertigen Strukturmechanikprogramme *Ansys* und *NX Nastran* der Funktionsumfang gleich oder höher als die Benutzerfreundlichkeit bewertet wird, wohingegen bei den anderen Programmen die Benutzerfreundlichkeit wesentlich besser als der Funktionsumfang beurteilt wird. Hierbei ist zu beachten, dass der Großteil des Teilnehmerkreises – der angegebenen Branche nach zu urteilen – strukturmechanische Probleme bearbeitet was den hohen Marktanteil dieser Programme in der Stichprobe erklärt (vgl. Abbildung 1).

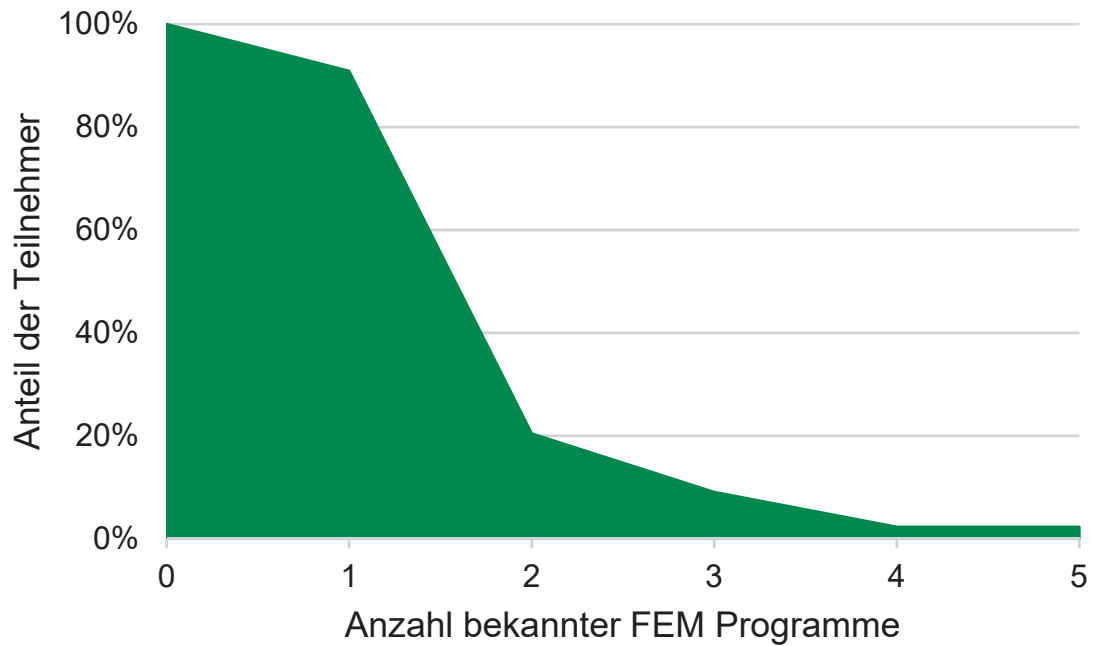
Zur besseren Interpretierbarkeit der Ergebnisse wurde auch die Anzahl der Programme abgefragt, mit denen die Teilnehmer Erfahrungen haben. Hierbei zeigt sich, dass nur 20 % der Teilnehmer mehr als ein FEM-Programm genutzt haben (vgl. Abbildung 10). Somit kann angenommen werden, dass der Großteil der Teilnehmer seine Bewertung vor dem Hintergrund der eigenen Erwartungen und nicht im Vergleich zum Wettbewerb durchgeführt hat. Daher ermöglichen die gewonnenen Daten zwar einen Vergleich der Zufriedenheit mit dem Funktionsumfang und der Bedienbarkeit, aber nur bedingt eine Aussage für den Vergleich der verschiedenen Programme miteinander.

Für *Ansys* liegen neben den Bewertungen durch Zahlen auch 29 Freitextkommentare zur Verbesserungswünschen vor. Diese können in sechs Cluster zusammengefasst werden, wobei die Fläche der Kreise in Abbildung 11 die Anzahl der Kommentare in der Kategorie repräsentiert. Einige Kommentare sind mehreren Kategorien zugeordnet.

Die unter „Offeneres System“ zusammengefassten Kommentare fordern eine Möglichkeit zum direkten Zugriff auf Matrizen und Tensoren; dies könnte z. B. genutzt werden, um eigene Materialmodelle zu implementieren oder komplexere Simulationen durchzuführen.



**Abbildung 9:** Zufriedenheit mit FEM-Software



**Abbildung 10:** Anzahl bekannter FEM-Programme in kumulativer Darstellung

Die Thematik ist eng mit der Forderung nach einer verbesserten Automatisierbarkeit verbunden. In dieser Kategorie sind Kommentare gruppiert, die eine Modernisierung und Vereinheitlichung der Automatisierung in *Ansys* fordern. In diesem Kontext wird auch eine intuitivere Sprache als APDL gefordert.

Viele Benutzer wünschen sich zudem eine bessere Dokumentation der gesamten Software (vgl. Abbildung 11). Insbesondere hervorgehoben werden die mangelnde Übersichtlichkeit, fehlende Informationen, wie z. B. die Anforderung des *Cyclic Region*-Befehls an das Koordinatensystem, die schlechte Qualität der APDL Dokumentation, sowie das Fehlen einer Dokumentation zur *Iron Python* Schnittstelle.

Ein Punkt, der ebenfalls viele Benutzer bewegt, ist der Vernetzter. Bei diesem wird die Nicht-Reproduzierbarkeit von Ergebnissen bzw. das nicht deterministische Verhalten und die schlechte Qualität automatisch generierter Netze bemängelt, sowie die Erzeugung hängender Knoten.

Unter „Sonstiges“ sind Wünsche nach einem besseren Geometrieeditor, mehr Möglichkeiten im *Post Processing*, sowie eine automatische Erkennung von Singularitäten zusammengefasst.

Die mit Abstand häufigste Kategorie sind Mängel der Softwarequalität. Hier werden insbesondere folgende Themen angesprochen:

- Zahlreiche, seit vielen Jahren offene Fehler
- Fehlende, nicht nachvollziehbare oder mehrdeutige Fehlermeldungen (z. B. für hängende Knoten)
- Je nach Spracheinstellungen nicht funktionierende Werkzeuge
- Instabilität der Benutzeroberfläche
- Fehlerhafte und nicht nachvollziehbare Datenflüsse in der *Ansys Workbench*
- Hoher Wartungsaufwand und Ausfälle von Lizenzservern

Diese Punkte haben zwar keine gemeinsame technische Ursache, die Vermutung liegt aber nahe, dass sie ihren Ursprung in den genutzten Methoden der Softwareentwicklung finden: Das *Manifesto for Agile Software Development* beschreibt eben diese Mängel in abstrahierter Form und legt die agile Softwareentwicklung als zielführende Methodik zur Fehlerbehebung nahe [2].

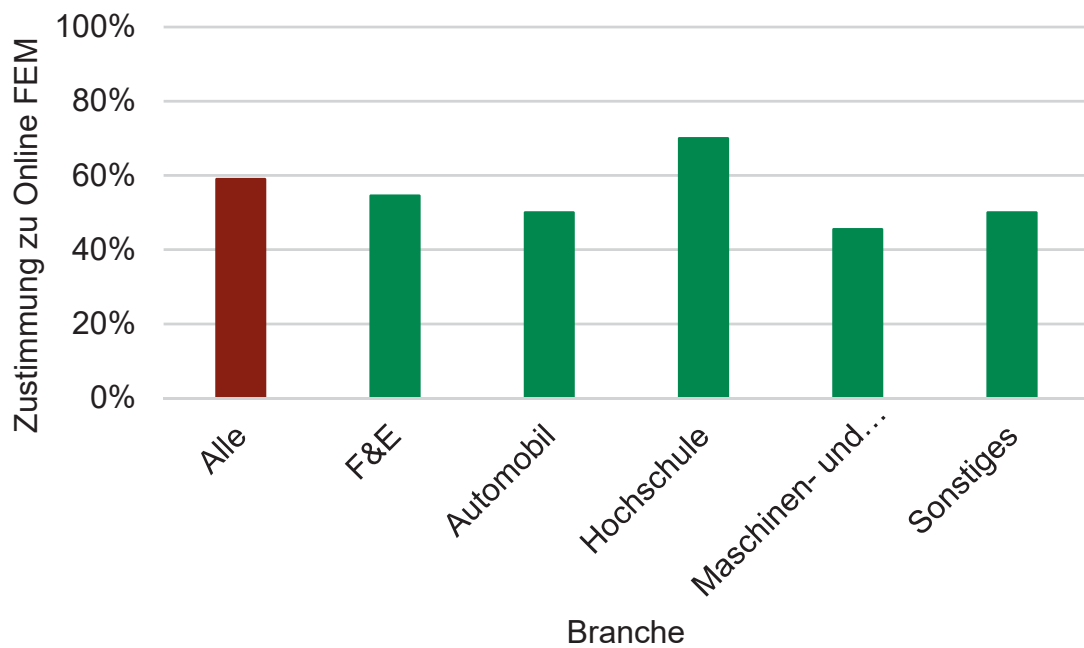


**Abbildung 11:** Verbesserungswünsche zu Ansys

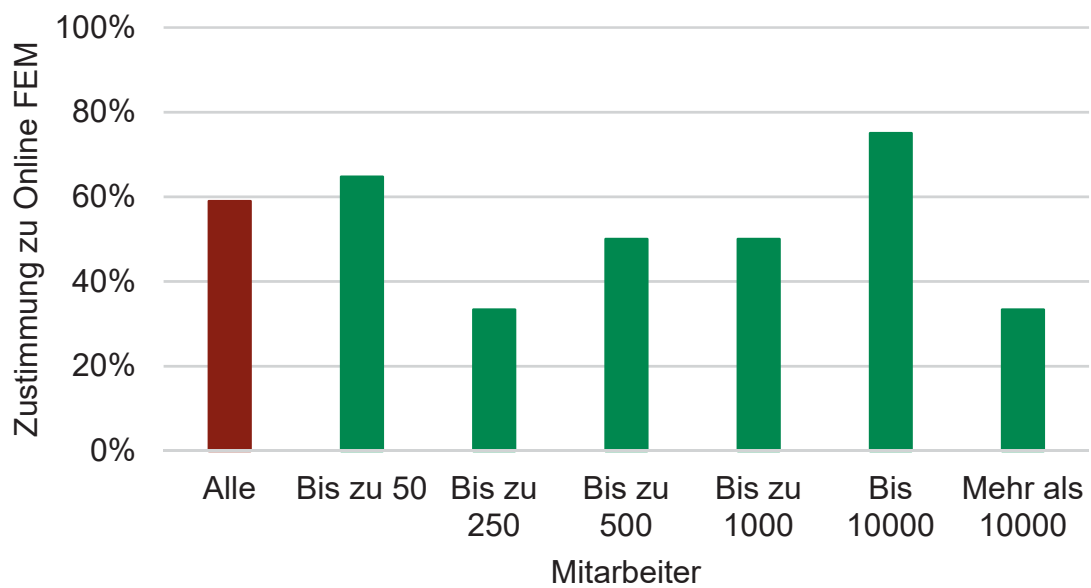
## Online FEM-Programme als Alternative

Vor dem Hintergrund des aktuellen Trends, rechenintensive Aufgaben an Cloud-Computing-Dienste auszulagern, wurde auch untersucht, wie hoch die Bereitschaft der Befragten zur Nutzung solcher Dienste ist. Hierbei sahen 62 % der Befragten derartige Programme positiv, während 38 % Datenschutzbedenken geltend machten. Vergleicht man die Zustimmung zur Nutzung von Online-FEM-Programmen mit den Unternehmensangaben, ist auffällig, dass die Zustimmung bei Mitarbeitern von Hochschulen deutlich höher ausfällt als bei den übrigen Befragten (vgl. Abbildung 12). Dies ist mutmaßlich in den geringeren Geheimhaltungsanforderungen im Vergleich zu Wirtschaftsunternehmen begründet.

Eine systematische Abhängigkeit von der Unternehmensgröße ist nicht klar erkennbar. Auffällig ist der Einbruch den Gruppen der mittelgroßen Unternehmen mit bis zu 250 Mitarbeitern, sowie der Großunternehmen mit mehr als 10000 Mitarbeitern (vgl. Abbildung 13). Im Falle der mittelgroßen Unternehmen ist ein mögliches Erklärungsmuster, dass im Gegensatz zu kleinen Unternehmen eine personelle Verantwortlichkeit für IT-Sicherheit besteht. Die betreffenden Personen sind vermutlich primär Systemadministratoren und keine Fachleute für IT-Sicherheit und können daher aus Zeit- und Kompetenzmangel statt sachgerechter Prüfung von Risiken nur präventiv blockieren. Der erkennbare Trend zu mehr Zustimmung bei größeren Unternehmen kehrt sich bei Großunternehmen um. Um diesen Effekt besser zu verstehen oder als Artefakt klassifizieren zu können, werden mehr Daten benötigt.

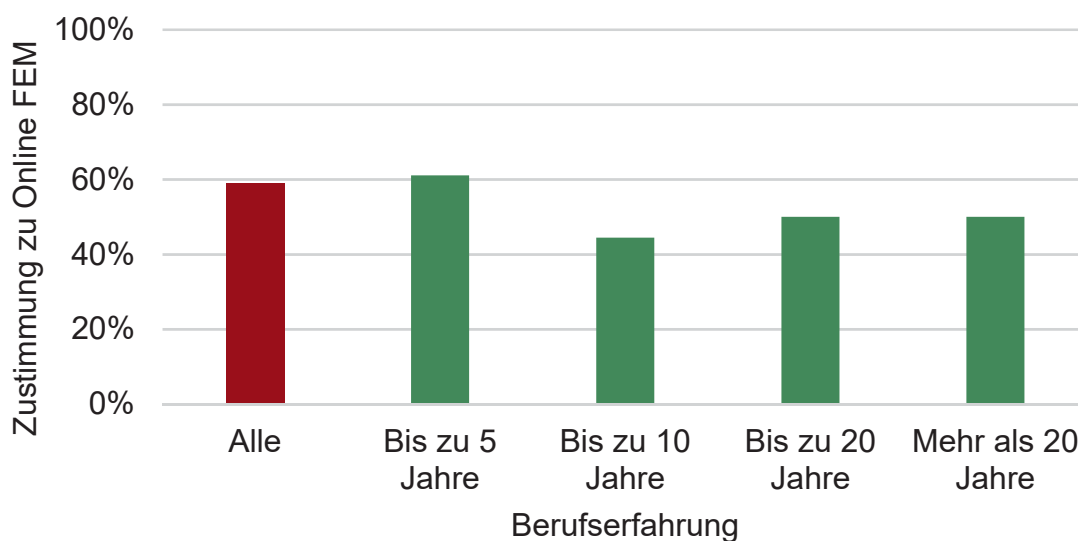


**Abbildung 12:** Korrelation Online FEM mit Branche

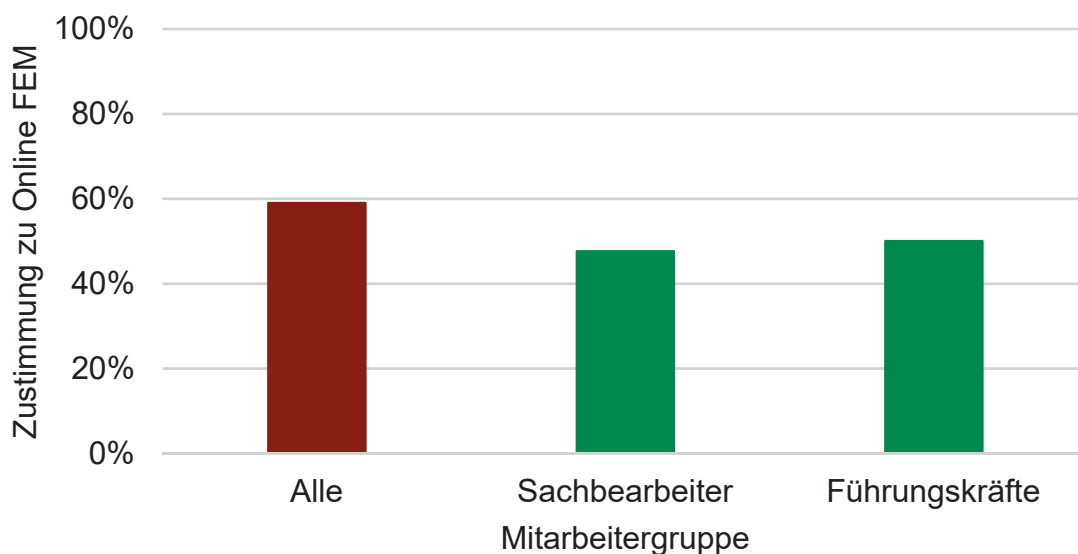


**Abbildung 13:** Korrelation Online FEM mit Unternehmensgröße

Die erhobenen Daten zeigen zudem eine leichte Abhängigkeit von der Berufserfahrung der Befragten. Hier zeigt sich, dass die Zustimmung bei Berufseinsteigern stärker ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 14). Dieser Effekt scheint tendenziell im Alter der Befragten und nicht in der unternehmerischen Position begründet zu sein, da keine Korrelation mit dem Ausüben einer Führungsposition festgestellt werden kann (vgl. Abbildung 15).



**Abbildung 14:** Korrelation Online FEM mit Berufserfahrung



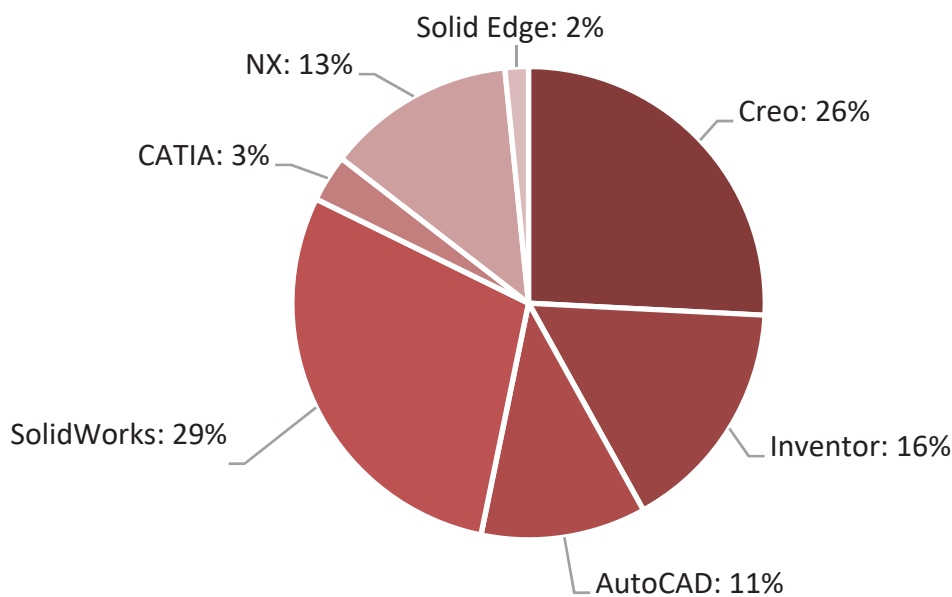
**Abbildung 15:** Korrelation Online FEM mit Führungsposition



## CAD Software

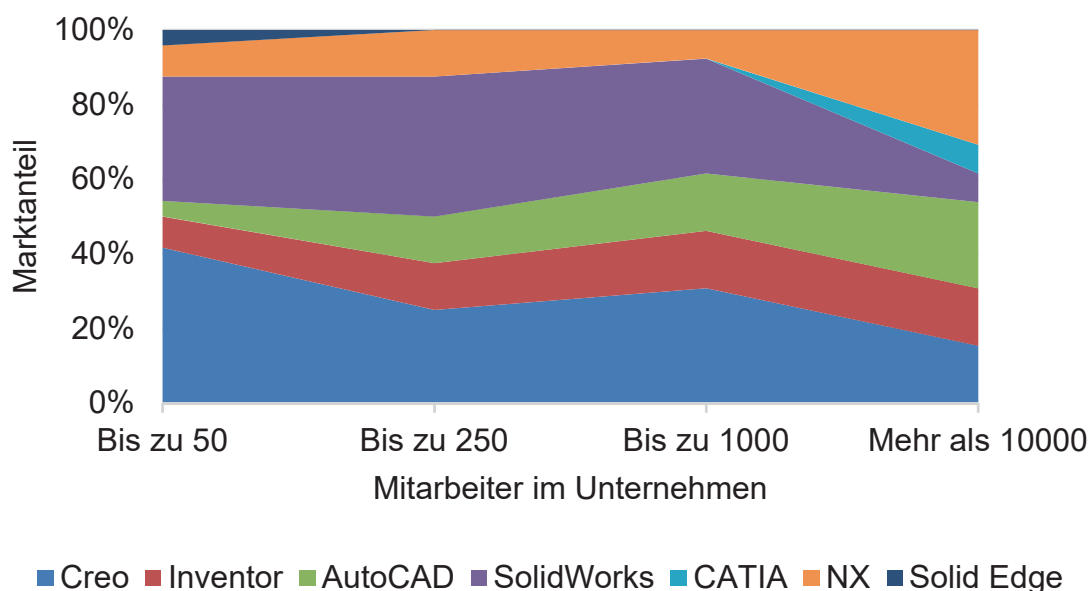
Für eine zielgerichtete Weiterentwicklung von FEM-Software ist auch der Datentransfer aus der verwendeten CAD-Software von zentraler Bedeutung. Auch wenn das STEP-Format nach DIN EN ISO 10303-210 theoretisch einen fehlerfreien Datenaustausch ermöglichen sollte, kommt es in der Praxis oft zu falsch importierten Modellen, da die beteiligten Programmen DIN EN ISO 10303-210 nur teilweise implementieren. Zudem speichert das STEP-Dateiformat nur Informationen über die Hüllgeometrie, nicht aber über die zugrundeliegenden Skizzen und Feature, sodass eine importierte STEP-Datei nicht mehr zielgerichtet bearbeitet werden kann. 81 % der Befragten sehen einen Bedarf für ein neuartiges Dateiformat, das auch Strukturinformationen erfassen kann.

Falls die Arbeit an einem solchen Format forciert werden soll, muss die Integration der einzelnen CAD-Programme priorisiert werden. Daher wurde auch das aktuell im Unternehmen genutzte CAD-Programm erfragt. Diese sind in Abbildung 16 unter erneutem Ausschluss der befragten Mitarbeiter der TU-Clausthal zur Vermeidung einer Verzerrung des Ergebnisses dargestellt.



**Abbildung 16:** Marktanteile von CAD Software unter den Befragten

Die Auswertung der Korrelation der verwendeten CAD-Programme mit der Unternehmensgröße – gemessen an der Anzahl der Mitarbeiter – zeigt, dass die verwendete CAD-Software stark von der Unternehmensgröße abhängt (vgl. Abbildung 17). Unter Vernachlässigung der Gruppe der Unternehmen zwischen 250 und 500 Mitarbeitern, die aufgrund ihrer geringen Größe von nur zwei Teilnehmern die Ergebnisse stark verzerrt, zeigt sich, dass insbesondere kleinere Unternehmen *SolidWorks* und *Solid Edge* bevorzugen, wohingegen große Unternehmen vorrangig *AutoCAD*, *NX* und *Catia* nutzen. Der Marktanteil von *Inventor* ist weitgehend unabhängig von der Unternehmensgröße. Ob der für *Creo* beobachtbare größere Marktanteil bei kleinen Unternehmen Allgemeingültigkeit besitzt oder aus der Befragung von Mitarbeitern der TU-Clausthal resultiert, kann mit den Vorliegenden Ergebnissen nicht abschließend geklärt werden. Für die Gruppe der Unternehmen zwischen 1000 und 10000 Mitarbeitern liegen keine Daten vor.



**Abbildung 17:** Marktanteile von CAD Software unter den Befragten nach Unternehmensgröße

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Forschung

Die Befragung bestätigt, dass ein großer Teil der in Deutschland arbeitenden Maschinenbauingenieure der FEM-Software eine große Bedeutung zur Bewältigung ihrer Aufgaben beimisst und diese nutzt. Hierbei dominiert *Ansys* den Markt für strukturelle FEM-Programme deutlich mit 75 % Marktanteil.

Auch wenn die Qualität der verwendeten Programme im Allgemeinen hoch bewertet wird, geben die Befragten zahlreiche Verbesserungswünsche an. Hierbei wird primär die Softwarequalität und Dokumentation bemängelt. Den geäußerten Wünschen kann mutmaßlich nur durch eine Neuentwicklung eines kommerziellen FEM-Programms Rechnung getragen werden, da viele der angesprochenen Mängel Folge des Einsatzes veralteter Technologien, technischer Schulden und überholter Projektmanagementtechniken sind /2/.

Auch für die weitere Forschung an FEM-Programmen zeigt die Studie Richtungen auf, die den Anwendern direkt nutzen würden. Aus der Umfrage abzuleitende Forschungsaufgaben sind die robuste Erkennung numerischer Singularitäten sowie die Weiterentwicklung automatischer Vernetzter mit dem Ziel der vollautomatischen strukturierten Vernetzung praxisrelevanter Bauteile. Weiterhin werden ein intuitiverer Arbeitsablauf und aussagekräftigere Fehlermeldungen gefordert. Hieraus ergibt sich unter anderem die Forschungsaufgabe, einfacher zu bedienende Kontaktalgorithmen zu entwickeln, um so nicht intuitives Verhalten zu reduzieren.

Für die Nutzung von *Cloud-Computing*-Diensten für FEM-Berechnungen gibt es bereits eine relativ hohe Akzeptanz von 62 %. Bedenken begründen sich jedoch kaum in organisatorischen und vorwiegend in datenschutzrechtlichen Aspekten, weshalb diesen eine besondere Rolle bei zukünftigen Entwicklungen zukommen sollte. Unter Einhaltung eines hohen Sicherheitsstandards bieten *Cloud-Computing*-Dienste für FEM-Berechnungen erhebliche Potenziale für FEM-Softwareanwender. Zu nennen sind hier vor allem ein breiterer Zugang zu FEM-Software und eine nicht zu vernachlässigende Einsparung von kapitalbindender Hard- und Software.

## Literatur

- /1/ EMPFEHLUNG DER KOMMISSION vom 06.Mai 2003/2003/361/EG betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen, 2003
- /2/ Beck, K.; Beedle, M.; et al. Manifesto for Agile Software Development, 2001

## Der Querelastizitätsmodul kunststoffummantelter Drahtseile

Stök, M.; Lohrengel, A.

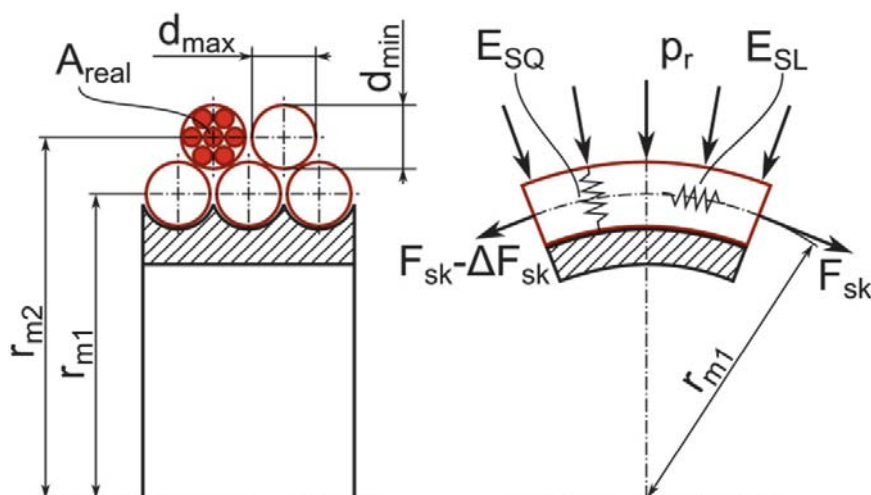
*In dem Forschungsprojekt „Lifetime Coated Ropes“ ist die Eignung kunststoffummantelter Drahtseile für die Mehrlagenwicklung untersucht worden. Eine wichtige Untersuchung war die Ermittlung des Querelastizitätsmoduls, sowie der Einfluss des Kunststoffmantels auf die Quersteifigkeit. Hier wird auf die Untersuchungsergebnisse des einlagigen Seils eingegangen.*



*In the research project "Lifetime Coated Ropes", the applicability of plastic-coated wire ropes for multi-layer spooling has been examined. An important part of the examination was the determination of the lateral modulus of elasticity, as well as the influence of the plastic coating on the lateral stiffness. Here we discuss the findings of the examination on single layer ropes.*

### Der Querelastizitätsmodul

Die Steifigkeitseigenschaften von Seilen in Längs- und Querrichtung unterscheiden sich erheblich, sodass zur Beschreibung der Querelastizitätsmodul ( $E_{SQ}$ ) und der Längselastizitätsmodul ( $E_{SL}$ ) zu ermitteln sind. Die beiden Elastizitätsmodule sind rechts in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Seil auf einer Seiltrommel /1/

Der Querelastizitätsmodul von Seilen wird durch viele Faktoren, wie der Außenlitzenanzahl, Verdichtung und dem Gebrauchszustand, beeinflusst. Bei Seilen mit besonders wenigen (vier) oder vielen (vierzehn, achtzehn) Außenlitzen ist die Quersteifigkeit höher als bei Seilen mit einer mittleren (sechs, acht) Anzahl an Außenlitzen. Verantwortlich dafür ist die innerhalb des Seils auftretende Reibung zwischen den Litzen. Während mit zunehmender Litzenanzahl die Reibung zunimmt, können bei besonders wenigen Litzen diese zuerst abgleiten, bis eine weitere Kompaktierung des Seils nicht mehr möglich ist /2/.

Durch den helixförmigen Aufbau der Litzen und des Seils kommt es unter einer auf das Seil aufgebrachten Längskraft zu einer Verdichtung des Seils, wodurch die Reibung im Inneren zunimmt. Der Querelastizitätsmoduls ist somit immer mit der bei der Ermittlung verwendeten Seilzugkraft  $F_{SK}$  anzugeben.

Für den Leichtbau von Seiltrommeln ist eine genaue Kenntnis der Lasten auf die Bordscheiben und den Trommelmantel notwendig. Nach /3, 4/ ist der Gesamtdruck auf den Trommelmantel die Summe der Drücke der einzelnen Seillagen des Wickelpaketes. Der Druck der einzelnen Lage ist von der Seilzugkraft und über Entlastungseffekte von den Steifigkeitseigenschaften des Seils in Längs- und Querrichtung abhängig.

Während des Wickelvorgangs werden die unteren Lagen des Wickelpaketes durch den Druck der oberen Lagen ( $p_r$ ) zusammengepresst. Abhängig von der Querelastizität des Seils verformen sich die unteren Lagen ( $d_{min}$  nimmt ab) des Wickelpaketes und der Wickeldurchmesser der Lage ( $r_{m1}$ ) verringert sich. Die Durchmesserreduktion hat einem Zugspannungsverlust in der Umschlingung zur Folge. Der Druck der unteren Lagen auf den Trommelmantel nimmt somit, aufgrund der Querverformung des Seils, ab.

Für kunststoffummantelte Drahtseile sind in der Literatur bis jetzt keine Werte verfügbar um den Einfluss des Kunststoffmantels auf die Quersteifigkeit des Seils abschätzen zu können. Konstrukteuren, die einen Seiltrieb mit einem kunststoffummantelten Drahtseil auslegen sollen, fehlen somit die Information, wie stark der Entlastungseffekt auf aufgrund der Seildeformation ausfallen wird.

## Die Prüfung

Da die Quersteifigkeit eines Seils von der aufgebrachten Längskraft abhängig ist, wird die Querelastizität für unterschiedliche Längskrafthorizonte, zwischen 5 % und 30 % der Mindestbruchlast, bestimmt. Dazu wird mit dem in Abbildung 2 gezeigten Prüfstand die Längskraft auf das Seil aufgebracht. Mit dem in Abbildung 3 zu sehenden Hydraulikzylinder wird das Seil in Querrichtung belastet.

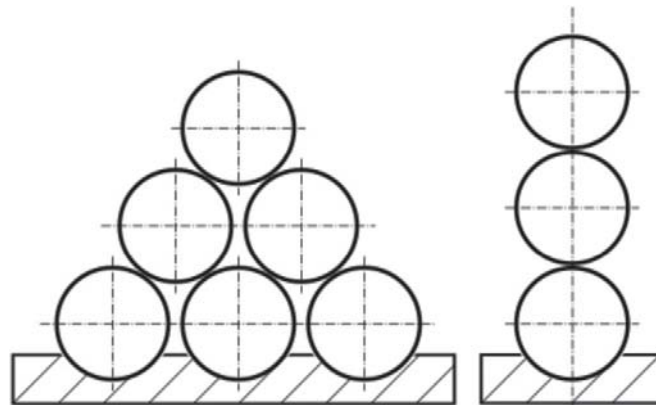


**Abbildung 2:** Der Querelastizitätsprüfstand mit dem Querprüfgerät /1/



**Abbildung 3:** Das Querprüfgerät

Auf dem Prüfstand können bis zu sechs Seile gleichzeitig eingespannt werden, um auch von Seilpaketen die Steifigkeit zu messen. Mit sechs Seilen können sowohl der Parallelbereich der Seiltrommel mit einer pyramidalen Anordnung der Seile nachgestellt werden, als auch der Kreuzungsbereich mit einer gestapelten Anordnung, wie sie in Abbildung 4 dargestellt sind.



**Abbildung 4:** Im Prüfstand mögliche Seilanordnungen als Pyramide (links) und als Stapel (rechts) /5/

Die Querkraft, mit der das vorgespannte Seil belastet wird, kann aus dem Verhältnis  $k_q$  der Querspannung  $\sigma_Q$  zur Längsspannung  $\sigma_L$  mit Gleichung (1) bestimmt werden.

$$k_q = \frac{\sigma_Q}{\sigma_L} \quad (1)$$

Das Spannungsverhältnis wird im üblichen Rahmen von 0,02 und 0,1 variiert und kann auch näherungsweise als das Verhältnis des Seildurchmessers zum Trommelmanteldurchmesser interpretiert werden. Aus den verschiedenen Längskrafthorizonten und dem variierten  $k_q$  ergibt sich für die Prüfung die in Tabelle 1 dargestellte Versuchsmatrix.

**Tabelle 1:** Versuchsmatrix für die Querelastizitätsprüfung

	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$					
$F_L = 0,1 \cdot MBL$					
$F_L = 0,2 \cdot MBL$					
$F_L = 0,3 \cdot MBL$					

Während der Prüfung werden die Deformation des Seils in Querrichtung und die aufgebrachte Querkraft aufgezeichnet. Aus diesen wird analog zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls bei der Hooke'schen Gerade oder des Längselastizitätsmoduls bei Seilen, der Querelastizitätsmodul berechnet.

### Das kunststoffummantelte Drahtseil

Untersucht wurden zwei kunststoffummantelte Drahtseile, sowie das innenliegende Drahtseil ohne Kunststoffmantel. Die beiden Kunststoffe sind Polyethylene, der eine mit hoher und der andere mit niedriger Dichte. In Ihren mechanischen Eigenschaften, wie Elastizitätsmodul und Bruchdehnung unterschieden sich beide Kunststoffe.

Alle drei Seile sind mit der in Tabelle 1 dargestellten Prüfmatrix untersucht worden. Um den Einfluss des Kunststoffmantels auf die Steifigkeit zu verdeutlichen, ist die Steifigkeit der beiden untersuchten kunststoffummantelten Drahtseile (Seilvariante 1 und 2) im Verhältnis zum innenliegenden Drahtseil (Seilvariante 3) gesetzt worden. Die Steifigkeit des Drahtseils lag dabei im üblichen Rahmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 für den Kunststoff 1 und in Tabelle 3 für den Kunststoff 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Verhältnis des Querelastizitätsmodul Seilvariante 1 zu Seilvariante 3 /6/

$\frac{E_{SQ,Seilvar.1}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	5,22	0,95	0,80	0,68	0,52
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,87	0,53	0,59	0,65	0,70
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,34	0,50	0,66	0,75	0,80
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,56	0,63	0,60	0,55	0,61

Der Ausreißer ( $F_L 0,05 MBL$ ,  $k_Q 0,02$ ) bei der Seilvariante 1 wird bei der Auswertung nicht betrachtet. Für das kunststoffummantelte Seil mit dem Kunststoff 1 liegt die Steifigkeit des Stahlseils stets höher. Das kunststoffummantelte Drahtseil hat im Mittel lediglich 64 % der Steifigkeit des konventionellen Seils. Bei geringen Längs- und Querkraften sind die Steifigkeitsunterschiede jedoch geringer. Dies wird damit begründet, dass das Drahtseil aufgrund der geringen Längskraft in diesem Bereich ebenfalls noch recht weich ist.



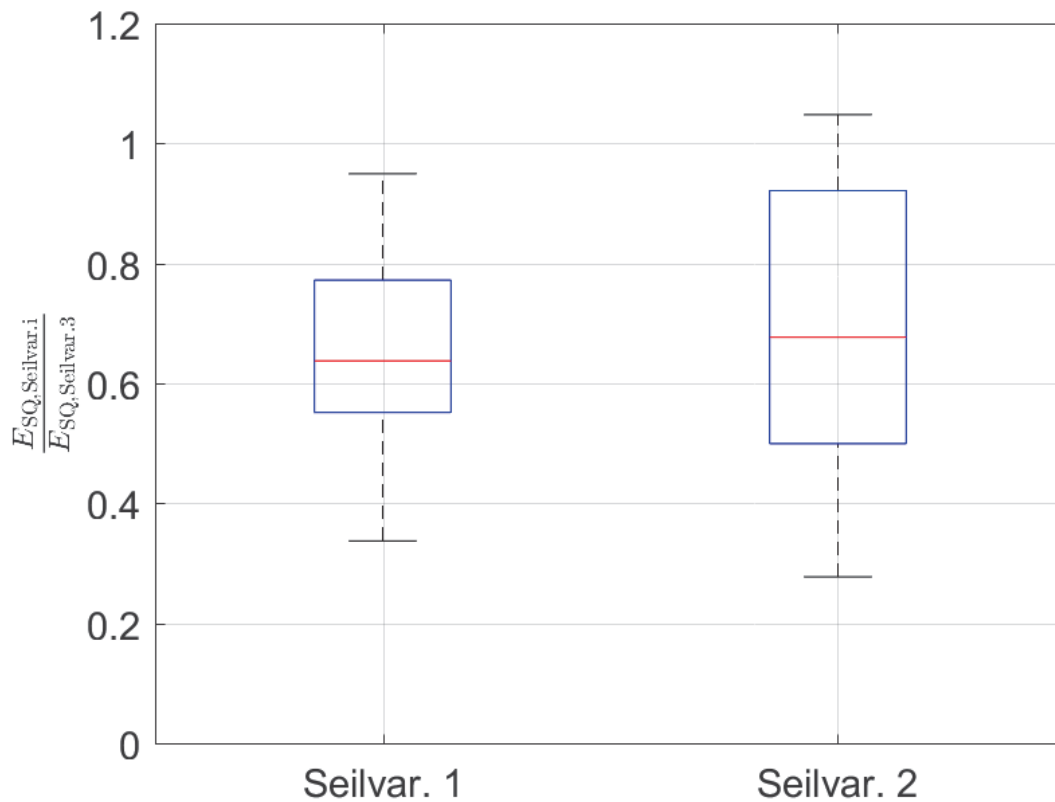
**Tabelle 3:** Verhältnis des Querelastizitätsmoduls Seilvariante 2 zu Seilvariante 3 /6/

$\frac{E_{SQ,Seilvar.2}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	0,70	0,95	0,66	0,37	0,28
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,84	0,50	0,50	0,63	0,65
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,32	0,51	0,76	0,91	0,97
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,48	0,88	0,95	0,93	1,05

Für das Drahtseil mit den Kunststoffmantel 2 beträgt die Steifigkeit im Mittel 68 % vom konventionellen Drahtseil. Die Querelastizitätsmodule nähern sich bei diesem Seil bei sowohl geringen, als auch bei hohen Längs- und Querkräften an. Die Erklärung ist bei den geringen Längs- und Querkräften dieselbe, wie bei Kunststoff 1. Die Querelastizität des konventionellen Drahtseils ist aufgrund der geringen Längslast noch sehr gering und die Steifigkeiten vom Kunststoff und Seil liegen entsprechend nah beieinander. Bei den besonders hohen Längs- und Querkräften nähern sich die Steifigkeiten des kunststoffummantelten und des konventionellen Drahtseils an, weil der Kunststoff 2 eine geringere Streckspannung als Kunststoff 1 hat und bei den hohen Lasten aus dem Kontakt herausgedrückt wurde. Dies ist in Abbildung 5 zu sehen.

**Abbildung 5:** Der Kunststoff 2 wird bei den hohen Querlasten aus dem Kontakt gedrückt

Der Boxplot in Abbildung 6 stellt die Ergebnisse der Tabelle 2 und Tabelle 3 graphisch dar.



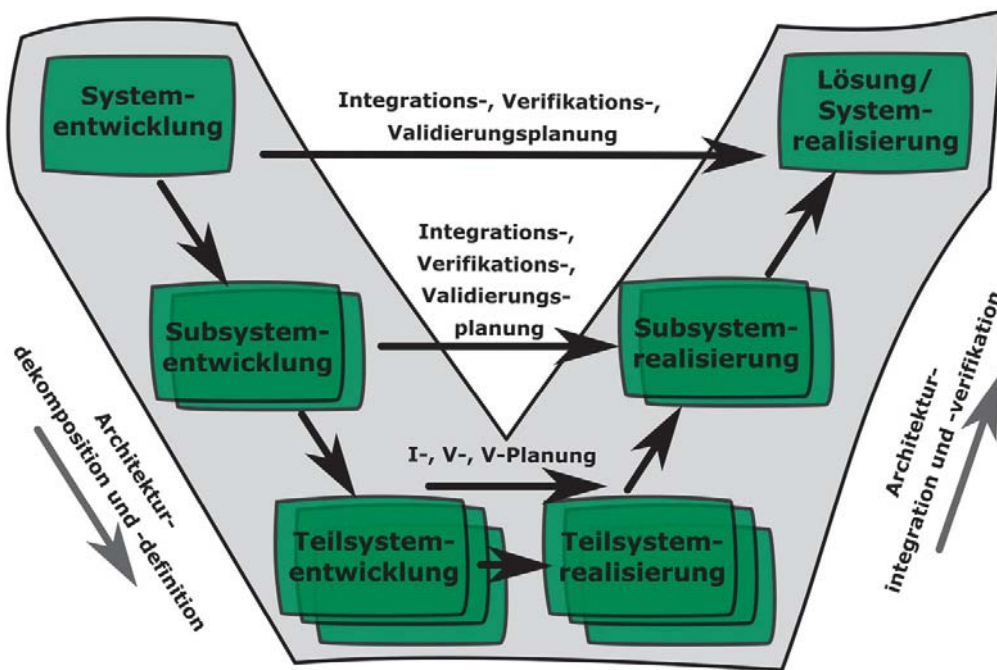
**Abbildung 6:** Boxplot des Vergleichs der Querelastizitätsmoduln der verschiedenen Seile /6/

### Zusammenfassung

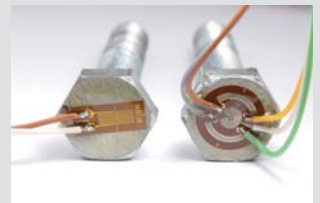
Kunststoffummantelte Drahtseile liegen im Mittel mit 64 % bzw. 68 % unterhalb der Steifigkeit eines reinen Drahtseils. Bei geringer Längs- und Querkraft, sowie besonders hohen Längs- und Querkraften ist die Steifigkeiten jedoch nah beieinander. Für den Konstrukteur ist somit konservativ, bis weitere Forschungsarbeiten vorliegen, das reine Drahtseil zur Berechnung der Seiltrommel anzunehmen.

## Literatur

- /1/ Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M. (2019): Finite element analysis of wire rope stiffness. In: M.A.R. Dohm (Hg.): Exploring Opportunities - Synthetic/Steel. Proceedings of the OIPEEC Conference 2019. Conference 2019. Den Haag, 12. 15. März. OIPEEC, S. 207–220.
- /2/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 1999.
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /4/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, Curvillier Verlag Göttingen, 2001.
- /5/ Mann, L.; Dreblow, J.: Untersuchung der Auswirkung von Kunststoffummantelungen auf die Querelastizität von Drahtseilen, nicht veröffentlichte Projektarbeit TU Clausthal 2018
- /6/ Stök, M.; Schulze, M.; Rechnagel, T; Lohrengel, A., Schmidt, T.: Abschlussbericht Lebensdauer und Wickelverhalten kunststoffummantelter Drahtseile, AIF, 2020



## Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung



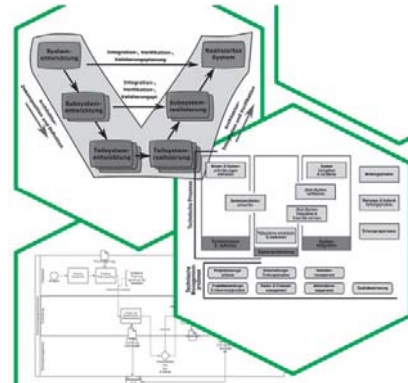


## Auswahlhilfe von Prozessmodellen und Prozessanalyse in Änderungsprozessen in der systemorientierten Entwicklung

Ammersdörfer, T.; Inkermann, D.

Ein Prozessmodell wird zur Unterstützung der Entwickler:Innen eingesetzt. Es bietet Anleitung und Orientierung für die zu erledigenden Aufgaben innerhalb eines Entwicklungsprozesses. Häufig stehen Unternehmen vor Herausforderungen, wenn neue Vorgehensweisen (z. B. für die Architekturentwicklung komplexer Systeme), neue Entwicklungsmethoden oder neue Werkzeuge eingeführt werden sollen, da diese in bestehende Prozesse integriert werden müssen. Ziel dieses Beitrags ist es, Entwickler:Innen eine Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Prozessmodelle in Änderungsprozessen zu geben und eine Vorgehensweise für die Prozessanalyse darzulegen. Dazu werden häufig auftretende Veränderungsszenarien in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) definiert und daraus Anforderungen an Prozessmodelle abgeleitet. Anschließend wird das Vorgehen zur Prozessanalyse in Änderungsprozessen und ein Ausschnitt einer exemplarischen Auswahlhilfe für Prozessmodelle bereitgestellt. Die Ergebnisse und Erfahrungen resultieren aus dem BMBF-Verbundprojekt RePASE - Reflexive Prozessentwicklung und -adaption im Advanced Systems Engineering.

### Einführung und Anpassung der Kernprozesse in der Entwicklung



A process model is used to support developers. It provides guidance and orientation for the tasks to be completed within a development process. Companies often face challenges when new procedures (e.g. for the architectural development of complex systems), new development methods or new tools are to be introduced, as these have to be integrated into existing processes. The aim of this paper is to assist developers in the selection of suitable process models in change processes and to present a procedure for process analysis. For this purpose, frequently occurring change scenarios in small and medium-sized enterprises (SMEs) are defined and requirements for process models are derived from them. Subsequently, the procedure for process analysis in change processes and an extract of an exemplary selection aid for process models are provided. The results and experiences result from the BMBF joint project RePASE - Reflexive Process Development and Adaptation in Advanced Systems Engineering.

## Verwendung von Prozessmodellen in Änderungsprozessen

In Unternehmen werden Entwicklungstätigkeiten durch Methoden und Werkzeuge unterstützt und durch Prozesse gesteuert. Die Anpassung von Prozessen und die Anwendung von Methoden in der Entwicklung werden immer wichtiger, da die Entwicklungstätigkeiten komplexer werden und mehr Stakeholder beteiligt sind /1/. Da die systemorientierte Entwicklung ein interdisziplinärer Ansatz ist und verschiedene Prozesse, Methoden, Rollen und Werkzeuge zusammenwirken, müssen Prozessmodelle auf unterschiedlichen Ebenen synchronisiert werden /2/. Prozessmodelle werden verwendet, um Informationsflüsse, Zuständigkeiten, Aufgaben, Meilensteine, (Teil-) Aktivitäten sowie zu liefernde Artefakte (z. B. Dokumente oder Datenspeicherung) zu definieren und darzustellen. In der Praxis sind Prozesse jedoch oft nicht oder unvollständig dokumentiert und damit für die Beteiligten nicht transparent. Dies führt insbesondere dann zu Herausforderungen, wenn sich Prozessabläufe, Methoden, Werkzeuge oder Rollen ändern. Daher sollten Prozesse einerseits flexibel gestaltet und an Komplexität und unterschiedliche Situationen angepasst werden /3/. Zum anderen werden Prozessmodelle benötigt, um den Ist-Zustand abzubilden und die beabsichtigten Veränderungen im Prozess aufzuzeigen. Unter Prozessänderungen sind zum Beispiel die Integration neuer Entwurfsaktivitäten für eine stärker systemorientierte Entwicklung zu verstehen. Zu Prozessänderungen zählen aber auch Änderungen von Methoden, wie z. B. für die Systemarchitekturentwicklung, um der zunehmenden Produktkomplexität in frühen Entwurfsphasen gerecht zu werden. Gleichzeitig müssen die Wechselwirkungen zwischen Prozessen und Methoden in Veränderungsprozessen berücksichtigt werden /2/. Für die Anpassung der Prozesse an die projektspezifischen Anforderungen sowie das bestehende Entwicklungsrisiko gibt es verschiedene Ansätze, die generische Verfahren vorschlagen /4/. Eine systematische Verbesserung und Anpassung von Prozessen im Rahmen eines Veränderungsprozesses ist jedoch in der Praxis kaum etabliert /5/. Die Herausforderung besteht in der ständigen Veränderung der Prozesse, die aus der Schnelllebigkeit interner / externer Einflüsse und Anforderungen an Prozessmodelle resultiert. Dies wirkt sich erschwerend auf die Auswahl und den Einsatz von Prozessmodellen aus.

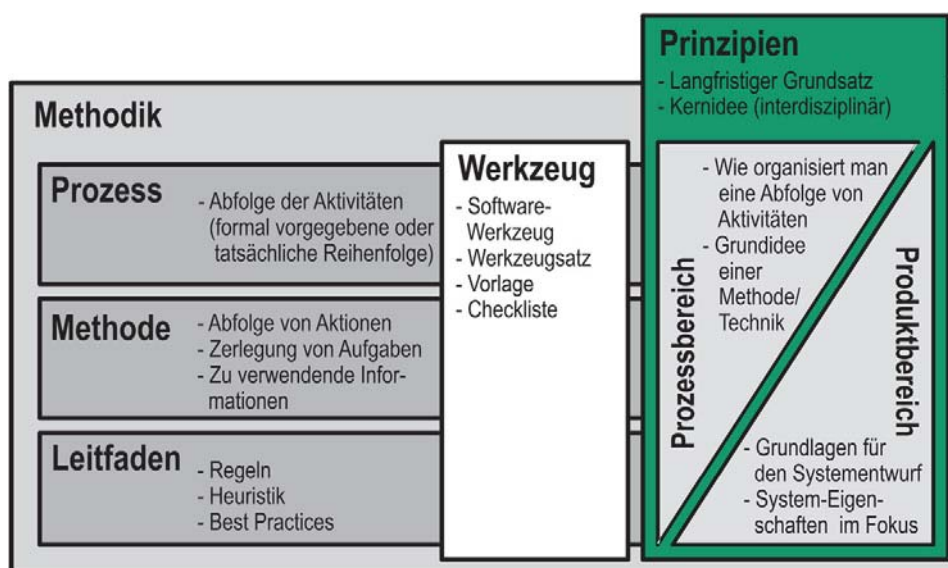
### Methodik und Zielsetzung dieses Beitrags

Die Grundannahme dieses Beitrags ist, dass Veränderungsprozesse in Entwicklungsorganisationen durch Prozessmodelle unterstützt werden, indem diese zur Analyse des Ist-Zustandes und zur Darstellung von Handlungsfeldern für Anpassungen genutzt werden. Das Hauptziel ist es, mit Hilfe von Prozessmodellen ein gemeinsames Verständnis über die Abfolge und das Zusammenwirken von notwendigen Entwicklungsaktivitäten, Zuständigkeiten und erforderlichen Ergebnissen zu schaffen sowie Veränderungen zu visualisieren. Prozessmodelle haben sich als besonders nützlich erwiesen, um eine unvollständige Darstellung der Realität abzubilden und die Aktivitäten, Informationen, Interessensgruppen und Ressourcen in komplexen Entwicklungsprozessen zu koordinieren /6, 7/. Um die

Prozessanalyse und die Auswahl geeigneter Modellierungstechniken zu unterstützen, werden in diesem Beitrag Anforderungen an Prozessmodelle aus Änderungsszenarien abgeleitet, ein Vorgehen zur Prozessanalyse in Änderungsprozessen vorgestellt und eine Prozessmodellauswahlhilfe bereitgestellt. Bei den betrachteten Prozessmodellen handelt es sich um analytische Modelle, die sich besonders für die detaillierte Darstellung und Analyse von Verbesserungen in (veränderten) Entwicklungsprozessen eignen /8/. Um entsprechende Prozessmodelle, wie z. B. BPMN Diagramm, Gantt Chart oder Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK), identifizieren zu können, werden häufige Änderungsszenarien aus dem KMU-Umfeld definiert und Anforderungen an Prozessmodelle daraus abgeleitet. Das Ziel dieses Beitrags ist im ersten Schritt zu klären, welche Aspekte in einem Prozessmodell abgebildet werden können, um Anpassungen von bestehenden Prozessen zu unterstützen. Im zweiten Schritt wird das Ziel verfolgt, das Vorgehen der Prozessanpassung im KMU-Umfeld in vier Schritten darzustellen und eine exemplarische Auswahlhilfe abzuleiten.

### Verwendung von Prozessmodellen in der systemorientierten Entwicklung

Prozesse sind Teil des Ökosystems einer Organisation und geprägt durch grundlegende Vorgehensweisen, Prinzipien sowie unternehmens- und branchenspezifische Standards. Mithilfe von Ressourcen wie Personal, Methoden oder Software-Werkzeugen sowie deren Informationsflüsse, werden Prozesse durchgeführt, um ausgehend von einem Input ein bestimmtes Ziel (Output) unter vorgegebenen Randbedingungen zu erreichen /5, 9, 10/. In Abbildung 1 wird die Verbindung der verschiedenen Elemente einer Methodik dargestellt. Veränderungen im bestehenden Ökosystem einer Organisation können daher verschiedene Elemente der Methodik betreffen, die durch Anpassungen im Prozessmodell präsent werden.



**Abbildung 1:** Prozesse und ihre Wechselwirkungen innerhalb einer Entwicklungsmethodik /9/, Definitionen der Begriffe in Anlehnung an /9, 11/



Durch die hohe Komplexität in Entwicklungsprozessen entsteht eine große Dynamik, die vorab definierte Prozessanforderungen verändert. Daher müssen im ersten Schritt die aktuellen Prozesse innerhalb einer Organisation analysiert und dokumentiert werden. In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf den Kernprozessen der systemorientierten Entwicklung wie z. B. Architekturentwicklung, da insbesondere die Phasenebenen (zeitlich wiederkehrende Elemente) und Aktivitätsebenen (inhaltlich wiederkehrende Elemente) betrachtet werden. Der Einsatz von Prozessmodellen reduziert die Wahrscheinlichkeit wichtige Aspekte zu vergessen und dient dem Wissenstransfer sowie der Verbesserung der Kommunikation zwischen den Beteiligten im Entwicklungsprozess /12 in 13/.

### Verwendung von Prozessmodellen in Änderungsprozessen

Prozessmodelle dienen der Strukturierung und Visualisierung eines Prozesses, um die Kommunikation von Aktivitäten, Abhängigkeiten und Verantwortlichkeiten darzustellen. Aus den Prozessstrukturen ergeben sich komplexe Abhängigkeiten der Prozesselemente, weshalb das Managen und die Identifikation von Prozessen notwendig ist /5/. Prozessmodelle können auch dazu beitragen, die Akteure eines Entwicklungsprozesses und ihre mentalen Modelle aufeinander abzustimmen und spielen daher eine wichtige Rolle in der Koordination von Veränderungsprozessen /13/. Die Anpassung von Prozessen dient insbesondere der kontinuierlichen Prozessverbesserung, dem Wissensmanagement, der Mitarbeiterschulung, der Prozessdokumentation und der Qualitätssicherung /14, 10/. Je nach Verwendungszweck gibt es unterschiedliche Informationsbedarfe, die in einem Prozessmodell berücksichtigt und dargestellt werden müssen. In /3/ wird unter anderem beschrieben, wie Prozessmuster und Methoden die Anpassung in veränderten Prozessen unterstützen können. Der Einsatz von Prozessmodellen und -mustern unterstützt die Stakeholder durch die gegebene Struktur, flexibel auf veränderte Situationen reagieren zu können. In /3/ wird durch Experimente mit Studierenden nachgewiesen, dass der Einsatz von situationsabhängigen Prozessen und Methoden Transparenz schafft und damit sogar auf eine Verbesserung der Systemqualität hinweist.

### Kategorisierung von Prozessmodellen in Änderungsprozessen

Heutzutage ist es unabdingbar, auf Veränderungen zu reagieren und somit Prozesse anzupassen und zu erweitern. Daher ist es in einem ersten Schritt wichtig, mögliche Gründe für Veränderungen zu definieren und Anforderungen an Prozessmodellierungstechniken abzuleiten. In diesem Beitrag werden dazu die Prozessanalyseergebnisse des öffentlich geförderten Verbundprojektes RePASE herangezogen. In RePASE arbeiten 12 Partner aus Forschung und unterschiedlichen Industriebranchen interdisziplinär zusammen. Ziel des Verbundprojektes ist es, strukturierte und zielgerichtete Reflexionen im Entwicklungsprozess zu verankern. Die Reflexion auf verschiedenen Ebenen (strategisch, taktisch, operativ) soll dazu beitragen, zielgerichtet Anpassungen und Neueinführungen von Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeugen für die systemorientierte

Entwicklung sowie neue Kompetenzen und Zusammenarbeitsformen in der bestehenden Produktentwicklung zu initiieren. Die Gründe für Prozessänderungen resultieren daher aus Erfahrungen des Verbundprojektes RePASE (Workshop zur Nutzung generischer Prozesse nach /4/, Bewertung von Wertschöpfung, Wissensintensität und Kollaboration, vgl. Vorgehensweise Abbildung 2) und basieren auf den damit verarbeiteten literaturbasierten Arbeiten aus /15, 3, 16/:

- Wechsel in der Führung: Managementstrategie und Wissensverluste durch Personalwechsel
- Einführung neuer Technologien, z. B. neue (Sub-)Systeme oder Prozessautomatisierung
- Veränderungen in der Organisationskultur, z. B. durch Stand-up-Meetings oder agile Strukturen
- Veränderte Zuständigkeiten und (neue) Kooperationen sowie neu geschaffene Rollen in einer Organisation
- Festlegung von Meilensteinen inkl. geforderter Ergebnisse und neuer Beschreibungen von Produkten (Modellen)
- Koordinierung von Informationen zwischen internen/externen Beteiligten
- Änderungen der in einem Prozess angewandten Methoden

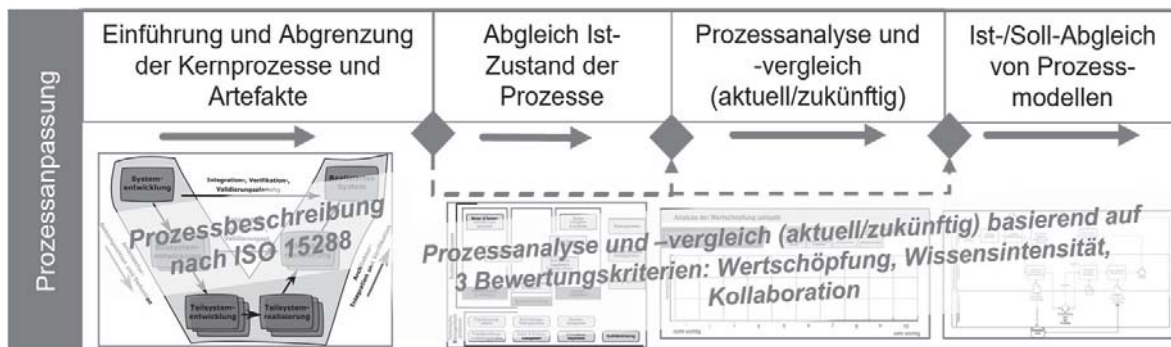
Veränderungen werden durch Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Eigenschaften verursacht. Auslöser sind häufig Verschiebungen von Wertschöpfungsschwerpunkten, Kommunikationsschwierigkeiten oder veränderte Kunden- und Marktanforderungen /15/. Auch die Wissensintensität und die Kollaboration spielen innerhalb der Prozessanalyse eine entscheidende Rolle. Ausgehend von dem Verständnis, dass sich Veränderungen auf die verschiedenen Elemente einer Methodik auswirken (Abbildung 1), müssen für jedes Änderungsszenario (vgl. Tabelle 1) die Auswirkungen auf Prozesse, Methoden, Werkzeuge und Organisation bewertet werden. Das Beispiel "Veränderung in der Führung" befasst sich mit der Tatsache, dass viel implizites Wissen an eine Person gebunden ist und diese Person somit eine zentrale Rolle im Prozess einnimmt. Das Projektteam ist auf den Wissenstransfer angewiesen und die (ausreichende) Verfügbarkeit des Wissens kann dadurch Entscheidungen verzögern. In diesem Fall ist das Ziel, das Wissen zu transferieren und neue Meilensteine für die Entscheidungsfindung und den Wissenstransfer in den Prozess zu integrieren. Weitere beispielhafte Änderungsszenarien, Ziele und abgeleitete Anforderungen an Prozessmodelle können Tabelle 1 entnommen werden. Im Rahmen veränderter Prozesse ist der erste Schritt die Erkenntnis, dass einzelne Elemente dieses Ökosystems angepasst werden müssen. Dabei ist zu klären, wie eine Prozessanpassung durchgeführt werden kann. Die Vorgehensweise zur Prozessanpassung wird in Abbildung 2 anhand der Workshop-Ergebnisse aus RePASE in 4 Schritten erläutert.

**Tabelle 1:** Analyse von Veränderungsszenarien im KMU-Umfeld und Ableitung von Anforderungen an Prozessmodelle

Kategorie	Beispiel für ein Änderungsszenario	Anforderungen an Prozessmodelle
<b>Prozesse</b>	Wechsel in der Führung: Das gebündelte Wissen einer Person soll weitergegeben werden, um den Entscheidungsprozess nicht zu verlangsamen	Beschreibung neuer Meilensteine im Prozess und Definition von benötigtem Wissen; Team-Meetings für Entwicklungsaktivitäten festlegen und betroffene Stakeholder in die Entscheidungsfindung einbinden
	Prozessdokumentation: Unterschiedliche Beschreibungsebenen inkl. der Integration von Methoden und Outputs müssen einheitlich definiert werden	Abbildung der neuen Prozessbeschreibungsebenen und Verantwortlichkeiten in einem einheitlichen Prozessmodell; Definition der zu verwendenden Methoden und zu liefernden Artefakte
<b>Methoden</b>	Wechsel in der Führung: Führungsverhalten und -methoden hängen von der Führungskraft ab und sollten sich in der Art und Weise, wie Entscheidungen getroffen werden, während eines Veränderungsprozesses nicht ändern	Beschreibung der neuen Meilensteine und der Rollen im Prozess; Definition der zu verwendenden Methoden
	Änderung der Methoden: Neue technische Methoden müssen eingeführt werden	Prozesse und verwendete Methoden visualisieren; Entscheidungsfindung beschreiben
<b>Werkzeuge</b>	Wechsel in der Führung: Neuer Fokus auf toolbasierte Lösungen; Integration neuer Tools zur Erzeugung und Bearbeitung von Produktdaten	Verbindung von Prozessdaten und Produktdaten; Integration und Verknüpfung von Werkzeugen in die visuelle Prozessstruktur
<b>Organisation</b>	Veränderung der Organisationskultur: Der Wandel wirkt sich auf die Entwicklung kultureller Wertemuster in einer Organisation aus und beeinflusst damit die Organisationsstruktur und die Entscheidungsfindung in der interdisziplinären Zusammenarbeit; Entscheidungen sollten nicht verzögert werden	Definition der Art der Entscheidungsfindung und Neuausrichtung der organisatorischen Prozesse; Verknüpfung von Zuständigkeiten, Aktivitäten und Prozessstrukturen
	Zuständigkeiten und (neue) Kooperationen: Die Entscheidungsfindung verzögert sich, die Art der Entscheidungsfindung ändert sich und das Wissen wird auf neue Personen verteilt	Einführung von neuen Rollen, Teams und Entscheidungen im Prozessmodell

## Vorgehen zur Prozessanalyse in Änderungsprozessen

Das Vorgehen zur Prozessanalyse in Veränderungsprozessen zielt insbesondere auf die Prozessanpassung ab. Dafür werden vier Schritte durchlaufen, die auf Erfahrungen aus Workshops zur Prozessanalyse und -entwicklung innerhalb des Forschungsprojektes im KMU-Umfeld basieren. Abbildung 2 stellt die einzelnen Schritte des Anpassungsprozesses dar und bietet eine Gesamtübersicht über die Methoden innerhalb des Vorgehens.



**Abbildung 2:** Workshop-basiertes Vorgehen zur Prozessanpassung in 4 Schritten

Das Vorgehen zur Prozessanalyse wird in der Workshopreihe im KMU-Umfeld in folgenden **4 Schritten** umgesetzt:

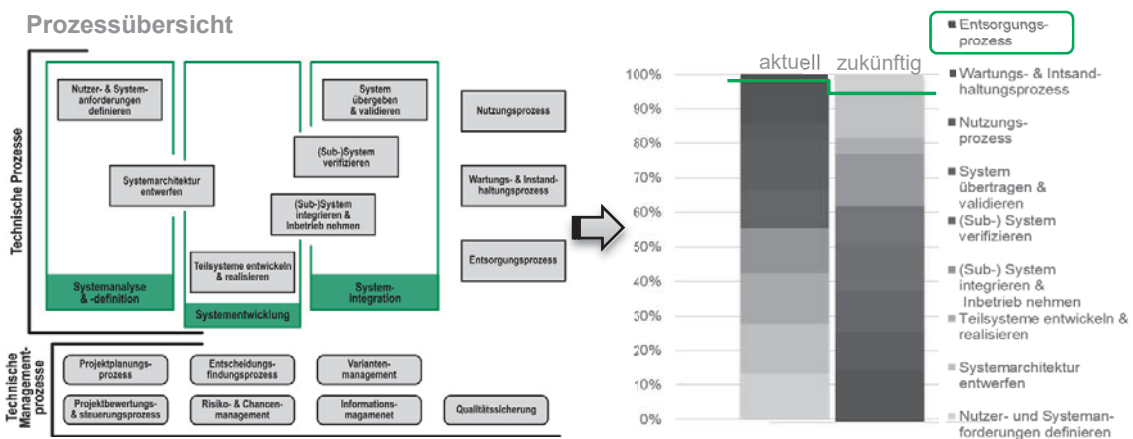
**1) Einführung und Abgrenzung der Kernprozesse in der systemorientierten Entwicklung:** Auf Basis der Kernprozesse nach /17/ und /4/ wird eine Prozessbeschreibung mit dem Fokus auf den technischen Prozessen (z. B. Architekturprozess) und den technischen Managementprozessen (z. B. Projektmanagementprozess) erstellt. Die Prozessbeschreibung unterstützt die interdisziplinären Workshop-TeilnehmerInnen, ein gemeinsames Verständnis der Kernprozesse der systemorientierten Entwicklung zu entwickeln.

**2) Abgleich Ist-Zustand der Prozesse:** Um den Ist-Zustand der Prozesse der Industriepartner zu erfassen, wird das V-Modell und die darin dargestellten Prozesse erläutert. Anschließend erfolgt ein Abgleich mit dem jeweiligen KMU, welche Prozessschritte bereits etabliert sind und welche Prozessschritte (noch) nicht durchgeführt oder möglicherweise einer anderen Bezeichnung folgen.

**3) Prozessanalyse und -vergleich (aktuell/zukünftig):** Die Prozessanalyse wird exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt und findet anhand einer Prozessübersicht (Prozesse gemäß Prozessbeschreibung aus Schritt 1) per Drag-and-Drop-Whiteboard-Funktion jeweils für den aktuellen (Jahr 2021) und den zukünftigen (Jahr 2030) Zustand der Prozesse statt. Die generische Prozesslandschaft wird vorgestellt (Abbildung 3, Prozessübersicht links) und die aktuellen Prozesse der KMU-Partner an die Kernprozesse der systemorientierten Entwicklung angeglichen. Dabei werden die Teilprozesse in ein Bewertungsschema eingeordnet und anhand drei ausgewählter Kriterien bewertet:

- **Wertschöpfung:** Prozess (Schaffen von Mehrwert) oder Ergebnis, das durch Transformation (Produktion, Handel) entsteht
- **Wissensintensität:** Zeigt sich in einem hohen Anteil an Wissen im Vergleich zu Arbeit und Kapital in Leistung und Wertschöpfung
- **Kollaboration:** Erfordert zwei oder mehrere soziale Einheiten, welche an Aufgaben arbeiten, die Ressourcen, Ergebnisse und Ziel teilen

Anschließend erfolgt der Vergleich der aktuellen Prozesse mit den zukünftigen Prozessen in Abbildung 3 (rechts) exemplarisch für die Bewertung der Wertschöpfung. Das Balkendiagramm zeigt z. B., dass die Wertschöpfung des Entsorgungsprozesses von 2021 auf 2030 gesteigert werden soll. Das Gesamtbild weist auf, dass innerhalb der Wertschöpfung einige Verschiebungen (z. B. Nutzer- und Systemanforderungen definieren) innerhalb der Prozesslandschaft zu erwarten sind, die anhand eines Prozessmodells bereits modelliert werden können. Die Grundlage dafür bilden bestehende Prozessdokumentationen, aus denen ein Prozess mit Hilfe von Softwarewerkzeugen (z. B. Enterprise Architect) modelliert werden kann. Der Anpassungsbedarf, der aus dem Diagramm (Abbildung 3) hervorgeht kann dabei bereits integriert werden, um die bestehenden Möglichkeiten zu simulieren.



**Abbildung 3:** Beispiel für ein Ergebnis der Prozessanalyse: Technische Prozesse, Bewertungskriterium: Wertschöpfung (aktuell/zukünftig)

**4) Ist-/Soll-Abgleich von Prozessmodellen:** Nach der Bewertung und dem Vergleich der Prozesse, erfolgt im letzten Schritt ein Ist-/Soll-Abgleich exemplarischer Prozessmodelle in Änderungsprozessen. Dabei wurden in Schritt 3 Prozessmodelle auf Basis der Prozessanalyse (aktuell/zukünftig) erstellt, die nun analysiert und bewertet werden sollen. Dafür werden 4 Bewertungskriterien für Prozessmodelle in Anlehnung an /18/ und /16/ definiert:

- **Informationsfluss** (Informationsweitergabe und Informationstransparenz)
- **Interaktionslevel** (Interaktionspunkte zwischen den Beteiligten und deren Zuständigkeiten)
- **Prozessstruktur** (grundlegende Abläufe, Detaillierung der Aktivitäten, Art der Dokumentation)
- **Ergebnisqualität** (Qualität des Ergebnisses oder Artefakts eines (Teil-) Prozesses)

Um den Vergleich der Prozessmodelle darzustellen, wird im letzten Schritt ein Ausschnitt einer Auswahlhilfe für Prozessmodelle anhand der genannten 4 Bewertungskriterien in Tabelle 2 vorgeschlagen. Am Beispiel der Prozessmodelle BPMN Diagramm (Business Process Model and Notation) und Gantt Chart werden die Spalten anhand der 4 Bewertungskriterien betrachtet. Beim BPMN Diagramm wird beispielsweise das Ziel (• in der Spalte Zielsetzung: Z) auf den Informationsfluss gerichtet, in dem verschiedene Informationsflüsse, wie z. B. der Sequenzfluss, dargestellt werden können (Spalte Eigenschaft: E) und standardisierte Konnektoren zur Verfügung stehen. Die Code-Spalte (C) geht auf die Artefakte (z. B. Dokumente) ein und soll aufzeigen, wie gut diese spezifiziert werden können.

**Tabelle 2:** Ausschnitt - Auswahlhilfe für exemplarische Prozessmodelle anhand ausgewählter Bewertungskriterien

Bewertungskriterien im Zusammenhang mit ausgewählten Prozessmodellparametern (Z: Zielsetzung, E: Eigenschaft, C: Code; •: Wenn ein schwarzer Punkt gesetzt ist, ist dies ein Ziel in der gewählten Kriterienkategorie)												
Prozessmodelle	Informationsfluss			Interaktionslevel			Prozessstruktur			Ergebnisqualität		
	Z	E	C	Z	E	C	Z	E	C	Z	E	C
<b>BPMN Diagramm</b> (Business Process Model and Notation)	•	Verschiedene Informationsflüsse (Sequenz, bedingte Flüsse), Flusskontrolle	Vordefiniert, standardisierte Konnektoren					Visuelle Darstellung, Möglichkeit der Modellausführung	Artefakte (Dokumente, Datenspeicher, swimlanes: Lanes mit einem Pool)		Prozessaktivitäten, Aufgaben, Teilprozesse	Transaktion, Ereignisteilprozess, Aufrufaktivität, erweiterter Teilprozess, Artefakte (vordefinierte Syntax und Semantik)
<b>Gantt Chart</b>				Beziehungen zwischen den Projektaktivitäten	Verbindungs- linien		Übersicht und Dauer der Projektaktivitäten, Ermittlung von Pufferzeiten	Verbindungs- linien				

Mit dem Ausschnitt der Auswahlhilfe können Prozessmodelle je nach Änderungsszenario analysiert werden und die Anpassungen, die aus der Prozessanalyse hervorgehen, mit in die Auswahl einbezogen werden. So ergab sich aus der Prozessanalyse, dass die Wertschöpfung eine besondere Herausforderung bei der Prozessanpassung darstellt und dies in der Auswahl des Prozessmodells berücksichtigt werden sollte. Bisher hat sich dieses Vorgehen zur Prozessanalyse in Kombination mit der Auswahl des Prozessmodells im entsprechenden Veränderungsszenario bewährt und wird in den nächsten Forschungsarbeiten innerhalb von Forschungsprojekten auf die Untersuchung mehrerer Prozessmodelle und einem höheren Detaillierungsgrad ausgeweitet.

## Zusammenfassung und Ausblick

Prozesse in Organisationen sind häufigen Veränderungen ausgesetzt. Zu wesentlichen Elementen strukturierter Veränderungsprozesse zählen die Integration neuer Methoden, Rollen oder zusätzlicher Engineering-Aktivitäten (z. B. zur Entwicklung von Systemarchitekturen). Da sich die internen und externen Prozessbedingungen ständig ändern, ist es notwendig, Veränderungsszenarien zu definieren und die Prozessmodelle entsprechend zu kategorisieren. In diesem Beitrag werden die Rolle sowie die Anforderungen an Prozessmodelle zur Unterstützung von Änderungsprozessen beschrieben. Um die Auswahl geeigneter Prozessmodelle für verschiedene Änderungsszenarien zu unterstützen, wurde ein Vorgehen zur Prozessanalyse vorgestellt und anhand ausgewählter Prozessmodelle ein exemplarischer Ausschnitt für eine Auswahlhilfe bereitgestellt. Die Entwicklung des Vorgehens basiert auf Literatur und ersten Erkenntnissen aus der Prozessmodellierung in Zusammenarbeit mit KMUs. Derzeit liegen noch keine Erkenntnisse über die Anwendbarkeit und Hilfestellung der Kategorisierung in der Praxis vor. Die weitere Forschung wird sich darauf konzentrieren, weitere Änderungsszenarien zu identifizieren und ein Verfahren zur Ableitung von Anforderungen an Prozessmodellierungstechniken zu entwickeln. Weiterhin ist geplant, einen Auswahlleitfaden für Prozessmodelle zu entwickeln und in der Praxis zu evaluieren, um die Klassifizierung geeigneter Prozessmodelle in Änderungsprozessen zu verfeinern. Hierfür sind weitere Forschungsarbeiten zum Einsatz von Prozessmodellen in Änderungsprozessen in der Praxis notwendig.

## 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/ Hjartarson, B.; Daalhuizen, J.; Gustafsson, K. F.: "The Dark Side of Methods – An Exploration of the Negative Effects of Method Use and Method Reflection in Design", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21), Göteborg, Schweden, 16.-20. August 2021, <https://doi.org/10.1017/pds.2021.561>
- /2/ Bavendiek, A.-K.; Inkermann, D.; Vietor, T.: "Interrelations between processes, methods, and tools in collaborative design - A framework", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 8: Human Behaviour in Design, Vancouver, Kanada, 21.-25. August 2017
- /3/ Lindemann, U.: "Methods are networks of methods", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED03), Stockholm, Schweden, 19.-21. August 2003
- /4/ INCOSE-TP-2003-002-04: INCOSE Systems Engineering Handbuch: A guide for system life cycle processes and activities, International Council on Systems Engineering (INCOSE), San Diego, USA, 2015
- /5/ Lindemann, U.: Product development, in Methodical Development of Technical Products, S. 7-32, Springer, Heidelberg, 2009
- /6/ Helten, K.; Eckert, C.; Gericke, K.; Vermaas, P.: "Concept for a Persona Driven Recommendation Tool for Process Modelling Approaches", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21), Göteborg, Schweden, 16.-20. August 2021, <https://doi.org/10.1017/pds.2021.71>
- /7/ Eckert, C.M.; Clarkson, P.J.: "Planning development processes for complex products", Engineering Design 21(3), S.153-171, 2010, <https://doi.org/10.1007/s00163-009-0079-0>
- /8/ Trauer, J.; Wöhr, F.; Eckert, C.; Kannengiesser, U.; Knippenberg, S., et al.: "Criteria for selecting design process modelling approaches", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21), Göteborg, Schweden, 16.-20. August 2021, <https://doi.org/10.1017/pds.2021.79>
- /9/ Inkermann, D.: "Shaping Method Ecosystems – Structured Implementation of Systems Engineering in Industrial Practice", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21), Göteborg, Schweden, 16.-20. August 2021, <https://doi.org/10.1017/pds.2021.525>
- /10/ Browning, T.R.; Fricke, E.; Negele, H.: Key concepts in modeling product development processes, Systems Engineering, Vol. 9 No.2, S.104-108, 2006, <https://doi.org/10.1002/sys.20047>
- /11/ Gericke, K.; Eckert, C.; Stacey, M.: What do we need to say about a design method? In Maier, A. et al. (Eds.), Design theory and research methodology, DS, Curran Associates Inc, Red Hook, NY, S.101–110, 2017



- /12/ Gericke, K.; Blessing, L.: Comparisons of design methodologies and process models across disciplines: A literature review: In Culley, S.J. et al. (Eds.), Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED 11), Lyngby/Kopenhagen, Dänemark, 15.-19. August 2011, Design Society, vol 1, S.393-404
- /13/ Wynn, D.C.; Clarkson, P.J.: "Process models in design and development", Engineering Design, Auckland, Neuseeland, 30. Juni 2017, DOI 10.1007/s00163-017-0262-7
- /14/ Bender, B.; Gericke, K.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer, Berlin, 2021, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7>
- /15/ Wickel, M.C.: Managing change better - A data-based methodology for analysing technical change, [PhD Thesis], Technical University of Munich, 2017, <https://d-nb.info/1136078053/34>
- /16/ Wynn, D.; Caldwell, Nicholas H.M.; Clarkson, J.P.: "Predicting change propagation in complex design workflows", Journal of Mechanical Design, 136(8), 081009, 2014
- /17/ ISO 15288, ISO/IEC/IEEE 15288: Systems and software engineering - System life cycle processes, 2016
- /18/ Ley, T.; Jurisch, M.; Wolf, P.; Krcmar, H.: "Kriterien zur Leistungsbeurteilung von Prozessen: Ein State-of-the-Art": In Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2012: Tagungsband der MKWI 2012 <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201301141138-0>

## Erweiterung der Forschungseinrichtungen am IMW und Einsatzpotentiale in der Akustikforschung

Maume, E.; Rehmet, R.

*Durch eine neu angeschaffte SLM-Anlage kann am Institut für Maschinenwesen Versuche zu einem weiteren Forschungsbereich der Akustik genutzt werden. Dabei handelt es sich um Untersuchungen an der Impedanz von gedruckten Proben, die Hohlräume aufweisen im Vergleich zu Proben ohne solche Hohlräume. Der Hintergrund dieser Versuche besteht darin, dass es mithilfe solcher Bauteile möglich sein könnte, die Schallabstrahlung von Maschinen und Anlagen zu verringern und so die Lärmbelastung zu reduzieren.*



*With a newly acquired SLM system, experiments on a further research area of acoustics can be carried out at the Institut für Maschinenwesen. These are tests with printed samples that have voids in terms of their impedance compared to samples without such voids. The background to these is that with such components it could be possible to reduce the sound radiation of machines and systems and thus to reduce noise pollution.*

### Bedarf an einer SLM-Anlage

Seit August diesen Jahres können wir am Institut für Maschinenwesen Bauteile durch selektives Laserschmelzen (eng. Selective laser melting, Abl. SLM) fertigen. Dabei wird Metallpulver mittels eines Lasers geschmolzen und so additiv ein Werkstück hergestellt.

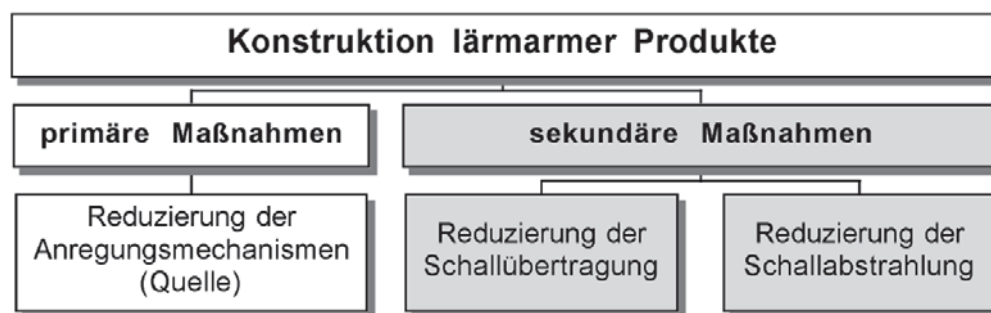
Dieses Fertigungsverfahren bietet zum einen Möglichkeiten schnell und flexibel Metallteile zu fertigen. Zum anderen ermöglicht es die Herstellung von Geometrien, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren wie z.B. Fräsen nicht herzustellen sind. Es ist möglich Bauteile mit belastungsgerechten Strukturen im Inneren aus einem Stück herzustellen. Ebenso können Teile mit Hohlräumen und Kanälen im Inneren, die die Eigenschaften der Bauteile beeinflussen, gedruckt werden. Es besteht also nicht mehr die Notwendigkeit solche Bauteile aus mehreren Elementen zusammenzufügen. Je nach Komplexität reduziert dieser Umstand die Fertigungsdauer. Vor allem aber kann die Stabilität des Bauteils erhöht werden.

Es wurde eine „TruPrint 1000“ der Firma TRUMPF GmbH + Co. KG angeschafft, die die beiden vorhandenen „EOSintM250ext“ ersetzt. Mit den alten Anlagen war es

zwar mit 250 mm x 250 mm Bauraum möglich größere Bauteile im „Selectice Laser Sintering“ Verfahren herzustellen als mit der „TruPrint 1000“. Mit der neuen Anlage haben wir nun die Möglichkeit in einem Bauraum von 100 mm Durchmesser und 100 mm Höhe komplexe Geometrien mit nur leicht verminderten Festigkeitswerten wie bei konventionellen Fertigungsverfahren zu drucken. Diese Anlagen waren jedoch aufgrund der verwendeten Herstellungsverfahren nicht mehr für unsere aktuellen Forschungsthemen geeignet, da das Verfahren nur sehr eingeschränkte Bauteilfestigkeiten erzeugt. Bei der „TruPrint 1000“ wird das Metallpulver durch schichtweises Aufschmelzen zu einem Bauteil. So entsteht ein deutlich dichteres Gefüge als es durch das Sinterverfahren der „EOSintM250ext“ möglich ist. Mit der neuen Anlage ergeben sich viele Möglichkeiten, um am IMW bereits untersuchte Forschungsgebiete zu vertiefen und auch Beiträge zu neuen Gebieten zu leisten. Im Folgenden ist ein Bereich der Akustik, in dem wir aufgrund dieser Anlage neue Versuchsmöglichkeiten haben, beschrieben.

### Verbindung zur Akustik

Im Bereich der Antriebselemente ist die Übertragungsfähigkeit von Körperschall für jedes Element ein wichtiger Faktor. Speziell bei Konstruktionen und Anlagen im Consumerbereich besitzen leisere und vibrationsärmere Anlagen einen Marktvorteil gegenüber derjenigen Konkurrenz, die diesen Aspekt weniger beleuchtet. Als Beispiel sei hier die Waschmaschine genannt, deren Schallabstrahlung möglichst klein sein soll. Durch drehende Antriebselemente, exzentrische Massen und variable Drehzahlen entstehen Körperschallanregungen im Antriebsstrang, die sich durch die Lagerung auf das Gehäuse übertragen. Die Einhausung von solchen Geräten besteht üblicherweise aus Blech, aus Kostengründen häufig mit geringer Dicke. Trifft die Körperschallschwingung auf die Bleche verhält sich die Umhausung der Waschmaschine im ungünstigsten Fall wie die Membran eines Lautsprechers und es kommt zu einer Luftschallanregung.



**Abbildung 1:** Maßnahmen zur Senkung der Schallabstrahlung von Produkten /1/

Zur Vermeidung einer solchen Luftschallanregung kann auf verschiedene Vorgehensweisen zurückgegriffen werden, vgl. /1/:

- Vermeidung der Körperschallanregung durch Optimierung der Baugruppe
- Vermeidung der Luftschallanregung durch Aussteifung der Umhausung
- Vermeidung der Körperschallübertragung vom Schallentstehungsort zum Abstrahlort durch Einbringen von Impedanzelementen

Es ist nicht immer möglich, alle Anregungen durch Körperschall zu vermeiden. Als Beispiel sei für die Waschmaschine die Exzentrizität durch die Wäsche genannt. Auch wenn dieser Ansatz grundsätzlich der ressourcen- und energiesparendste ist, lässt sich nicht jedes maschinendynamische Problem mit diesem Ansatz beseitigen.

Die Vermeidung der Luftschallanregung ist ein in einigen Konstruktionsbereichen weit verbreitetes Vorgehen. Das zugrundeliegende Funktionsprinzip basiert auf einer lokalen Änderung der Steifigkeit des Materials, am Beispiel der Waschmaschine wird dies durch Aussteifungen des Blechs umgesetzt.

Die Vermeidung von Körperschallübertragung wird häufig durch Entkopplungselemente wie zum Beispiel Elastomer-Halter für schwingende Maschinenelemente oder auch Feder-Dämpfer-Systeme umgesetzt. Auch dieses Prinzip basiert auf einer lokalen Steifigkeitsänderung, wobei hier unterschiedliche Materialien zum Einsatz kommen können. Solche Elemente finden sich in nahezu jeder Konstruktion, unter anderem auch in Haushaltsgeräten wie der Waschmaschine.

Es lässt sich zusammenfassen, dass, wenn die Anregung von Körperschall nicht vermieden werden kann, der Körperschall durch Steifigkeitssprünge geleitet und hierbei vermindert werden kann. Innerhalb eines Bauteils kann ein solcher Steifigkeitssprung auch durch Flächen oder Ebenen eines Konstruktionselementes umgesetzt werden, z.B. durch Einbringung von Bohrungen.

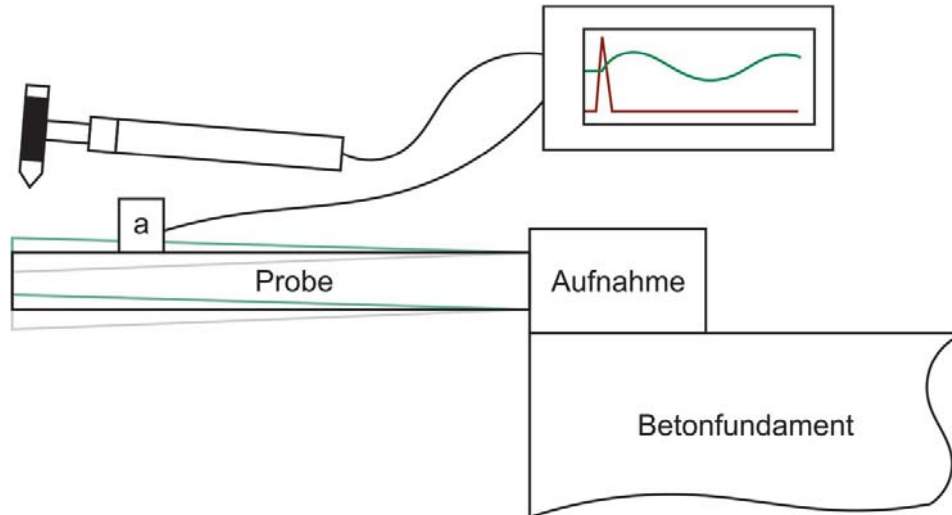
Unter Nutzung der Formgebungsfreiheiten durch den Einsatz von 3D-Druckverfahren lassen sich eine Vielzahl von Geometrien herstellen, die durch spanende Fertigung nicht umsetzbar sind. Innerhalb der Bauteile lassen sich Geometrien in Form von Kavitäten herstellen, die z. B. mit Metall-Pulver oder Luft gefüllt sind. In diesem Bereich wurden bereits für einige Maschinenelemente Untersuchungen durchgeführt, zum Beispiel für Werkzeughalter bei der Bearbeitung von Titanbauteilen, vgl. /2/.

Durch Nutzung von Geometrievariation soll in diesem Forschungsansatz untersucht werden, ob für Maschinenelemente aus dem Bereich der Antriebstechnik eine integrierte Steifigkeitsänderung sinnvoll ist.

### **Bestimmung der Dämpfungseigenschaften an Materialproben**

Als Ansatzpunkt für die Untersuchung wird ein Prüfaufbau eingerichtet, der die Ausbreitung und das Abklingen von einer freien Biegeschwingung untersucht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt. Die Anregung der frei-schwingenden Probe erfolgt durch einen Modalhammer, die Abklingkurve wird

mit einem Beschleunigungsaufnehmer untersucht. Die Masse der Probe ist gegenüber der Aufhängung und dem Betonfundament sehr klein, sodass von geringen Rückwirkungen durch die Lagerung auszugehen ist.

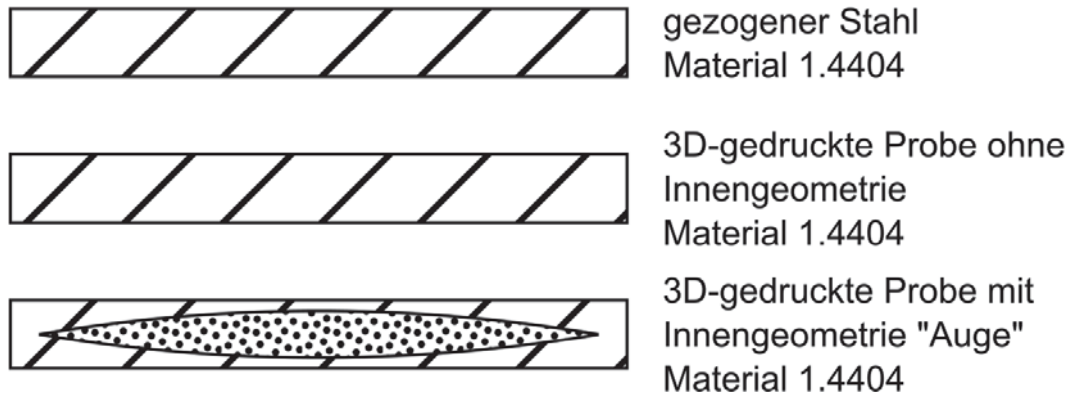


**Abbildung 2:** schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bewertung der Impedanz der Proben



**Abbildung 3:** Versuchsaufbau zur Bewertung der Impedanz der Proben

Die Untersuchungen werden für Edelstahlmaterial (1.4404) ausgeführt. Die Proben werden als Stäbe mit quadratischer Grundfläche hergestellt. Es wurden jeweils drei Proben pro Variante untersucht.

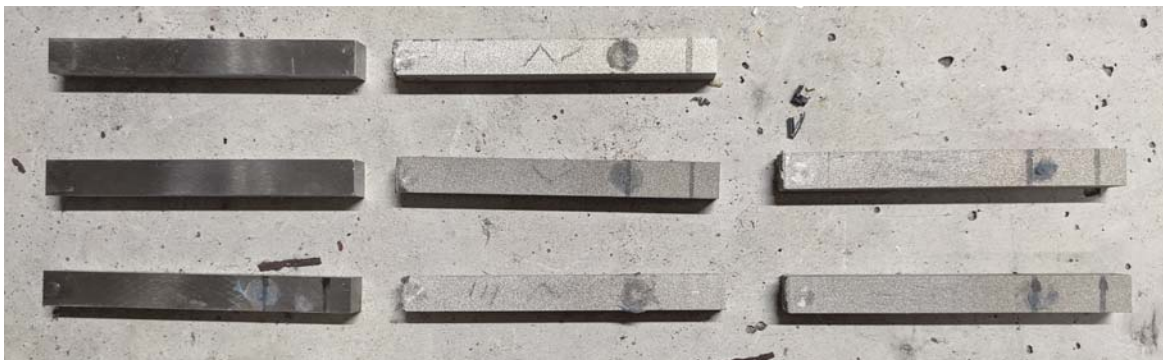


**Abbildung 4:** untersuchte Proben-Geometrien

Als Probengeometrie für die Biegeschwingungsanalyse kommen drei Varianten zum Einsatz:

- Vergleichsmessung aus gezogenem Vollmaterial
- 3D-gedruckte Vollgeometrie / ohne Innengeometrie
- 3D-gedruckte Probe mit Innengeometrie

In Abbildung 4 sind die Proben, die in Abbildung 5 zu sehen sind, schematisch im Schnitt dargestellt.



**Abbildung 5:** Versuchsproben (Links: gezogener Stahl; Mitte: 3D-gedruckte Probe ohne Innengeometrie; Rechts: 3D-gedruckte Probe mit Innengeometrie)

### Ergebnisse der Vorstudien

Die Analyse der Messdaten zeigt, dass es sich um eine gedämpfte Schwingung handelt, deren Amplitude sich mit einer exponentiellen Funktion verringert. Als Ansatzfunktion wird daher die in Gleichung (2) genannte Funktion verwendet.

Anhand der lokalen Maxima der Schwingung werden die zwei in der Gleichung angegebenen Koeffizienten ermittelt.

$$a(t) = \hat{A} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \exp(-d \cdot t) \quad (1)$$

für Sinus-Maximum wird  $\sin(\omega \cdot t) = 1$

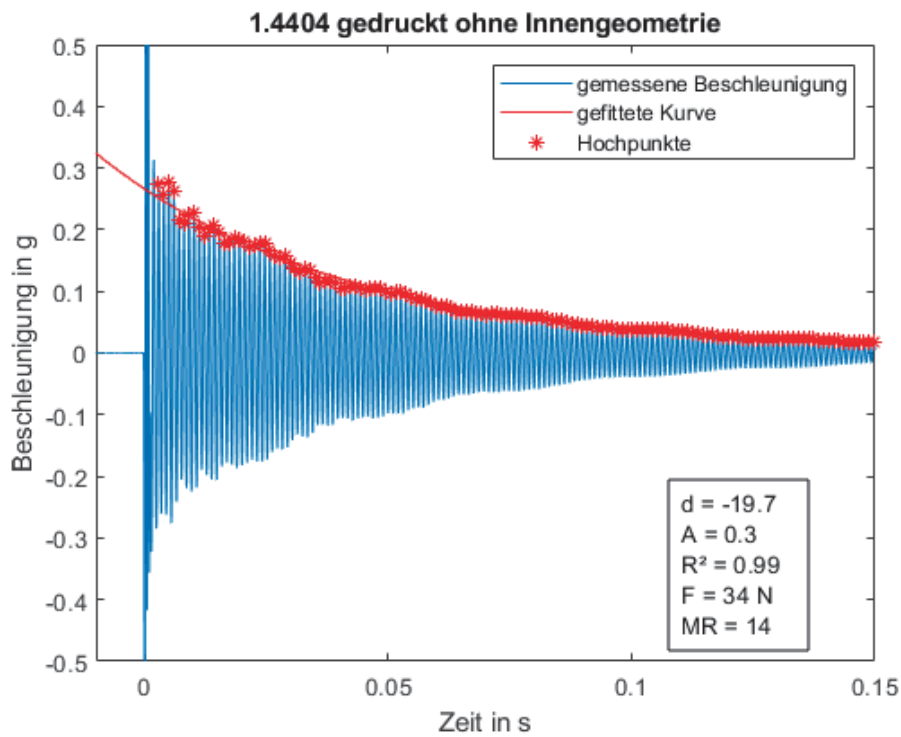
$$A(t) = \hat{A} \cdot \exp(-d \cdot t) \quad (2)$$

**Tabelle 1:** Ergebnisse der Untersuchungen

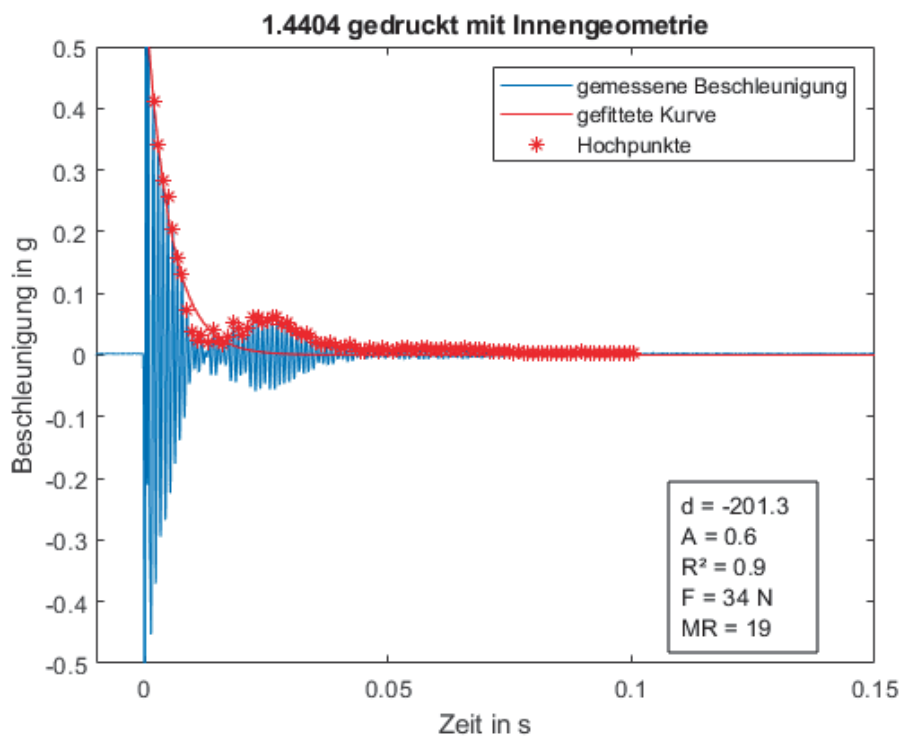
Variante	Dämpfungsexponent b (Mittelwert)	ausgewertete Frequenz
gezogener Stahl	22,3	ca. 950 Hz
3D-gedruckt ohne Innengeometrie	22,6	ca. 950 Hz
3D-gedruckt mit Innengeometrie	161,6	ca. 950 Hz

Die Ergebnisse legen nahe, dass durch Steigerung des Hohlvolumens der Dämpfungsgrad der Proben zunimmt. Zu diesem Ergebnis kommen auch ähnliche Studien, vgl. /3/. In dieser Studie wird unter anderem das Verhältnis von verschmolzenem zu unverschmolzenem Material diskutiert.

In den Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Messdaten nebst Auswertung für eine 3D-gedruckte Probe ohne und mit Innengeometrie dargestellt.



**Abbildung 6:** Messdaten und Auswertung einer Probe der Variante "3D-gedruckte Probe ohne Innengeometrie"



**Abbildung 7:** Messdaten und Auswertung einer Probe der Variante "3D-gedruckte Probe ohne Innengeometrie"



Anhand der berechneten und ausgegebenen Werte ist ein direkter Vergleich der Dämpfungseigenschaften zu erkennen. Zu erwähnen ist, dass das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , das eine Aussage zur Treffgenauigkeit der Ansatzfunktion für die Messdaten liefert, bei einigen Proben nicht ausreichend ist. Dies spricht dafür, dass die Ansatzfunktion aus Gleichung (2) die Verhältnisse nicht vollständig abbildet. Dieser Zusammenhang ist auch in Abbildung 7 zu erkennen, da die Exponentialfunktion das Aufschwingen zwischen 0 und 0,05 Sekunden nicht abbildet. Da die Ansatzfunktion die Oberschwingung nicht abbildet, ist auch die Streuung der Ausgewerteten d-Werte sehr groß. Im nächsten Schritt muss also geprüft werden, ob eine Ansatzfunktion von höherem Grad notwendig ist.

### Zusammenfassung und Ausblick

Durch die neue SLM-Anlage am Institut kann ein Forschungsansatz im Bereich der Akustik verfolgt werden, der durch konventionelle Fertigung nicht abbildbar ist. Es konnte gezeigt werden, dass durch Nutzung von Formgebungsfreiheiten durch den 3D-Druck Einwirkungen auf die Abklingkurve eines frei schwingenden Stabes erzielt werden können. Im Zusammenhang mit dynamisch belasteten Maschinenelementen aus der Antriebstechnik kann hier ein Beitrag zu leiseren Maschinen und Anlagen geleistet werden.

In weiteren Studien werden die dynamisch-mechanischen Auswirkungen und Impedanzeigenschaften von unterschiedlichen Innengeometrien untersucht. Weiterhin wird für die Anwendbarkeit für reale Maschinenelemente die Untersuchung der Festigkeitseigenschaften notwendig.

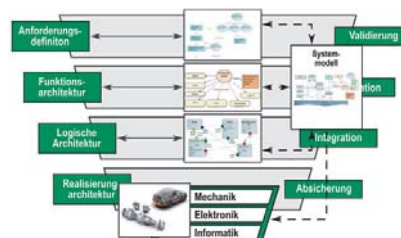
### Literatur

- /1/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Lärmarm konstruieren XVIII – Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, 2001
- /2/ Biermann, D., Meier, H., Haberland, C., Abrahams, H., Metzger, M., Steiner, M.: Einsatz additiv gefertigter Werkzeughalter: Optimierungspotentiale bei der Drehbearbeitung von Titan durch strahlgeschmolzene Werkzeugaufnahmen; In: wt Werkstattstechnik – Online: Forschung und Entwicklung in der Produktion; Nr. 103/6, S. 481–484, 2013
- /3/ Künneke, T.; Zimmer D.: Konstruktionsregeln für additiv gefertigte Partikeldämpfer, erschienen in „Konstruktion (2021 Nr.11-12)“, VDI Verlag, 2021

## Model-based Systems Engineering: Verständnis und Mehrwert für die Entwicklung komplexer Produkte

Schumacher, T.; Inkermann, D.

*Aktuelle Produktentwicklungen sind durch eine hohe und kontinuierlich zunehmende Komplexität der Produkte selbst sowie der Prozesse geprägt. Etablierte Entwicklungsmethoden und –vorgehensweisen sind häufig nicht geeignet, dieser Komplexität zu begegnen. Systems Engineering und Model-based Systems Engineering stellen Ansätze dar um die Entwicklung komplexer Produkte besser zu strukturieren und handhaben zu können. Dieser Beitrag führt in die Grundlagen des Model-based Systems Engineering ein, stellt dessen Mehrwert dar und gibt einen Einblick in die Anwendung von Model-based Systems Engineering anhand eines Anwendungsbeispiels. Zudem werden zukünftige Forschungsfelder aufgezeigt.*

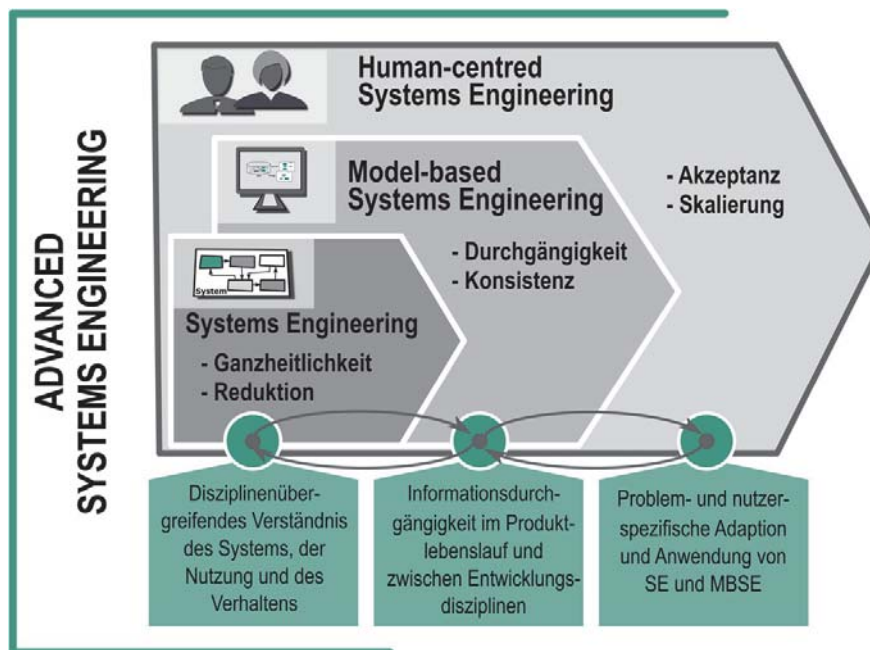


*Current product developments are characterized by high and continuously increasing product and process complexity. Established development methods and approaches often cannot handle this complexity sufficiently. Systems engineering and model-based systems engineering are approaches for a more structured development and handling of complex products. This article introduces the basics of model-based systems engineering, presents its benefits and gives an insight into the application of model-based systems engineering based on an application example. Additionally future research fields will be presented.*

### Einführung in das Model-based Systems Engineering

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Entwicklung komplexer Produkte ist ein domänenübergreifendes Systemverständnis, welches die domänenspezifischen Entwicklungslösungen zu einer systemorientierten Anforderungs- und Funktionserfüllung sowie Systemrealisierung integriert. Ein komplexes Produkt lässt sich mindestens anhand der Einheiten Vielfalt und Dynamik charakterisieren. Dabei stellt die Vielfalt die Anzahl der verknüpften Systemelemente und deren Heterogenität dar. Die Dynamik beschreibt die Veränderbarkeit des Systems über die Zeit, z.B. anhand unterschiedlicher Systemzustände /1/. Darüber hinaus zeichnet sich die Entwicklung komplexer Produkte durch parallele Entwicklungsaktivitäten unterschiedlicher Disziplinen, wie bspw. Mechanik-, Elektronik- und Softwareentwicklung, aus. Vorgehensmodelle des Systems Engineering, wie das V-Modell, unterstützen bei diesen Entwicklungsaktivitäten, indem eine Abfolge („Top-Down-Vorgehen“ bzw. „Vom Groben zum Detail“ /2/) vorgeschlagen wird und insbesondere die Notwendigkeit einer systemorientierten Betrachtungsweise und

einer kontextspezifischen Dekomposition sowie Integration des Systems adressiert wird /3/. Systems Engineering (SE) adressiert somit gleichzeitig die Prinzipien Ganzheitlichkeit und Reduktion während der Entwicklung komplexer Produkte. In der industriellen Praxis sind meist dokumentenbasierte Entwicklungsansätze verbreitet, welche oft Inkonsistenzen oder Unzulänglichkeiten, wie bspw. eine unzureichende Rückverfolgbarkeit zwischen Systemrealisierung und -anforderungen, aufweisen /4/. Um hieraus resultierende Fehlerquellen während der Entwicklung zu vermeiden, wurde das modellbasierte Systems Engineering (engl. Model-based Systems Engineering) entwickelt /5/. Das modellbasierte Systems Engineering (MBSE) zielt auf die Durchgängigkeit und Konsistenz von Systembeschreibungen unterschiedlicher Entwicklungsdomänen, wie Mechanik, Elektrik / Elektronik und Software, ab und verwendet verstärkt formale Modelle für die domänenübergreifende Systemmodellierung. SE und MBSE können dabei als zwei aufeinander aufbauende Handlungsfelder im Rahmen des Advanced Systems Engineering betrachtet werden, siehe Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Handlungsfelder und Zielsetzungen des Advanced Systems Engineerings, Zielsetzungen basierend auf /6/

Das Advanced Systems Engineering erweitert die Handlungsfelder SE und MBSE um die Humanzentrierung, welche insbesondere für die Umsetzung von Systems Engineering in der Praxis von großer Bedeutung ist. Das human-centred Systems Engineering zielt dabei auf die Akzeptanz und Skalierung von Entwicklungsmethoden, -werkzeuge und Vorgehensweisen an die individuellen Problemstellungen und Anforderungen ab. Gleichzeitig bestehen zwischen den drei Handlungsfeldern Abhängigkeiten, so bedarf eine erfolgreiche Umsetzung von MBSE die Prinzipien des Systems Engineering, wie eine systemorientierte Entwicklung und eine zweckmäßige Reduktion, und stellt gleichzeitig Anforderungen

an bspw. Entwicklungsmethoden und –vorgehensweisen, welches das Handlungsfeld des human-centred Systems Engineering betrifft /7/.

Eine zentrale Zielstellung des MBSE ist eine durchgängige, konsistente Systemmodellierung. Diese erfolgt üblicherweise durch Anwendung semiformaler Modellierungssprachen, wie SysML oder UML, und zielt auf die Beschreibung des Systemkontextes, der Systemanforderungen, der Systemfunktionen, des Systemverhaltens und der Systemstruktur in einem Systemmodell ab /8, 9/. Das Systemmodell beschreibt neben den einzelnen Systemelementen auch deren Schnittstellen und funktionalen Wechselwirkungen um das dynamische und emergente Systemverhalten abzubilden. Dabei lässt sich das emergente Systemverhalten nicht direkt mit dem Verhalten der einzelnen Systemelemente begründen, sondern leitet sich aus den Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen untereinander und zum System ab /10/.

### **Industrielle Anwendung von Systems Engineering und Ziel dieses Beitrags**

Um Anwendung und Bedarf von Systems Engineering in der industriellen Praxis zu ermitteln, wurden in den vergangenen Jahren wiederholt Interviews mit Vertretern verschiedener Industriebranchen durchgeführt /11, 12, 13/. Dabei ergab sich ein heterogenes, branchenabhängiges Ergebnis. In der Luft- und Raumfahrttechnik sind Vorgehensweisen des Systems Engineering weitgehend etabliert. Gleichzeitig sieht die Fahrzeugindustrie eine zunehmende Bedeutung von Systems Engineering, um komplexer Produkte effizient zu entwickeln. Aber im Maschinen- und Anlagenbau, welcher den breiten Mittelstand der deutschen Industrie repräsentiert, wird Systems Engineering mehrheitlich nicht angewendet und dessen Nutzen ist nur unzureichend bekannt. Dieser Beitrag stellt den Nutzen von Systems Engineering und insbesondere des modellbasierten Systems Engineering basierend auf etablierter Literatur dar und erläutert die Anwendung von MBSE an einem konkreten Anwendungsbeispiel. Außerdem werden weitere Forschungsfelder im Rahmen der systemorientierten Entwicklung vorgestellt.

## Mehrwert und Nutzen von Systems Engineering und MBSE

Systems Engineering stellt einen interdisziplinären Ansatz zur Entwicklung und Realisierung von Systemen dar. Dabei betrachtet SE insbesondere die geforderten Systemfunktionen auf Ebene des Gesamtsystems und unter Berücksichtigung des Systemumfeldes und der Nachbarsysteme und beabsichtigt diese möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess zu definieren. Gleichzeitig stellt SE immer eine Betrachtung des zu entwickelnden Systems auf unterschiedlichen Hierarchieebenen in den Vordergrund. Einerseits wird das zu entwickelnde System geöffnet, um die Systemstruktur (Systemelemente und deren Wechselwirkungen) besser zu verstehen und andererseits werden übergeordneter Systeme, mit denen das zu entwickelnde System interagiert oder in die es eingebettet wird, betrachtet. Basierend auf diesen Erläuterungen, welche auf dem INCOSE Handbuch /9/ beruhen, lassen sich bereits zentrale SE-Vorteile ableiten:

- Verbindung unterschiedlicher Entwicklungsdisziplinen
- Frühzeitige Definition des funktionalen Systemverhaltens
- Systemstruktur basiert auf den erforderlichen Systemfunktionen
- Berücksichtigung des Systemkontextes im Entwicklungsprozess

Grundsätzlich werden dem Systems Engineering weitere generelle Vorteile, wie eine kürzere Produktentwicklungsdauer, eine Reduktion der Änderungen während der Entwicklung, eine Reduzierung von Entwicklungsschleifen und eine Verringerung der Herstellungskosten, zugeschrieben /14/.

Die Anwendung des modellbasierten Systems Engineering, welches sich von dem klassischen, dokumentenorientierten SE insbesondere durch den Einsatz von Modellen unterscheidet, bietet weitere Vorteile. Zur Sicherstellung eines effizienten Entwicklungsprozesses ist eine durchgängige Abstimmung und Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen erforderlich, welches jedoch oft aufgrund unterschiedlicher Fachtermini und heterogener Entwicklungsvorgehensweisen und -modellen scheitert. Diese Herausforderung greift MBSE durch den Einsatz digitaler Modelle als zentrales Informationsmedium auf und verbessert damit die Kommunikation, den Informationsfluss und die Zusammenarbeit verschiedener Entwicklungsdisziplinen. Gleichzeitig können digitale Modelle die Informationskonsistenz verbessern, welches die Fehleranzahl und die Anzahl zusätzlicher Entwicklungszyklen reduziert /15/. Ein weiterer zentraler Nutzen von MBSE ist ein verbessertes Systemverständnis. Die Generierung eines umfassenden Systemverständnisses ist die Grundlage für die Entwicklung eines komplexen Produkts, da Auswirkungen aufgrund getätigter Entwicklungsentscheidungen sonst nicht absehbar und planbar sind. Nachfolgend wird eine Auswahl weiterer MBSE-Vorteile die auf einer Literaturanalyse von Henderson und Salado basieren aufgeführt /15/. Die Auswahl wird mit einem besonderen Mehrwert bezüglich der Produktentwicklung (Prozess) oder dem zu entwickelnden Produkt selbst begründet. Wichtige Vorteile von MBSE sind demnach /15/:

- Erhöhung der Produktqualität
- Wiederverwendung von Systemelementen
- Besseres Systemdesign und Systemarchitektur
- Umfängliche Bewertung von Änderungen und deren Auswirkungen
- Verbessertes Anforderungsmanagement (bspw. Stakeholderanalysen)
- Frühere Systemvalidierung und –verifikation
- Verbesserte Traceability (bspw. zwischen Design und Anforderungen)
- Bessere Fehleranalysefähigkeit
- Besserer Umgang mit Komplexität
- Umfangreiche Risikobewertung

Der in diesem Abschnitt dargestellte Mehrwert von SE und MBSE stellt nur eine Auswahl an möglichen Potentialen für die Entwicklung komplexer Produkte dar. Es soll an dieser Stelle jedoch auch erwähnt werden, dass die dargestellten Potentiale auf einer Analyse von etablierter Literatur basieren und diese mehrheitlich bisher nicht durch empirische Erkenntnisse belegt werden konnten /15/. Grundsätzlich ist jedoch festzustellen, dass mit ansteigender Produktkomplexität (z. B. aufgrund zunehmender Vernetzung) die Bedeutung von SE und MBSE zunimmt.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit MBSE bedarfsorientiert einzusetzen, um etablierte Entwicklungsaktivitäten zu unterstützen. Husung et al. führen hierzu den Nutzen von MBSE bezogen auf konkrete Entwicklungsaktivitäten auf /16/. Beispielhaft soll hier die Aktivität *Systemintegration planen* aufgegriffen werden. Die Aktivität umfasst die frühzeitige Festlegung der Integrationsstrategie, welche eine zentrale Tätigkeit für eine effiziente Systemintegration darstellt. Dem Einsatz von MBSE wird hierzu folgender Nutzen zugeschrieben:

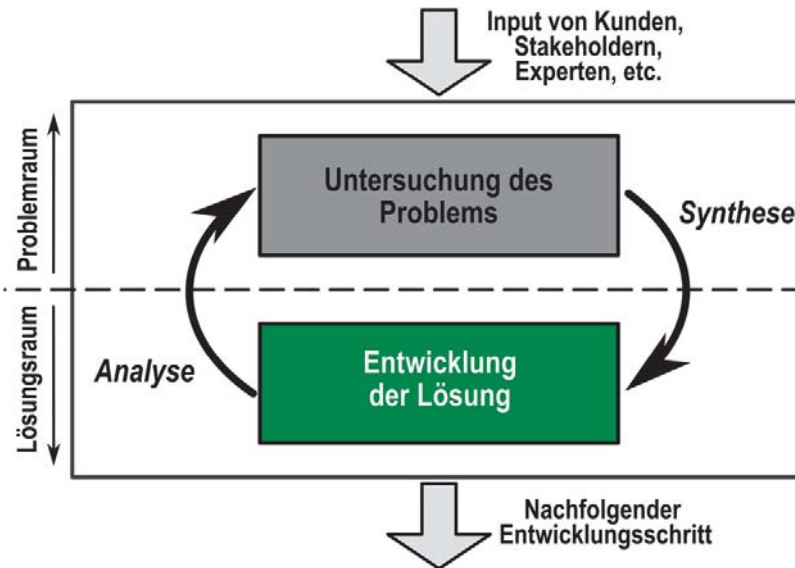
- Besserer Vergleich von Systemarchitekturalternativen
- Eindeutige Kontext- und Schnittstellendefinitionen der Systemelemente
- Reduzierung des Koordinationsaufwands
- Reduzierung von Fehlern und Inkompatibilitäten

Die Anwendung von MBSE kann somit sowohl als genereller Entwicklungsansatz als auch als bedarfsorientierte Unterstützung etablierter Entwicklungsaktivitäten einen Mehrwert für die Entwicklung komplexer Produkte bieten.

### Anwendung MBSE an einem elektromechanischen Wankstabilisator

Dieser Abschnitt soll einen Einblick in die Anwendung von MBSE anhand eines ausgewählten Anwendungsbeispiels geben. Hierzu wird die Modellierungssprache SysML (v1.5) unter Verwendung des Softwaretools Enterprise Architect von Sparx Systems eingesetzt. Als Anwendungsbeispiel dient der elektromechanische Wankstabilisator, welcher einerseits ein komplexes Produkt darstellt, jedoch einen überschaubaren Systemumfang aufweist und andererseits als Teilsystem des Fahrzeugchassis zentrale SE-Themenfelder wie Systemdekomposition und -integration adressiert.

Zur Strukturierung des Entwicklungsprozesses schlägt MBSE eine Trennung zwischen Problem- und Lösungsraum vor, siehe Abbildung 2. Indem die Problemklärung von der Lösungsentwicklung abgegrenzt wird, soll die Ermittlung eines umfangreichen Problemverständnisses gefördert werden.



**Abbildung 2:** Top Level Systems Engineering Prozess als Zyklus der Problemklärung und Lösungsermittlung, in Anlehnung an /17/

Übergeordnet kann ein MBSE-orientierter Entwicklungsprozess als ein sich wiederholender Zyklus von Problemuntersuchung und Lösungsentwicklung auf unterschiedlichen System- und Detaillierungsebenen betrachtet werden. Für die Anwendung von MBSE sollte dieser generische Prozess jedoch in weitere Prozessschritte zergliedert werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird dazu mindestens eine Unterscheidung in die folgenden sechs Entwicklungs- bzw. Modellierungsphasen vorgeschlagen, wobei die ersten drei Phasen den Problemraum und die letzten drei Phasen den Lösungsraum detaillieren, siehe Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Phasen der Systemmodellierung und deren Zielstellung

<b>Problem- / Lösungsraum</b>	<b>Modellierungsphase</b>	<b>Zielstellung</b>
Problemraum	Identifizierung und Modellierung des Systemkontextes	Identifizierung von Personen oder Systemen mit Anforderungen oder Erwartungen an das System
	Identifikation und Modellierung von Systemanwendungsfällen	Beschreibung des Systemzwecks anhand relevanter Anwendungsfälle
	Ermittlung und Modellierung der Stakeholder- und Systemanforderungen	Ermittlung und Dokumentation aller relevanten Stakeholder-Anforderungen und Überführung in Systemanforderungen
Lösungsraum	Entwicklung und Modellierung des Systemverhaltens	Erarbeitung einer funktionalen Systembeschreibung
	Entwicklung und Modellierung der Systemstruktur	Festlegung der Funktionsträger (Systembestandteile) inklusive deren Wechselwirkungen untereinander und zur Umwelt
	Vernetzung der Modellelemente	Vervollständigung und Visualisierung der Abhängigkeiten zwischen Modellelementen

Die dargestellten Phasen werden im folgendem kurz erläutert. Dazu werden zur Visualisierung SysML-Diagrammausschnitte des Wankstabilisator Systemmodells verwendet. Ein Diagramm stellt dabei eine spezifische Sicht auf das System aus der



Perspektive eines bestimmten Interessenstandpunktes (bspw. Entwicklungsdomäne und -tätigkeit) dar /18/.

### Phase 1: Identifizierung und Modellierung des Systemkontextes

Im Rahmen der Systemkontextmodellierung werden sämtliche Stakeholder und Systeme beschrieben, die mit dem zu entwickelnden System wechselwirken bzw. einen Einfluss haben. Dabei empfiehlt sich eine Unterscheidung in Systemumfeldmodellierung (technischer Kontext) und Stakeholdermodellierung (sozio-technischer Kontext). Ziel dieser Phase ist die Identifizierung von Personen oder Systemen die Anforderungen oder Erwartungen an das zu entwickelnde System haben. Die Abbildung 3 stellt dazu einen Ausschnitt aus dem Systemumfelddiagramm des elektromechanischen Wankstabilisators dar.

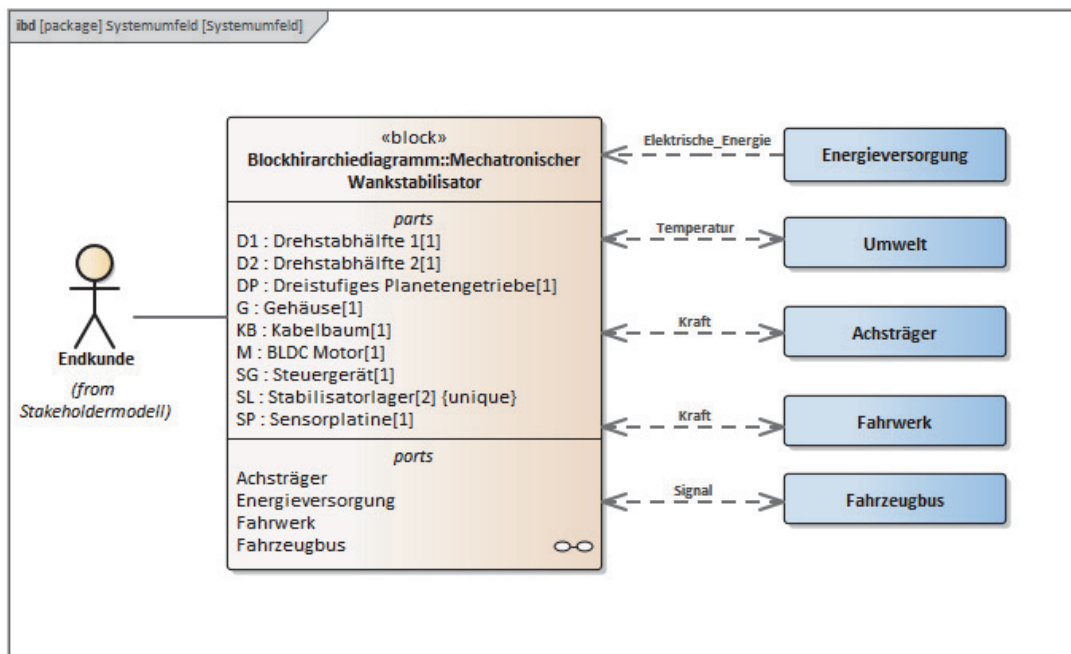
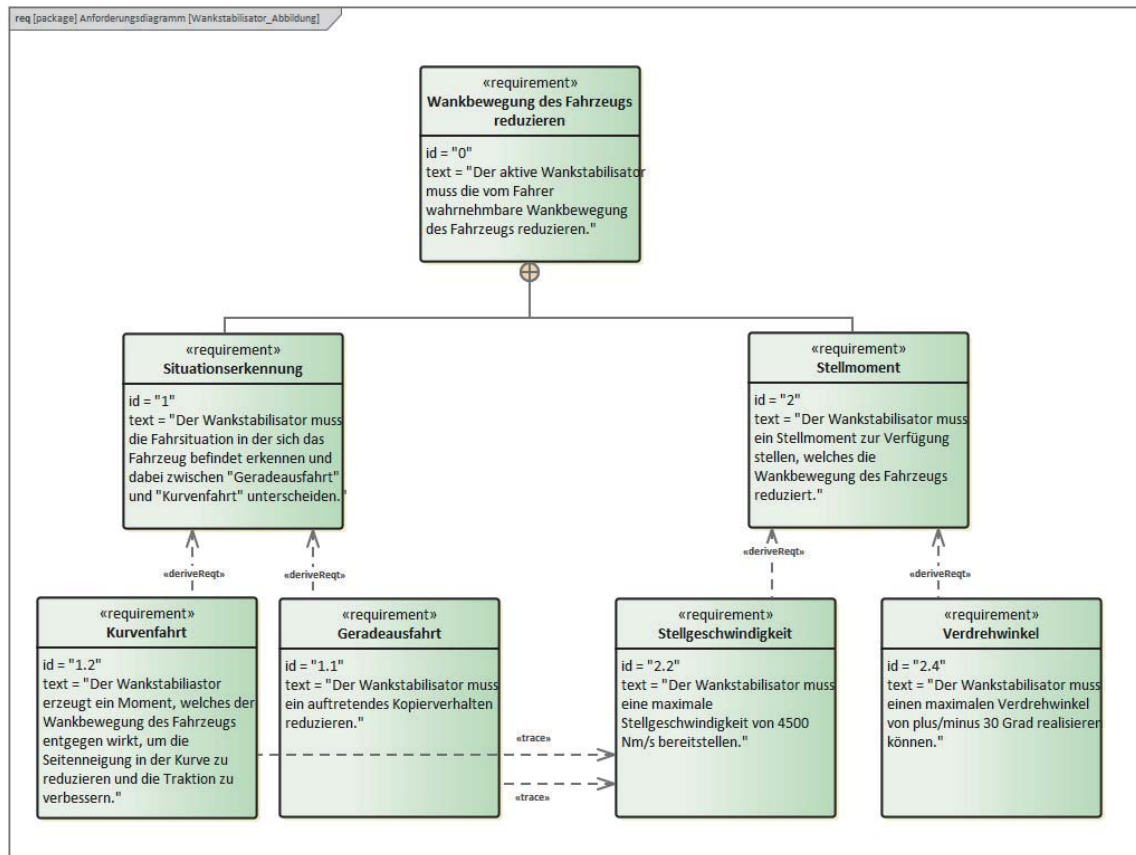


Abbildung 3: Systemumfelddiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

### Phase 2: Identifikation und Modellierung von Systemanwendungsfällen

Diese Phase dient der Beschreibung des Systemzwecks indem Anwendungsfälle, die das zu entwickelnde System im Verlauf des Lebenszyklus einnehmen kann, identifiziert werden, siehe Abbildung 4. Ein Anwendungsfall stellt dabei eine lösungsneutrale Beschreibung der Systemfunktionen dar und dient bspw. der Anforderungsanalyse.





**Abbildung 5:** Anforderungsdiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

#### Phase 4: Entwicklung und Modellierung des Systemverhaltens

Bevor die Festlegung des konkreten Systemsaufbaus erfolgt, sollte eine funktionale Systembeschreibung erarbeitet werden. MBSE verwendet dafür u. a. Aktivitätsdiagramme, siehe Abbildung 6, mit denen die einzelnen Aktionen bzw. Schritte, die das System durchläuft, in Form von Aktivitäten beschrieben werden. Dabei werden die einzelnen Aktivitäten üblicherweise in einem zeitlichen Ablauf dargestellt und möglichen Systemelementen zugewiesen (in Form von Schwimmbahnen). Außerdem werden die Objektflüsse (Energie, Information und Stoff), die zwischen den verschiedenen Aktivitäten fließen, modelliert.

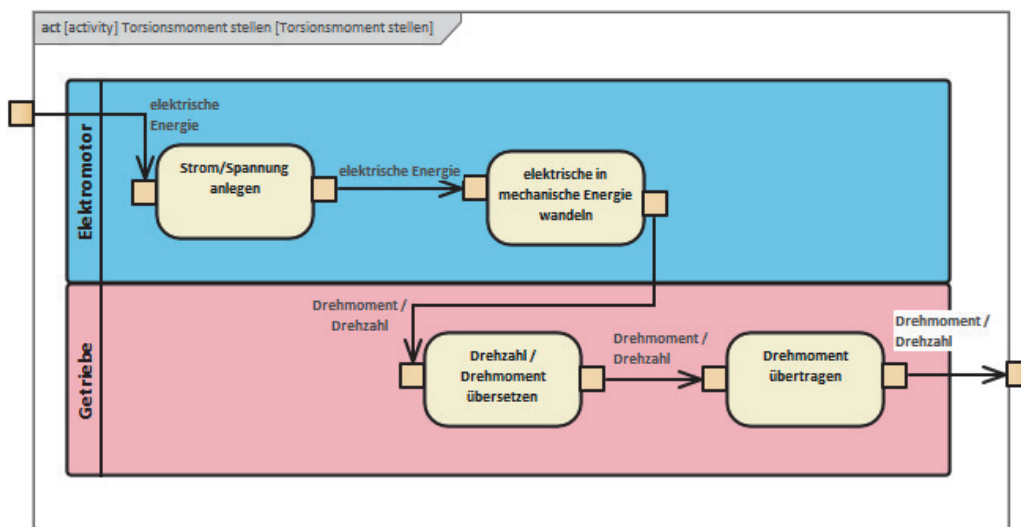


Abbildung 6: Aktivitätsdiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Das Aktivitätsdiagramm stellt in stark vereinfachter Form die einzelnen Aktionen und deren Objektflüsse zwischen einander und zur Umwelt dar, die zur Beschreibung der Aktivität *Torsionsmoment stellen* benötigt werden.

**Phase 5: Entwicklung und Modellierung der Systemstruktur**

Ausgehend von dem Systemverhalten erfolgt anschließend, im Rahmen des Architekturentwicklungsprozesses /19/, die Festlegung der Funktionsträger (Systemelemente) des Systems. Die Strukturmodellierung verknüpft die Systemelemente einerseits hierarchisch und andererseits bildet es die interne Systemstruktur ab, siehe Abbildung 7.

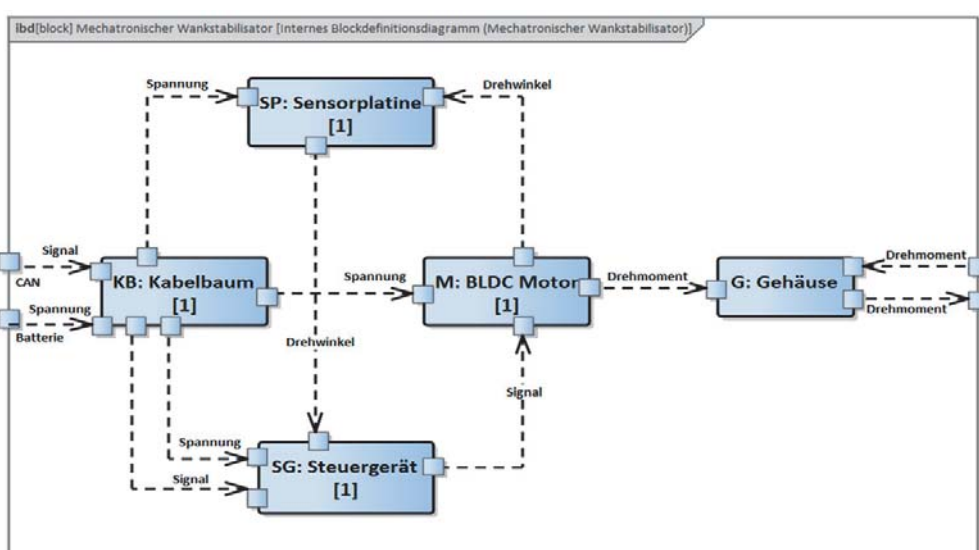
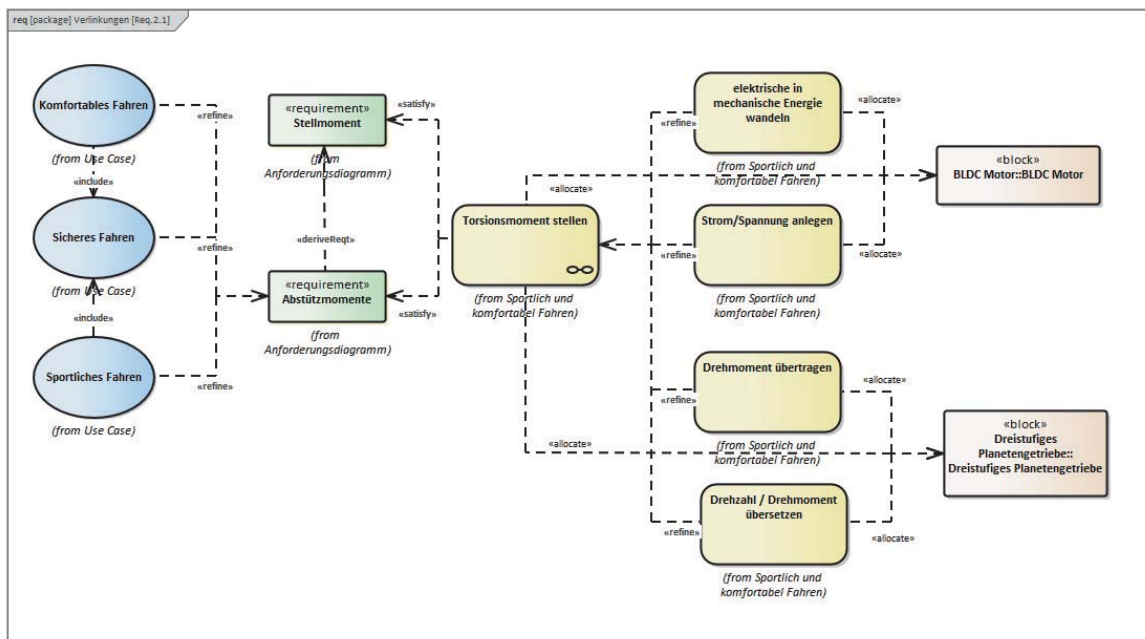


Abbildung 7: Systemstrukturdiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Hierbei wird das Ziel verfolgt, die Systembestandteile inklusive deren Wechselwirkungen untereinander und zur Umwelt darzustellen. Außerdem können die Systemelemente anhand von Parametern detailliert spezifiziert werden.

### Phase 6: Vernetzung der Modellelemente

Zielstellung von MBSE ist es alle relevanten Zusammenhänge in einem übergeordneten Systemmodell abzubilden. Hierzu sind insbesondere die Beziehungen zwischen Anforderungen und dem Systemverhalten sowie der Systemstruktur relevant. Der Zweck dieser Modellierungsphase ist die Vernetzung der verschiedenen Modellelemente zu überprüfen und zu vervollständigen. Grundsätzlich sollten sich die verschiedenen Modellbeziehungen bereits im Verlauf der durchgeführten Modellierungsphasen entwickeln. Die Abbildung 8 stellt beispielhaft ein Traceabilitydiagramm dar, welches insbesondere die Verknüpfungen zwischen heterogenen Modellelementen (bspw. Anforderungen, Aktivitäten und Systemelemente) fokussiert. Hierdurch ist es beispielsweise möglich nachzuvollziehen, welche Systemanforderung durch welches Systemelement realisiert wurde.



**Abbildung 8:** Traceabilitydiagramm am Beispiel Wankstabilisator (Ausschnitt)

Ein wesentlicher Vorteil der durchgängigen Vernetzung der Modellelemente ist die Durchführung von Analysen. Dazu werden die relevanten Informationen aus dem Systemmodell, üblicherweise in Matrizenform, ausgeleitet. Somit kann bspw. geprüft werden, ob die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Anforderungen im Design berücksichtigt wurden, oder welche Systemelemente zwingend für die Erfüllung der Systemfunktionen erforderlich sind.

## Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag führt in das modellbasierte Systems Engineering, als ein Ansatz zur besseren Handhabung von Komplexität in der Produktentwicklung, ein. Dabei legt MBSE einen besonderen Wert auf die erfolgreiche Kollaboration unterschiedlicher Entwicklungsdisziplinen indem disziplinübergreifende Modelle als zentrales Verständigungs- und Informationsmedium eingesetzt werden. Da die Anwendung von MBSE in der industriellen Praxis als sehr heterogen eingeschätzt werden kann, wurde der Nutzen von MBSE, basierend auf etablierten Literaturquellen, dargestellt. Um einen Einblick in die Anwendung von MBSE zu gegeben, wurde anschließend eine Vorgehensweise zur durchgängigen Systemmodellierung, anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels, vorgeschlagen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollen sich insbesondere auf die Schnittstelle zwischen disziplinübergreifender und disziplinspezifischer Entwicklung konzentrieren, da diese Schnittstelle zum heutigen Zeitpunkt aufgrund Informationsverlust und Modellinkonsistenzen eine wesentliche Fehlerquelle in der Entwicklung komplexer Produkte darstellt. Weitere Aktivitäten im Rahmen der systemorientierten Entwicklung sind die Integration von SE-Prinzipien und Vorgehensweisen in Lehrveranstaltungen, die modellbasierte Beschreibung heterogener Teilsysteme inklusive der Betrachtung von Degradationsverhalten einzelner Teilsysteme (physikalische Leistungsfähigkeit) und die modellbasierte Analyse potentieller Systemstörgrößen für die Erarbeitung robuster Designkonzepte in frühen Entwicklungsphasen.

## 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/ Ulrich, H., Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte. 4. Aufl., Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 1995
- /2/ Eisner, H.: Essentials of Project and Systems Engineering Management, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2008
- /3/ Eigner, M. et al.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Springer-Verlag, S.5, Heidelberg, 2014
- /4/ Kattner, N. et al.: Inconsistency management in heterogeneous models – an approach for the identification of model dependencies and potential inconsistencies, ICED 19, Delft, 2019
- /5/ Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML, Carl Hanser, München, 2012

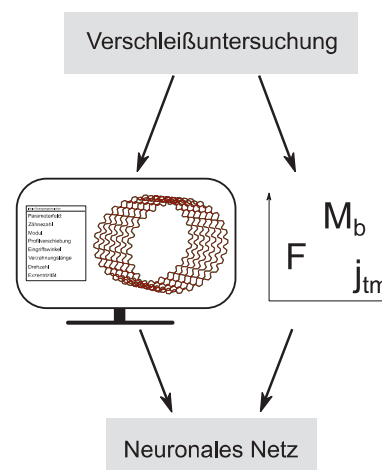
- /6/ Lohmeyer, Q., Albers, A.: Advanced systems engineering - Towards a model-based and human-centered methodology, Int. Sym. on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE, 2012
- /7/ Inkermann, D.: Shaping Method Ecosystems – Structured Implementation of Systems Engineering in Industrial Practice, ICED21, Gothenburg, 2021, <https://doi.org/10.1017/pds.2021.525>
- /8/ Friedenthal, S. et al.: A Practical Guide to SysML, MK/OMG Press, S. 17, 18, Amsterdam, 2015
- /9/ Morkevicius, A. et al.: MBSE Grid: A Simplified SysML-Based Approach for Modeling Complex Systems, 27th Annual INCOSE International Symposium, Adelaide, 2017
- /10/ International Council on Systems Engineering: INCOSE Systems Engineering Handbuch, Wiley & Sons, Inc., S. 9, 16, Hoboken, 2015
- /11/ Gausemeier, J. et al.: Systems Engineering in der industriellen Praxis, S. 48 – 50, Paderborn, 2013
- /12/ Bretz L. et al.: An analysis of barriers for the introduction of Systems Engineering, 29<sup>th</sup> CIRP Design, Póvoa de Varzim, 2019
- /13/ Huldt, T., Stenius, I.: State-of-practice survey of model-based systems engineering, Systems Engineering, 2018, <https://doi.org/10.1002/sys.21466>
- /14/ Martin, J.: Systems Engineering Guidebook: A Process for Developing Systems and Products, CRC-Press, S. 5 – 6, London, 1996
- /15/ Henderson, K., Salado, A.: Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature, Wiley, Systems Engineering, 2020, DOI: 10.1002/sys.21566
- /16/ Husung, S. et al.: Using model-based Systems Engineering for need-based and consistent support of the design process, ICED 21, Gothenburg, 2021, DOI:10.1017/pds.2021.598
- /17/ Bonnema, G., Broenink, J.: Thinking Tracks for Multidisciplinary System Design, MDPI, Basel, 2016, DOI: 10.3390/systems4040036
- /18/ Schumacher, T., Inkermann D.: Heterogene Modellierung - Verknüpfung und Integration von Systemmodellen der SysML mit CAD-Modellen, 32. DfX-Symposium, München, 2021, DOI: 10.35199/dfx2021.20
- /19/ Schumacher T., Inkermann D.: Herausforderungen und Anforderungen bei der durchgängigen Architekturmodellierung mechatronischer Systeme, 31. DfX-Symposium, Erlangen, 2020, DOI: 10.35199/dfx2020.6

## Verschleißschätzer: Ideale Bewegungssimulation einer evolventischen Zahnwellen Verbindung

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.

*Am Institut für Maschinenwesen entsteht ein stand-alone fähiger Rechenkern zur Berechnung des idealen kinematischen Kontaktes zwischen Welle und Nabe. Dieser Rechenkern soll im Zusammenhang mit Versuchsergebnissen dazu dienen, die Parameter Vielfalt des Verschleißproblems bei evolventischen Welle Nabe Verbindungen zu reduzieren. In diesem Artikel werden die ersten Ergebnisse sowie die Idee des Rechenkerns aufgezeigt.*

*The Institute for Mechanical Engineering works for a stand-alone calculation kernel, which calculates the ideal kinematic contact between shaft and hub connections. The calculation kernel and experimental result should help to reduce the variety of parameters of the abrasive problem. This article shows the first results and ideas behind.*



### Einleitung

Für Aufgaben der Übertragung von Drehmomenten sowie Kräften mit gleichzeitiger axialer Verschiebbarkeit sind Welle-Nabe-Verbindungen mit evolventischen Profilen ein hervorragender Verbindungstyp. Für die Zahnwellenverbindung existieren -trotz des bereits fortgeschrittenen historischen Alters, nach wie vor Fragestellungen hinsichtlich der Festigkeit sowie des Verschleißes. Insbesondere für den Bereich der Verschleißbetrachtung wird am IMW eine neue Vorgehensweise zur Abschätzung des Verschleißes evaluiert. Hierbei sollen mit Hilfe von neuronalen Netzen und einem Verbund aus *empirischen* sowie *synthetischen Daten* ein Informationspool aufgebaut werden, welcher genauere Aussagen hinsichtlich der Verschleißcharakteristik von Zahnwellenverbindungen ermöglichen soll.

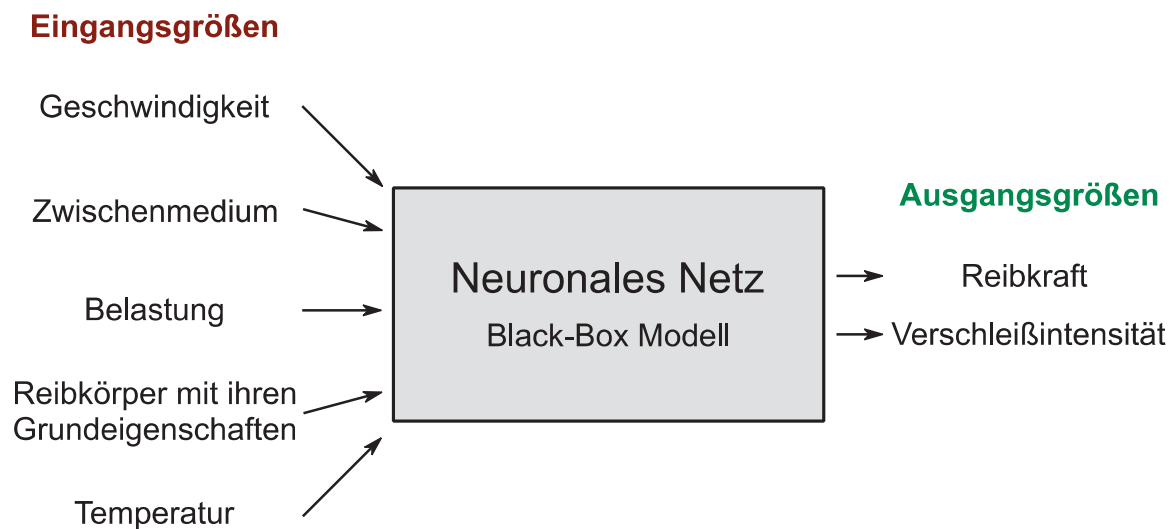
### Ausgangssituation

Die Beschreibung des Festkörperverschleißes lässt sich nach /1/ in drei Bestandteile einteilen, den *Eingangsfaktoren*, *Inneren Faktoren* und den *Ausgangsfaktoren*. Die *inneren Faktoren* werden durch verschiedene messtechnisch schwer zu erfassenden Größen definiert, wie beispielsweise „Veränderung der mechanischen Eigenschaften“ oder auch „Veränderung der Rauheit“. Mit Hilfe von neuronalen Netzen ist es möglich, für hochgradig nichtlineare Zusammenhänge Black-Box



Modelle zu erstellen. Grundsätzlich sollte die Problematik des Verschleißes mit Ansätzen der neuronalen Netze lösbar sein. Dabei wurde die Idee gefasst, die *Eingangsfaktoren* sowie die *Ausgangsfaktoren* des Wechselwirkmodells von /1/ als Informationspool für die Beschreibung der Verschleißcharakteristik aufzustellen und diese für das neuronale Netz aufzunehmen.

Die *Eingangsfaktoren* und *Ausgangsfaktoren* sind nachfolgenden in Abbildung 1 festgehalten.



**Abbildung 1:** Grundlegende Modellvorstellung (Faktoren nach /1/)

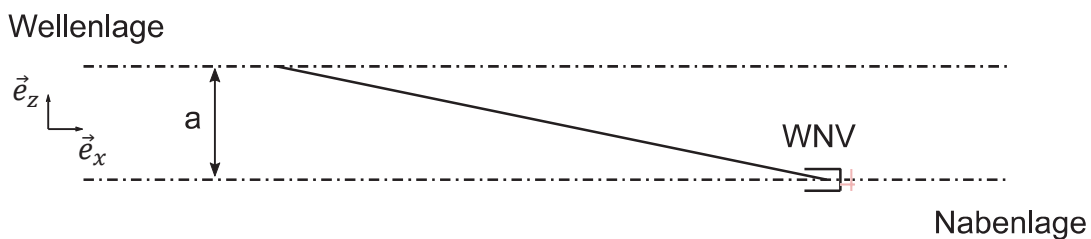
Für diesen Artikel ist die Netzarchitektur sowie der Netztyp für das neuronale Netz nicht von belangen. In diesem Rahmen wird sich auf die *synthetische Datenbeschaffung* für das *neuronale Netz* konzentriert.

Neben den grundsätzlichen experimentellen Daten, welche bei Untersuchungen von Maschinenelementen entstehen, sollen speziell für die evolventischen Welle-Nabe-Verbindungen eine *Datenreduktion* mit Hilfe eines idealen Berechnungsmoduls geschaffen werden. Dazu soll die Datenvielfalt für das neuronale Netz reduziert und so der benötigte Prüfaufwand reduziert werden. Dabei wird mit Hilfe eines idealen Berechnungsmodells die *Einflussfaktoren* der *Geschwindigkeit*, *Weg* sowie im übertragbaren Sinne die *Belastungen* synthetisch erzeugbar gemacht werden.

## Betriebssituation von Welle-Nabe-Verbindungen

Eine ideale Achs- sowie Winkelausrichtung von Welle und Nabe findet in der Praxis nicht statt. Diese Fehlausrichtung führt zu parasitären Zusatzbelastungen in der Verzahnung. Es wird kurz auf diese Zusatzbelastung der Welle-Nabe-Verbindung eingegangen.

Bei einer fehlerhaften Achsausrichtung folgt eine dynamische Auslenkung der Welle-Nabe-Verbindung in eine Richtung. Diese Auslenkung hat zur Folge, dass die Verzahnung der Welle eine „*Kippbewegung*“ in der Nabe durchführt, welche wiederum zu einer erhöhten Flächenpressung im örtlichen Kontakt des Verzahnungsanfanges sowie des Verzahnungsendes führt (im Bereich WNV).

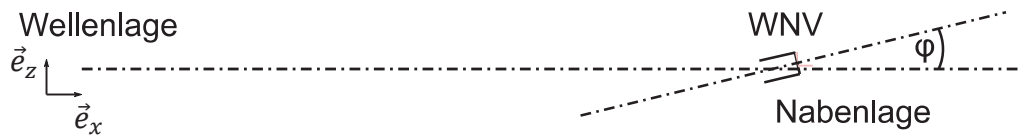


**Abbildung 2:** Achsausrichtungsfehler

Die Abbildung 2 verdeutlicht die Zusammenhänge der „*Kippbewegung*“ im übertriebenen Charakter. Die obere Symmetrielinie definiert die Wellenlage, während die untere die Nabenlage definiert. Dazwischen ist die Welle-Nabe Verbindung (durch WNV gekennzeichnet), hier befindet sich der Kontaktbereich. Durch die Auslenkung  $a$  ist ein Winkelversatz über die Wellenlänge definiert. Dabei kann die Auslenkung nicht nur statisch sein, sie kann in dem Zusammenhang auch dynamisch im Kreis oszillieren.

Die Bewegung hat die Eigenheit, dass der örtliche Kontakt am Verzahnungsanfang / -ende der Welle, sofern es die technischen Umstände zulassen, einen leichte Axial- sowie eine Radialbewegung durchführen. Zusätzlich werden die Pressungen aufgrund der Geometrieüberlagerung erhöht. Dadurch entstehen je nach Steifigkeit der Welle sowie Nabe zusätzliche Beanspruchungen im Kontakt.

Neben der Fehlausrichtung über die Achslage können Winkelfehlstellungen der Welle und Nabe zu erhöhten Beanspruchungen führen.



**Abbildung 3:** Winkelfehlstellung

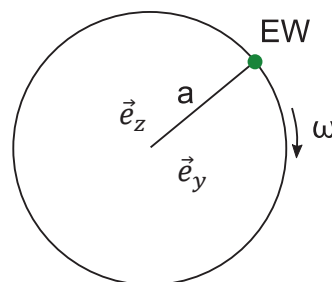
In der Abbildung 3 ist die Winkelfehlstellung beispielhaft mit dem Fehlerwinkel  $\varphi$  dargestellt. Die jeweiligen Symmetrielinien bilden die Winkelausrichtung der Wellen- sowie Nabenlage ab. Durch diese Fehlausrichtung wird je nach Anwendung eine statische oder dynamische, der Abbildung entsprechende, Auslenkung erzeugt.

Diese Fehlausrichtung führt wie bei der Achsverlagerung zu den gleichen Aufschlagsbeanspruchungen am Verzahnungsanfang und -ende. An dieser Stelle findet die Bewegung von der Nabe aus statt.

Beide dieser zusätzlichen Beanspruchungen können sich überlagern und müssen so kombinatorisch betrachtet werden. Dennoch sind die Wirkprinzipien die gleichen und erfordern ausschließlich das Modellieren einer dieser Bewegungen.

### Modell zur Datenreduktion

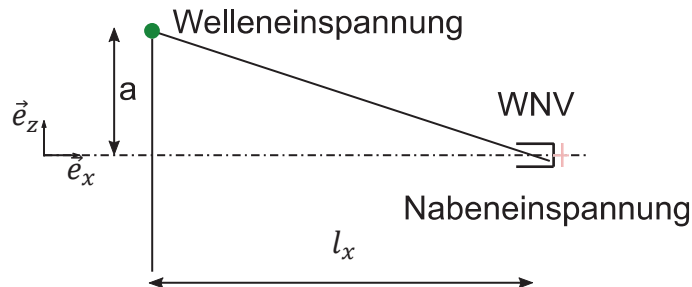
Die Grundidee beschäftigt sich mit dem Aufbau eines kinematischen Idealmodells und umfasst mögliche Betriebsmodi unter verschiedenen Randbedingungen der Welle-Nabe-Verbindung. Dazu wurde für den rechnerischen Entwurf folgende Idealvorstellung als Randbedingung in die Berechnungsumgebung eingepflegt.



**Abbildung 4:** Digitaler Prüfstand – Axialansicht

In der Abbildung 4 ist eine Auslenkung  $a$ , eine Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  sowie die Einspannung der Welle EW zu erkennen. Die Einspannung der Welle (EW) rotiert mit der Geschwindigkeit  $\omega$  um die ideale Ausrichtung von Nabe zu Welle. Diese Modellierung entspricht der dynamischen Bewegung aus der Abbildung 2 und kann

wie in der Bewegungsanalyse festgestellt worden ist, auch für die Winkelfehlstellung verwendet werden.

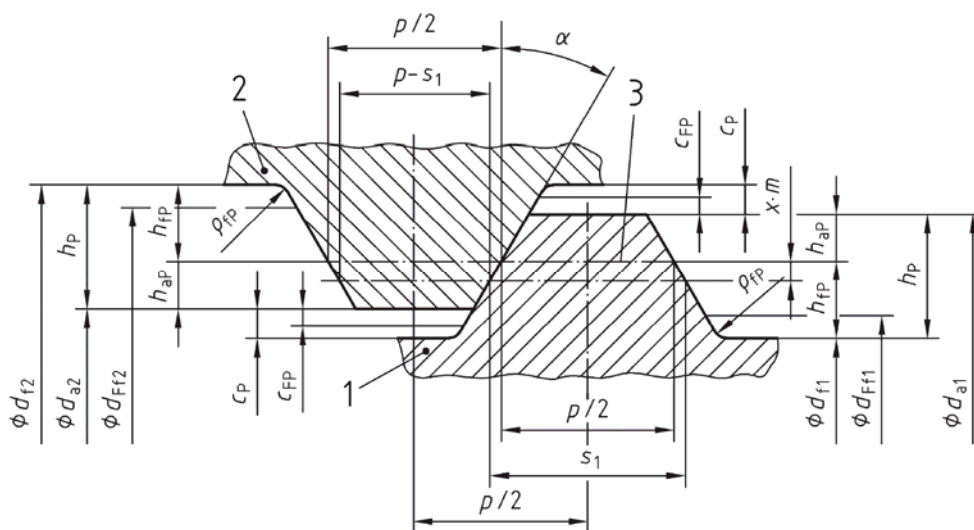


**Abbildung 5:** Digitaler Prüfstand – Seitenansicht

Die Seitenansicht aus Abbildung 5 zeigt die gesamte modellierte Bewegung. Einzustellen sind alle abgebildeten Größen der Modellierung, sodass eine spezifizierte Bewegung ermöglicht wird. Es können neben statischen Werten auch dynamische Zeitverläufe als Bewegung festgelegt werden (z. B.  $a(t)$  o. ä.) Neben diesen Bestandteilen ist es ebenso möglich verschiedene Punktbewegungen auf die Einspannungen zu setzen, sodass überlagerte Bewegungen abbildbar sind.

### Welle-Nabe-Geometrie

Als Verbindungsgeometrie für die WNV wurde eine Verzahnung nach DIN 5480 gewählt, diese ist nachfolgend in Abbildung 6 mit allen Details der Verbindung dargestellt. In diesem Zusammenhang wird nicht auf die Erzeugung der Punktwolke eingegangen, sondern nur die verwendete Geometrie aufgezeigt.



**Abbildung 6:** Bezugsprofil nach DIN 5480 /2/

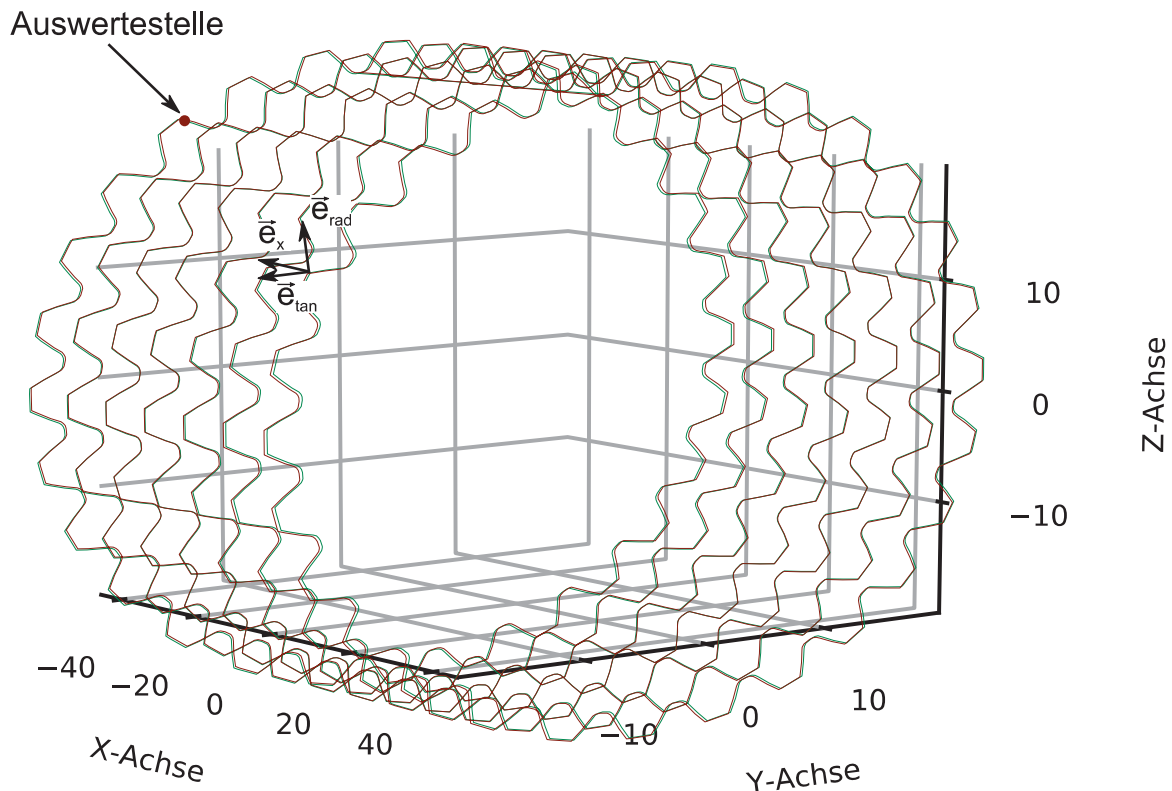
Die abgebildete Geometrie wurde modular erzeugbar in dem erstellten Rechenkern implementiert, dadurch ist es nun möglich, nicht nur verschiedene Prüfbedingungen zu überprüfen, sondern auch die verschiedenen Verzahnungen und deren Einflüsse mit abzubilden. Es wurde die flankenzentrierte Idealgeometrie der DIN 5480 als Grundlage gewählt.

### Ergebnisse des Rechenkerns

Für die nachfolgenden Berechnungen wurde eine Verzahnung nach DIN 5480 – A 60 x 2 x 28 ohne Toleranzen ausgeführt. Die Verzahnung wurde dem Rechenkern mit folgenden Randdaten übergeben:

- Auslenkung  $a = 2 \text{ mm}$
- Einspannungslänge  $l_x = 300 \text{ mm}$
- Prüffrequenz  $f = 7 \text{ Hz}$

In der nachfolgenden Abbildung 7 ist die genannte Verzahnung in 7 Schichten modelliert. Diese Schichten ermöglichen es, *Geschwindigkeitsprofile*, *Strecken* oder auch *Überlappungen* der Verzahnungen über die Verzahnungslänge, an definierten Stellen, zu ermitteln. Diese *Überlappungen* stellen Faktoren zur Beanspruchungsüberhöhung dar. Die Achsen des kartesischen Koordinatensystems aus der Abbildung geben die Geometrie in Millimetern an und bilden daneben die eingeführten Koordinatensysteme aus den vorherigen Abbildungen ab. Die **grüne Punktwolke / Linien** entspricht der Welle, während die **rote Punktwolke / Linien** die Nabe abbildet.



**Abbildung 7:** Verzahnung – DIN 5480 – A 60 x 2 x 28

Mit Hilfe der schichtweisen Analysemöglichkeit können nun beispielsweise die *Verschiebungen* der Verzahnung in den Verzahnungsschichten ermittelt werden. In diesem Beispiel wurde die Auswertung am Verzahnungsanfang (rote Markierung - Abbildung 7) gesetzt.

Für die Berechnung wurde an der Flanke der Geometrie ein weiteres Koordinatensystem eingeführt. Dieses befindet sich normal ausgerichtet auf der Zahnflanke der Nabe (stehendes Koordinatensystem – roter Verlauf) an der Auswertestelle. In dem dargestellten Beispiel ist das eingeführte Koordinatensystem demonstrativ an einer anderen Stelle eingezeichnet. Die Bewegung findet mit der grünen Wellengeometrie statt.

Die relative Bewegung wird zwischen der Nabe und der Welle entsprechend des Koordinatensystems aufgezeichnet und abbildbar gemacht. Diese Berechnungen sind ausschließlich ideale Bewegungen und bilden in diesem Zusammenhang die Kinematik ab. Übergeben wird nach der Berechnung ein Parametersatz aus drei Größen:

- Maximale Überlappung
- Maximale Geschwindigkeit
- Maximale Strecke

Diese Größen definieren einen Punkt in der Verzahnung und können so für das neuronale Netz als Eingangsdaten dienen.

Durch diesen Ansatz kann nun eine Parameterreduktion erreicht werden. Dazu werden alle wichtigen geometrisch definierenden Größen der Verzahnung in dem Berechnungstool verrechnet und auch die Einflüsse der Einbaubedingungen mitberücksichtigt.

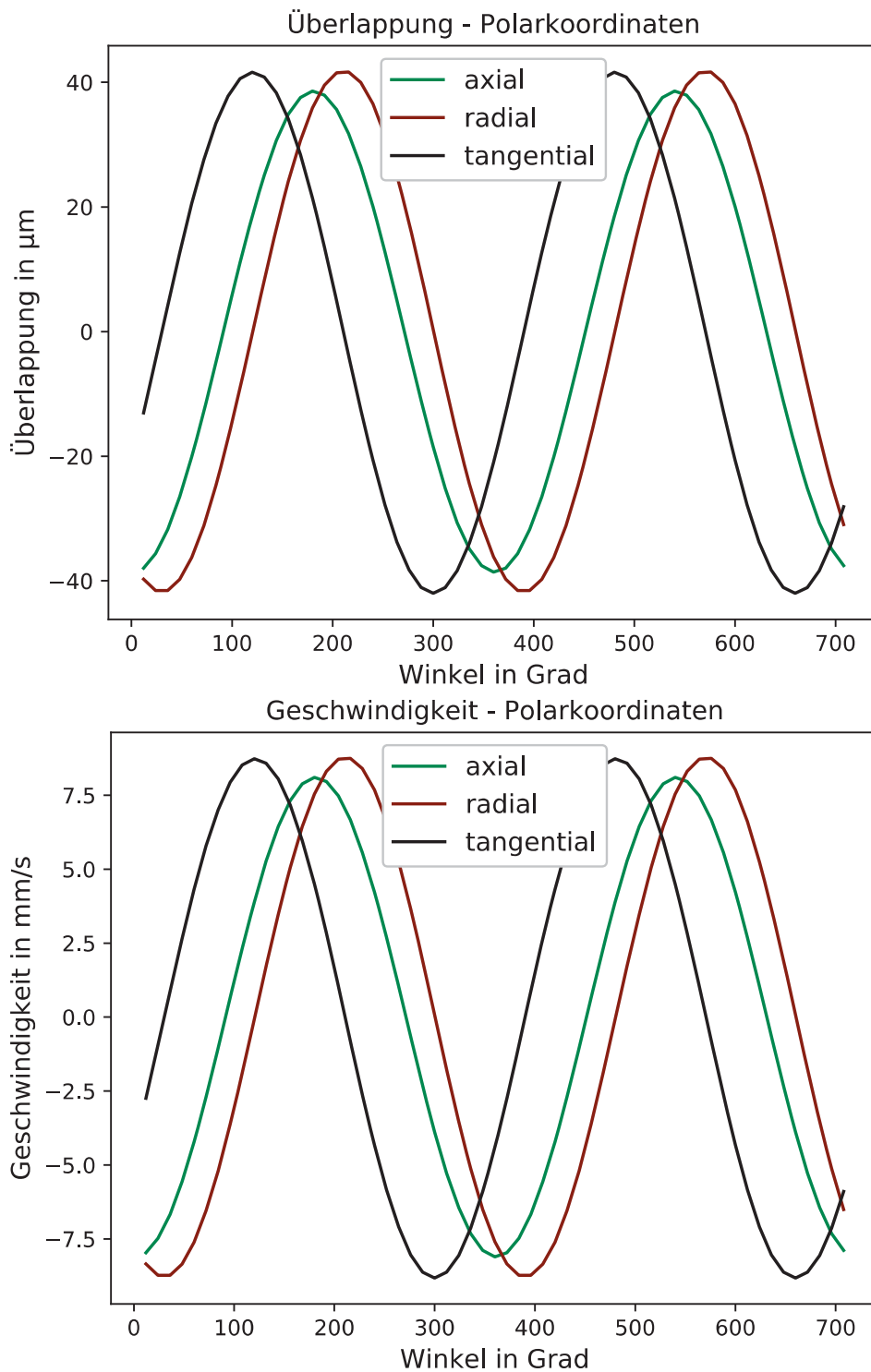
**Tabelle 1:** Parameterreduktion

Normalverrechnung	Verrechnungsmodell
Modul	Überlappung (radial)
Zähnezahl	Geschwindigkeit (tangential)
Verzahnungslänge	Strecke (tangential)
Eingriffswinkel	
Exzentrizität	
Drehzahl	

Es konnte so eine Parameterreduktion um 50 % geschaffen werden, dies ermöglicht ein einfacheres Anlernen des neuronalen Netzes in den weiteren Schritten. Die inhaltlichen Aussagen der Eingabegrößen für das neuronale Netz sollen dabei mit Hilfe der Überlappung eine quantitative Größe der Pressungsüberhöhung darstellen. Diese Aussage gilt hier für den Fall einer elastischen Verformung, da hier mit linearen Verhaltensweisen zu rechnen ist. Die Geschwindigkeit ist in Kombination mit der Punkteüberlagerung ein Belastungsfaktor für den Kontakt und soll in diesem Zusammenhang als die *Reibkraft* des in Abbildung 1 vorgestellten Modells vergleichbar sein. Die Verschleißintensität ist informativ mit Hilfe der *Reibkraft* und der zurückgelegten *Strecke* aus dem Berechnungsmodell nachmodellierbar. So soll mit dem Berechnungsmodell eine Grundlage zu einem vereinfachten Aufbau eines Berechnungsmodells zum Verschleißfortschritt in der Verbindung gefunden werden. Die Berechnungen berufen sich auf folgende Grundformel:

$$W_r = \int_{s_0}^{s_1} F_N \cdot \mu \cdot ds \quad (1)$$

Mit den Grundgrößen der Normalkraft  $F_N$ , Reibkoeffizient  $\mu$  und der zurückgelegten inkrementellen Strecke  $ds$ .



**Abbildung 8:** Verschiebungen und Punktgeschwindigkeit der idealen Geometrie

Durch den programmtechnischen Aufbau können Sonderkonfigurationen der Verzahnung erstellt werden, sodass die Bewegungseinflüsse der modifizierten



Verzahnung mitberücksichtigt werden können. Eine Zusammenstellung verschiedener geometrischer einflussnehmender Grundgrößen ist nachfolgend in Abbildung 9 dargestellt. Der Aufbau der Geometrie erfolgt immer im nicht modifizierten Rahmen der DIN 5480, allerdings sind normübergreifende Modifikationen möglich, wie sie in der Abbildung 9 gezeigt sind.



**Abbildung 9:** Verschiedene Geometrien – Modellierungsgrundlage der DIN 5480

Dadurch wird ein weiterer Vorteil der analytischen Vorgehensweise klar. Während für jede Geometrie gesondert Versuche für das neuronale Netz ermittelt werden müssten, können mit diesem Ansatz die diversen Modifikationen in die bereits erwähnten Parameter übertragen werden.

## Einordnung

Die erstellten Ergebnisse sollen in diesem Zusammenhang zur Parameterreduktion beitragen und ein besseres Modellabbild bei geringerer Versuchsanzahl ermöglichen. Dazu ist es wichtig, die relevanten Parameter des Verschleißkontaktes eingrenzen zu können. In Abbildung 1 wurden diese relevante Parameter des Festkörperverschleißes eingeführt. Mit dem erläuterten Ansatz ist es möglich, die Bestandteile der *Reibkraft* und der *Verschleißintensität* mit Hilfe des idealen Modellabbildes bezüglich diverser Modifikationen verhältnismäßig abschätzen zu können. Dies beruht auf die Präprozess Bestandteile beim Anlernen von neuronalen Netzen. Während des Präprozess werden die Eingabegrößen normiert, dies führt dazu das verhältnismäßige Zusammenhänge als Informationsgrundlage übergeben werden. Die inneren funktionellen Zusammenhänge der quantitativen Auswirkungen gilt es dann mit dem neuronalen Netz sowie den empirischen Daten aus dem Versuch zu ermitteln.

Bisherige Rechenansätze zur Verschleißberechnung aus /3/ nutzten in der Vergangenheit keine Relativgeschwindigkeiten bei der Beschreibung des Verschleißes. Neben den Ansätzen aus /3/ liegen auch Berechnungsansätze aus den Arbeiten von /4/ vor. Diese behandeln auf Basis molekular-mechanische Theorien lineare Rechenansätze zur Beschreibung des Verschleißfortschrittes (Verschleißtieflängenberechnung) auf Grundlage der *Exzentrizität* und des einhergehenden *Verschleißweges*. In der Arbeit /5/ wird allerdings abschließend gesagt, dass auch mit Hinblick der Exzentrizität nicht alle Untersuchungen abgeschlossen sind und somit noch nicht der Einfluss der Exzentrizität auf den möglichen Verschleißweg gegeben ist. Da hier verschiedene Belastungssituationen zu andere Bewegungsfreiheiten führen. Unberücksichtigt bleiben bei der Behandlung ebenso die „*Kippbewegung*“ im Kontakt.

Mit dem Rechenansatz über neuronale Netze sollen die bisher vernachlässigten Berechnungen mit in der Modellierung berücksichtigt werden. Weiter können durch die Einbindung einer Toleranztable in das Berechnungsmodul die mittleren *Überlagerungs Minderungs- / Vergrößerungseffekte* berücksichtigt oder resultierende Exzentrizität /5/ abgeleitet werden.

Aus diesen Gründen wurde es am IMW als sinnvoll erachtet, ein Berechnungsmodul zu programmieren, welches Kinematik und Toleranzen bündelt, umso eine breitere Wissensbasis über den Kontaktbereich einer zuvor definierten Verbindung zu schaffen. Diese Informationen sollen dann für ein neuronales Netz die linearen und nichtlinearen Verhaltensweisen einer Verbindung abbildbar machen können.

Dieses Vorgehen wird sobald praktisch am Institut umgesetzt.

## Literatur

- /1/ Kragelski, V.; Dobycin, M.; Kombalov, V.: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß. In: VEB Verlag Technik Berlin, 1977, ISBN: 3446136193
- /2/ DIN 5480-1 – Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser, Deutsche Norm, März 2006
- /3/ Lorsch, G.: Tragfähigkeit von Evolventenzahn-Verbindungen, Maschinenbautechnik 29 (1980), S.257-259
- /4/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal, August 1986
- /5/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal, November 1995

## Towards a Design for Acoustics (DFAc) Methodology

Inkermann, D.; Lohrengel, A.

*Handling of acoustic properties of products are of increasing relevance in product development. Compared to other properties like weight or manufacturability, acoustics presents a complex property relevant in the use phase of a product and affected by the actual operation conditions. In order to support determination, evaluation and optimization of acoustic properties in early design stages in this contribution fundamentals for a Design for Acoustic methodology are outlined. Therefore, basic elements of DFX methodologies and the evolution of the Design for Manufacture methodology are described. Against this background premises and fields of research are defined to establish a Design for Acoustics methodology.*



*Die akustischen Eigenschaften gewinnen in der Produktentwicklung zunehmend an Bedeutung. Im Vergleich zu anderen Eigenschaften wie Gewicht oder Herstellbarkeit sind diese Eigenschaften komplex und insbesondere in der Nutzungsphase eines Produkts relevant. Gleichzeitig werden die Eigenschaften durch die tatsächlichen Betriebsbedingungen beeinflusst. Um die Ermittlung, Bewertung und Optimierung akustischer Eigenschaften in frühen Entwurfsphasen zu unterstützen, werden in diesem Beitrag Grundlagen für eine Design for Acoustics Methodik skizziert. Zunächst werden grundlegende Elemente von DFX Methodiken und die Entwicklung der Design-for-Manufacturing Methodik beschrieben. Ausgehend hiervon werden Prämissen und Forschungsfelder definiert, um eine Design for Acoustics Methodik zu etablieren.*

### Introduction

Discomforts of noise in our environment are frequently associated with insufficient design of products and systems. Despite the increasing relevance of acoustic properties, designers are challenged since they have to consider and fulfil other product properties like reliability, costs or weight in the product development (PD) process. This challenge is frequently caused by physical conflicts hindering to fulfil all product properties at the same time and the different product models needed to represent and evaluate the properties. Approaches of low noise design (Lärmarmes Konstruieren) /1, 2/ support designers by providing measures to reduce sound stimulation, transmission, and radiation. In literature different methods and tools to facilitate identification, evaluation, and modification of acoustics properties within the PD process can be found. Aside from experimental and numerical methods, the

importance of expert knowledge is highlighted, in particular to support decision-making early design stages e.g. /3/. With regard to design practice there are frequently challenges to meet acoustic requirements and fulfil additional required properties like weight but also to be efficient with regard to engineering time. In this contribution challenges of handling acoustic properties are discussed from an engineering design perspective. Fundamentals and research of Design for X methodologies are introduced and fields of research towards a Design for Acoustic (DFAc) methodology are discussed.

### ***Acoustic Properties as Complex Product Properties***

Following the design theory of Weber, properties describe the behaviour of a product like weight, safety, reliability or manufacturability /4/. From the designers point of view these properties cannot be influenced directly but have to be determined indirectly by characteristics like dimensions, material or the structure of a design solution. Acoustic has to be seen as a complex product property for two reasons. First there is not only one property characterising the acoustic behaviour. The perceived sound of a product is for instance specified by the radiated airborne sound characterised by sound pressure and frequency. Second, the airborne sound radiated by a product depends the stimulating forces, the transmission behaviour of the product itself and its radiation. Focussing on the transmission and radiation of the product there are various properties used to describe the acoustic like damping, insulation or eigenfrequencies and eigenmodes. Compared to other product properties like weight or manufacturability it becomes clear that determining, evaluating and optimizing the acoustic of a product is challenging due to the following reasons:

- Acoustic properties have to be evaluated for assemblies considering different (changing) stimulating forces (differing spectrum and stimulation sites) and transfer path within the product. Thus, acoustic properties are strongly depending on the structure of a system.
- Acoustic properties are mainly relevant in the products use phase and highly depend on the environment and operation conditions of the system. Thus, acoustic properties have to be evaluated for different operating states.
- Acoustic properties are based on the dynamic behaviour of mechanical structures that can hardly be represent by established product models in early design stages.

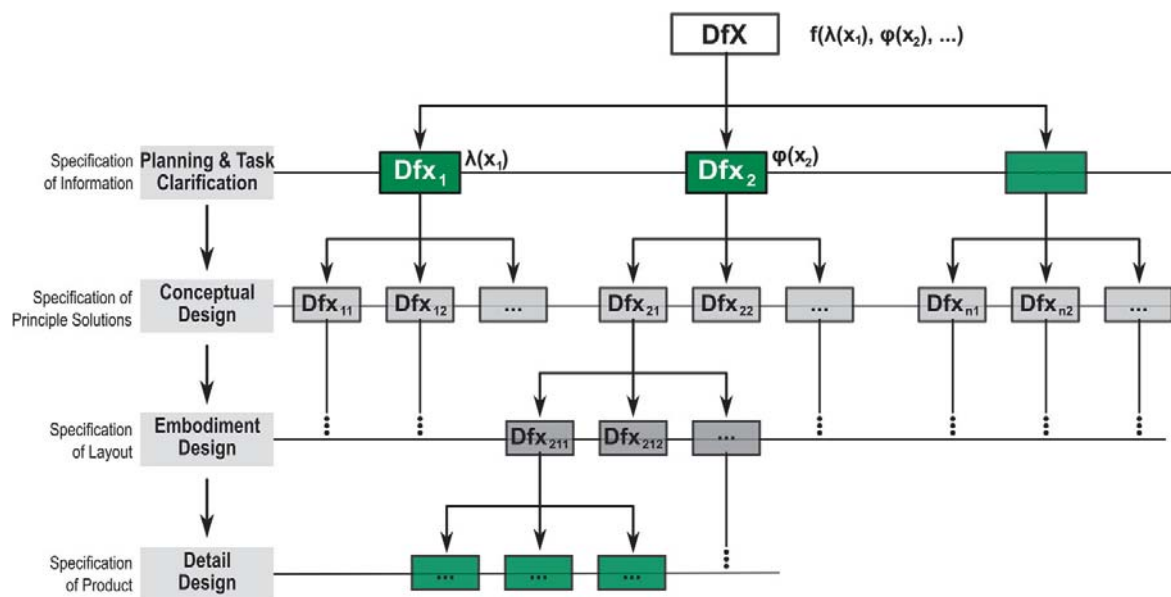
### ***Scope and Structure of this Contribution***

Based on the increasing relevance of acoustics and challenges outlined before, this contribution aims at fostering the integration of acoustic properties as central product properties within the design process – a Design for Acoustics (DFAc) methodology. To originate a DFC methodology, core elements of the Design for X (DFX) theory

are introduced and challenges of integrating DFX approaches into a design process and organisations are discussed in section 2. In section 3 existing approaches to analyse and evaluate acoustic properties are described as well as limitations from an engineering design perspective are introduced. Based on the elements of DFX methodologies, in section 4 fields of research towards a DFX methodology are highlighted. Section 5 concludes the contribution by a discussion and outlook on further research.

### Design for X Methodologies

Design for X means to fit a product to certain life cycle phases or to focus upon certain properties like acoustics /5/. Thus, there are two meanings: the 'X' represents a product property (e.g. cost, quality, reliability, etc.) or a life phase like planning, production, use or recycling. While cost elements occur in all life phases, other properties like reliability or assembly lead time are only relevant for a single life phase /6/.



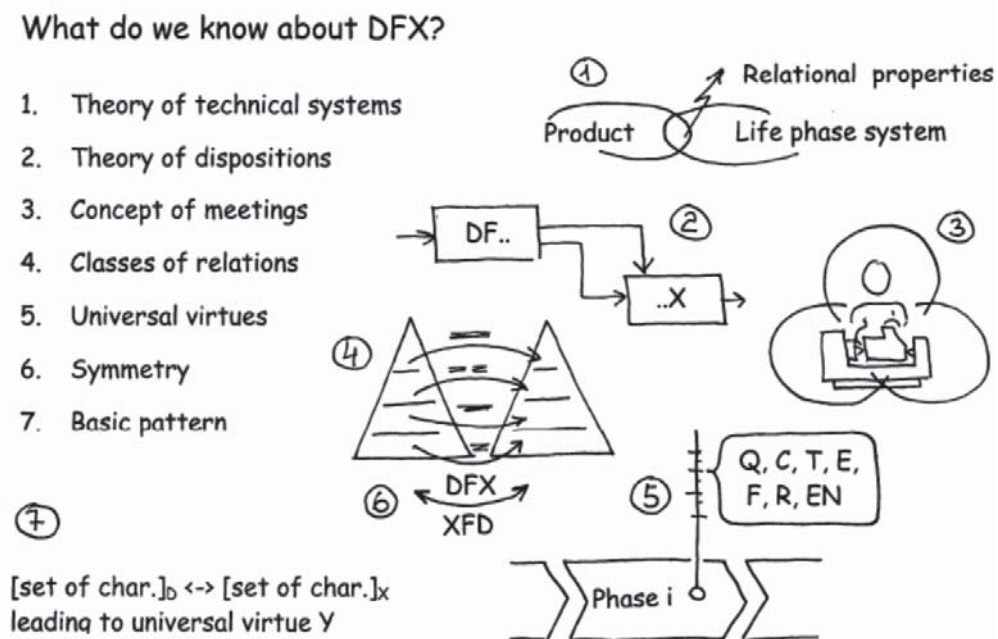
**Figure 1:** Correlations between design stages and different Design for X stages based on /7/.

DFX guidelines used to support designers represent knowledge /8/ and support achieving as many required properties of the product and the connected processes as possible during the PD process /7/. The analysis of information needed from the designer's viewpoint in different design stages indicates the strong dependency between the different natures of DFX guidelines, see Figure 1. While in early design stages strategic decisions are required and supported by generic guidelines, in later phases more concrete and detailed design guidelines are needed to support e.g. embodiment design or optimization of mechanical structures /7/. Generic demands for low effort on a high level, for example can be realized by low effort in development, material costs or production on a strategic level (planning phase). For each of

these fields specific principles provide measures like low running costs (production). Guidelines from the field of design for manufacture (DFM) are needed to support the design of single assemblies or components in the design stages of conceptualisation and embodiment. This highlights the different nature of DFX approaches needed to address the requirements of the specific design stages. On each level DFX methodologies comprise a number of basic elements introduced in the following section and Figure 2.

### Basic Elements of DFX Methodologies

DFX methodologies have been extensively researched as a core topic of engineering design /9/. Andreasen & Mortensen /10/ define seven elements indicating the fundamentals and fields of actions to be addressed by DFX methodologies, see Figure 2. These basic elements and their interactions have to be considered when developing DFX methodologies or single tools to support designers.



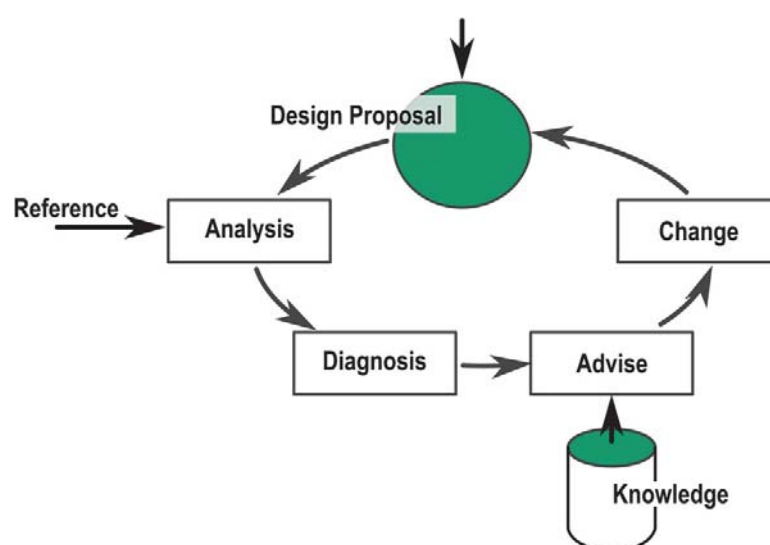
**Figure 2:** Basic elements of Design for X Methodologies, taken from Andreasen & Mortensen /10/.

The *theory of technical systems* /8/ serves as a basis to identify properties of products and design activities and determine relations between the product and its life phases. As a theoretical foundation it has to be recognised for every type of system and product. The *theory of dispositions* /11/ clarifies how the design activity influences nature and efficiency of the following design and realisation activities. It highlights the causality and hierarchy of decisions made in the different design stages, see Figure 2. The *concept of meetings* /6/ points out that properties arise and are relevant in a specific activity, in which the product, a certain product life system and operators are acting. Following this concept properties always have a

relational character. For instance manufacture costs are rational properties, depending upon the design and a number of (automated) operations in the production system /6/. The element *classes of relations* highlights that in DFX methodologies the product as well as the different life cycle systems have to be seen as hierarchical systems. Relations, therefore, have to be considered on different levels. Focussing the manufacturing area, there are relations between the product and the production system on the levels of product structure vs. production layout, product modules vs. production cells, and components vs. manufacturing processes /6/. The concept of *universal virtues* provides important classes of properties like quality, cost, time or flexibility to characterise the goodness of a design activity in the PD process /11/. It implements the view on the PD process into DFX methodologies. At the same time this DFX-element highlights the trade-off to be made in a design activity regarding the modelling effort and rigour of property evaluation. The *symmetry* highlights the integration of different responsibilities within the product generation process. With regard to DFM and DFA on the one hand designers have to provide products to good manufacture and assembly, on the other hand manufacture have to offer good processes and assemblies mature for reliable and good products /6/. The most common DFX-element are *basic pattern* identified by practitioners and researchers, based on past designs and for instance production processes and technologies. As design principles and rules /12/ these patterns are used to support designers for structural definition of the system (high level) as well as specific component and process aspects (low level), see Figure 1.

### What to Learn From Design for Manufacture (DFM)?

The analysis of the evolution of DFM gives insights on different approaches for its integration and use in PD. Andreasen et al. /6/ describe four steps of integration, that are derived from the technological evolution in engineering design and production, see Table 1.



**Figure 3:** Integration of Design for Manufacture Tools to Support Synthesis of the Product Solutions in a Corrective Cycle, based on /6/.



Core object of the first integration step was to equip design engineers with knowledge about the production methods by giving advices like “correct/ incorrect” design. Due to an increasing number of production technologies in the second step, integration of DFM was based on up front specifications, detailed design procedures and standardisation of designs /6/. The third integration step established DFM as team work and addressed the needs of extensive cooperation of design and manufacturing. Integration and scope of DFM activities were supported by models of integrated PD /9/.

Figure 3 presents how DFM tools in this step are used to aid the synthesis of the product in a corrective cycle. Computer integration has been the focus of the fourth step aiming at bringing DFM methodology, knowledge and best practice into computer systems. Here different approaches were pursued to link DFM principles and advices to the actual task of the designer: 1) Diagnostics based automatic analysis of design proposals to give advices for suitable adaptations; 2) Visualisation and knowledge support for life cycle consequences of design decisions; 3) Guidance through a sequence of detailed design steps, where each step is followed by inspection questions and advices. Independent from the approach Meerkamm & Koch /13/ point out that many DFM tools become islands since the software uses its own models of the design. In Table 1 the steps described for the evolution of the DFM methodology are summarised, denoting their focus and main challenges.

**Table 1:** Steps for the evolution of the DFM methodology

<b>Step</b>	<b>Focus</b>	<b>Challenges</b>
<b><i>Well-known Relations &amp; Solutions</i></b>	Identify & establish knowledge about production methods	Low number of production methods increases and change over time
<b><i>Up Front Specification &amp; Design Procedure</i></b>	Integrate restrictions into design; define procedures & standards	In-depth knowledge about (changing) production methods low cooperation level
<b><i>Stakeholder Cooperation &amp; Corrective Cycle</i></b>	Integrate activities of design and production system planning	Identification of dependencies between activities and use of robust information as well as shared models
<b><i>Computer Integration</i></b>	Integrate DFM methodologies, knowledge, best practices into software systems	Specific model of the product increase overall effort in design process

The ordering of the steps given in Table 1 is based on the evolution of DFM over time and at the same time includes insights and causations to be considered when establishing a DFAC methodology.

## Approaches to Analyse and Evaluate Acoustics

There are different methods to analyse and evaluate acoustic properties during PD. Approaches form Low Noise Design support PD processes by assisting to define acoustic relevant requirements, compare design solutions with regard to acoustic properties or acoustic analysis for prototypes /3/. Methods in the field of machine acoustics are focussing on exact calculation or emulation of the acoustic behaviour of products using numeric methods. Existing approaches in these fields are analysed and compared form an engineering design perspective, placing the used product models and considered product properties in the PD process.

### *Low Noise Design (Lärmarmes Konstruieren)*

Acoustic product properties can be affected in each design stage. Dietz & Gummersbach /1/ provide a comprehensive list of design guidelines and examples to affect acoustic properties distinguishing the origin of vibrations (source of excitation), the path between the excitation and emission and the surface (source of emission) as main design elements. Most of the guidelines have to be allocated to the embodiment phase, since quantitative product characteristics (material, dimensions, etc.) are needed. In order to evaluate acoustic properties within the PD in practice auxiliary quantities like eigenfrequencies and eigenmodes are used /14/. To reason on the acoustic behaviour of the product experience about correlations between acoustics and eigenfrequencies and eigenmodes is required and different operational states have to be considered to reason on. Another approach for quantitative evaluation of structure-borne noise is based on the structural intensity (STI) /15, 16/ or structure-borne sound intensity (SSI) /17/. Based on the analysis of the energy paths, local starting points to generate impedance jumps through design changes (e.g. removal of material, increase in stiffness or additional damping) can be derived and evaluated. Evaluation of the SSI requires models of the product defining dimensions and material characteristics. Current research of Adams et al. /18/ is focussing on scaling laws to determine the acoustic properties of new designs with high geometric similarity. Here the focus is on approximation rather than exact propagation in order to support the design of type series. Lohrengel et al. /19/ propose a combination of numerical simulation and non-contact measurement to evaluate the impact of locally modified structures on the acoustic behaviour. This work again highlights the need of detailed product modelling including exact dimensions and material definition models or even prototypes.

### *Property Determination in Machine-Acoustic*

In the field of machine acoustics extensive research has been done to develop numerical methods for exact propagation and emulation of acoustic properties. Established methods are the raytracing method /20/, the statistical energy analysis (SEA) /21/ as well as the boundary element method /22/ and the finite element method /23/. These methods allow for frequency dependent calculation of sound

transmission. The detailed modelling requires an exact determination of dimensions, material as well as contact conditions (e.g. between components) of the product under development and result in high simulation efforts. At the same time great expertise is needed to derive conclusion on the perceivable acoustic behaviour. In consequence the methods mentioned are mostly used by experts in the PD in cases when the acoustic behaviour of the product does not fulfil the given requirements.

### **Conclusions and Current Challenges**

Existing approaches are based on a range of methods differing with regard to required design determinations and accuracy of results. From an engineering design perspective the following challenges can be derived:

- There is limited methodical assistance to support a breakdown of acoustic properties from system level to subsystem levels and thus to facilitate the evaluation of requirements and conflicts during the PD process.
- Existing methods cause (re-)modelling effort and require extensive experience to assess the acoustic behaviour based on auxiliary quantities. The methods are hard to integrate into the PD process.
- There are rarely approaches to provide (qualitative) information about acoustic behaviour of reoccurring solution elements like different types of connections or recurrent design arrangements like housings.

These challenges highlight the need for research on the integration of analysis and evaluation activities into the PDP based on shared models for acoustic behaviour and other product properties. Premises and fields of research will be presented in the following section.

### **Towards a DFAC Methodology**

Objective of this section is to highlight existing and needed fundamentals to originate a DFAC methodology. Premises and fields of research formulated here are intended to encourage a common understanding and serve as a basis for systematic planning of research activities in collaboration of acoustic and engineering design researchers.

#### **Premises for a DFAC Methodology**

Considering the elements of DFX methodologies introduced, see Figure 2, some premises and assumptions have to be formulated for structured research. Focussing on the most relevant elements there are the following premises:

- *Theory of technical systems.* Acoustic properties are positioned as external properties like damping, echo, noise or frequency response are included in

existing theories /8, 24/. Considering the classification properties proposed by Hubka, acoustic properties have to be understood as ergonomic properties since they describe an influence of the product on human beings.

- *Theory of disposition.* Acoustic properties are strongly depending on the mechanical structure of the product which influences e.g. transfer path. Effective optimization of acoustics therefore have to be taken into account structural characteristics and dependencies between different acoustic properties of different levels like assemblies, subsystems and system. A DFAC methodology has to support analysis, evaluation and adaption of acoustic properties in different design stages, see Figure 1 and take into account uncertainties of geometry and material specifications of early design stages.
- *Concept of meetings.* Acoustic properties are rational properties focussing on the use phase of the future product. On the one hand the influence of acoustics is depending on the use context of the product. On the other hand the acoustic behaviour itself is affected by the operating conditions of the product. Therefore, analysis and evaluation of acoustic properties requires the specification of the use context and (changing) operating conditions.
- *Classes of relations.* Focussing on acoustic properties classifications of relations between acoustic properties on different levels are needed. As a part of a DFAC methodology identification and evaluation of relations should support the decomposition of requirements. Moreover relations have to be evaluated with regard to the use context which should go in line with the specification of the use context and interacting systems (see concept of meetings).
- *Concept of universal virtues.* Integrated into the PD process, design activities to analyse, evaluate and optimizes acoustic properties have to be based on existing product models in order to reduce modelling efforts and thus, allow fast evaluations of design proposals and stakeholder collaboration based on shared models.

The DFX elements *symmetry* and *basic pattern* are not explicitly mentioned for the following reasons: *Symmetry* in the context of design for acoustics does not relate different life cycle systems like PD and production since the life cycle focus of acoustics is the use phase. The concept of symmetry in a DFAC methodology thus is not relevant with regard to the life cycle but other product properties to be considered in the PD phase. *Basic pattern* are the essential elements of a DFAC methodology. With regard to existing research there is already a great body of knowledge. Future works should focus on the extension and classification of this knowledge as well as the contentious integration of knowledge of design practice and new material combinations and production technologies.

### **Fields of Research to Originate a DFAC Methodology**

Based on the analysis of existing approaches and the premises formulated initial fields of research can be outlined. The research fields described below should serve

for a structured composition of a DFAC methodology focussing on needs and constraints from design practice as well as design theory and methods from acoustic research. Taking into account the steps of evolution of DFX methodology, prior fields of research should be:

- *Acoustic characterization of solution pattern.* Solution pattern are of great relevance for effective PD and reuse of knowledge. Focusing on acoustic properties, solution pattern have to include information on the mechanical structure as well as operation conditions like stimulating forces. In order to provide assistance for decision-making in early design stages a great potential is expected in investigating the informational value of geometric similarity ratios indicating for instance the effect of basic dimensions and arrangements on the sound transfer and emission. Here, an emphasis should be on mechanical structures that are relevant for the sound transmission, like mechanical joining and connection elements. As well as mechanical structures relevant for sound emission, like housings.
- *Visualization methods for acoustic properties in the PD.* Since acoustic properties result from different product characteristics and are hard to evaluate in particular for engineers with low experience, there is a need for visualization techniques of acoustic properties based on auxiliary quantities. Research therefore, should focus on techniques to visualize acoustic properties in early design stages. Here, the focus should be on the visualization of the transmission path between the excitation and emission as well as points of sound emission. A major requirement for the investigation of visualization methods is the integration of commonly used product models in conceptual and embodiment design in order to enable evaluation and identification of goal conflicts with further product properties.
- *Specification of use and operation conditions to evaluate acoustic behavior.* In order to evaluate the relevance of acoustic properties as well as boundary conditions and impacts on the acoustic behavior like operations conditions including stimulating forces a specification of use and operation condition is essential. This research field will focus on the investigation of methods from Model-based Systems Engineering (MBSE) in order to support definition of operation states and interfaces. Here, a focus will be on the allocation, refinement and decomposition of requirements from system level to the level of single elements.

The outlined fields of research towards a DFAC methodology has to be seen as a starting point and will be detailed with regard to specific research questions, objectives and applications.

## Discussion and Conclusion

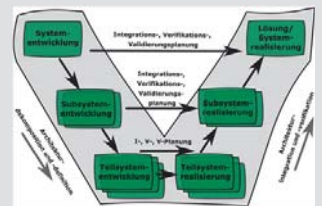
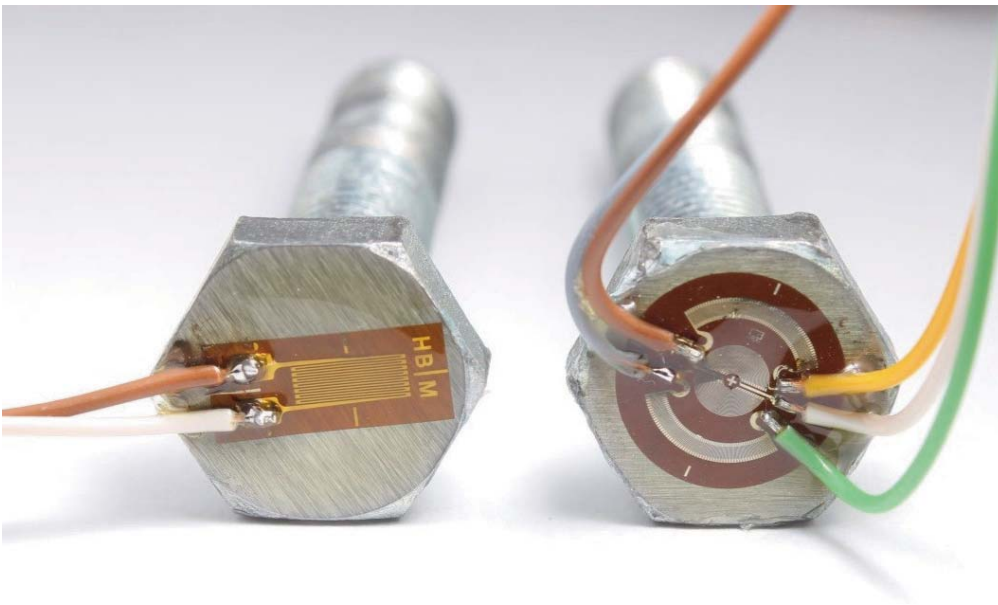
In this contribution fundamentals to originate a Design for Acoustics methodology were outlined. Therefore, the elements of Design for X methodologies were described and mapped to the field of acoustics. Since acoustic is a complex product

property, relevant in the use phase of the product, the elements *theory of technical systems*, *theory of disposition*, concept of meetings, *classes of relations*, *concept of universal virtues* and *basic pattern* are defined as essential elements of a DfAc methodology. Based on the analysis of the evolution of established Design for Manufacture methodology three fields for further research were identified. This contribution presents a basic review and definition of research towards a DfAc methodology. In order to detail the fields of research outlined, further analysis of the state of the art as well as a clarification of research objectives and field for application is needed.

## Literature

- /1/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele. Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss, 2001
- /2/ Kollmann, F. G.; Schösser, T. F.; Angert, R.: Praktische Maschinenakustik. 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- /3/ DIN EN ISO 11688-1: Akustik- Richtlinien für die Konstruktion lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil\_1: Planung (ISO/TR\_11688-1:1995); Deutsche Fassung EN\_ISO\_11688-1:2009
- /4/ Weber, C.: Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, S. 85–104
- /5/ Olesen, J.: Concurrent development in manufacturing - based on dispositional mechanisms. Dissertation, Technische Universität Dänemark, 1992
- /6/ Andreasen, M. M.; Kvist, M.; Pedersen, R.; Fiil-Nielsen, O.: What Happend to DFM? In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Tagungsband 17.Symposium Design for X, 2006, S. 1–13
- /7/ Bauer, S.: Design for X – Ansätze zur Definition und Strukturierung. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Tagungsband 14. Symposium DfX, 2003, S. 1–8
- /8/ Hubka, V.; Eder, W. E.: Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design. Springer Verlag, Berlin, 1988
- /9/ Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6. Auflage, Hanser Verlag, München, 2009
- /10/ Andreasen, M. M.; Mortensen, N. H.: Basic thinking patterns and working methods for multiple DfX. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Tagungsband 8. Symposium Design for X, 1997
- /11/ Olesen, J.: Concurrent Development in Manufacturing - based on dispositional mechanisms. Dissertation, Technische Universität Dänemark, 1992

- /12/ Inkermann, D.: Anwendung adaptronischer Lösungsprinzipien für die Entwicklung adaptiver Systeme. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2016
- /13/ Meerkamm, H.; Koch, M.: Design for X. In: Clarkson, P. J.; Eckert, C. (Hrsg.): Design process Improvement: A Review of Current Practice. Springer Verlag, London, 2005, S. 306–323
- /14/ Vietor, T.; Deges, R.; Hampl, N.; Biiger, K.-H.: Robust Design of Elastic Mounting Systems. In: Journal of Passanger Cars: Part 2 106 (1997), S. 2751–2758
- /15/ Kuhl, S.: Gezielte Leitung von Körperschall unter Zuhilfenahme der Strukturintensitätsrechnung. Dissertation, Technischer Universität Darmstadt, 2010
- /16/ Rothe, S.; Langer, S. C.: Optimization of structure-borne sound propagation using structural intensity. In: PAMM 19, Nr. 1, 2019
- /17/ Hering, T.: Strukturintensitätsanalyse in der Maschinenakustik. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012
- /18/ Adams, C.; Bös, J.; Völker, K.; Lutz, M.; Melz, T.: Akustische Eigenschaften einer geometrisch unvollständig ähnlichen Getriebebaureihe. In: DAGA 2019 – 45th German Annual Conference on Acoustics, 2019, S. 1164–1167
- /19/ Lohrengel, A.; Rolshofen, W.; Schäfer, G.; Thoden, D.: Determination of acoustic behaviour of locally modified structures by Scanning LDV. In: Journal of Physics: Conference Series 1149, 2018
- /20/ Vorländer, M.: Auralization - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- /21/ Fahy, F. J.: Statistical energy analysis: a critical overview. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences 346, Nr. 1681, 1994, S. 431–447
- /22/ Marburg, S.; Nolte, B.: Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- /23/ Cederfeldt, L.: On the Use of the Finite Element Method on Some Acoustical Problems. In: Journal of Engineering for Industry 104, Nr. 1, 1982, S. 108–112
- /24/ Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000



C

## Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik





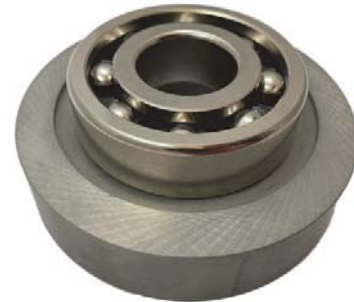


## Druckkammlagerung: Eingrenzung der Verlustleistungsreduktion bei optimaler Wälzlagerwahl

Heinrich, C.; Lohrengel, A.

*Untersucht werden Wälzlagerverlustleistungen und -kosten für Konfigurationen mit und ohne Druckkammlagerung. Aus dem gesamten Herstellerkatalog werden jeweils die verlustleistungs- oder kostenoptimalen Lager für eine umfangreiche Variation von Randbedingungen gewählt.*

*Roller bearing power loss and cost are analyzed for configurations with and without thrust collars. Optimal bearings concerning efficiency or cost are selected from the entire manufacturer's catalogue for an extensive variation of situations.*



### Untersuchungsziel

Heß demonstrierte in /1/ theoretisch und in /2/ experimentell mögliche Wirkungsgradgewinne beim Einsatz von Druckkämmen in schrägverzahnten Getrieben, welche aus der Entlastung der Wälzlager resultierten. Die zitierten Untersuchungen erfolgten an Einzelfällen; in diesem Artikel soll eine universellere Analyse erfolgen.

Die zu untersuchende Hypothese lautet, dass die beim Druckkammeinsatz wegfallende Axialbelastung der Wälzlager ausgenutzt werden kann, um leichtere, effizientere Lager einzubauen, ohne die Lagerlebensdauer negativ zu beeinflussen. Heß untersuchte im Speziellen den Wechsel von Kegelrollenlagern auf Rillenkugellager. Neben dem Tragfähigkeitsunterschied werden die Kegelrollenlager in der druckkammlosen Konfiguration wegen der besseren Führungsgenauigkeit der angestellten Lagerung gewählt; dieser Aspekt wird beim Druckkammeinsatz ebenfalls nicht verschlechtert, da die Druckkämme das Verzahnungskippmoment kompensieren (vgl. dazu auch /3/).

Neben dem Wechsel von Kegelrollenlagern auf Rillenkugellager gilt es, weitere Ausgangssituationen und Motivationen zu untersuchen. So interessiert z. B. ebenfalls, was für ein Wälzlagerverlustleistungsverhältnis sich einstellt, wenn die Wälzlager beim Druckkammeinsatz nicht im Vergleich zur konventionellen Ausgangssituation getauscht werden, oder wenn der Lagertyp (Kugel, Zylinderrollen, Kegelrollen) gleichbleibt. Ebenfalls existieren neben der Wirkungsgradmaximierung weitere Ziele bei der Lagerwahl, wie z. B. eine Kostenminimierung. Neben den zu untersuchenden qualitativen Veranlassungen zur Wahl bestimmter Lager gibt es

quantitative, d. h. diverse Getriebemomente, Drehzahlen, und Geometrien. Eine allgemeingültige Untersuchung dieses weiten Felds stellt eine methodische Herausforderung dar.

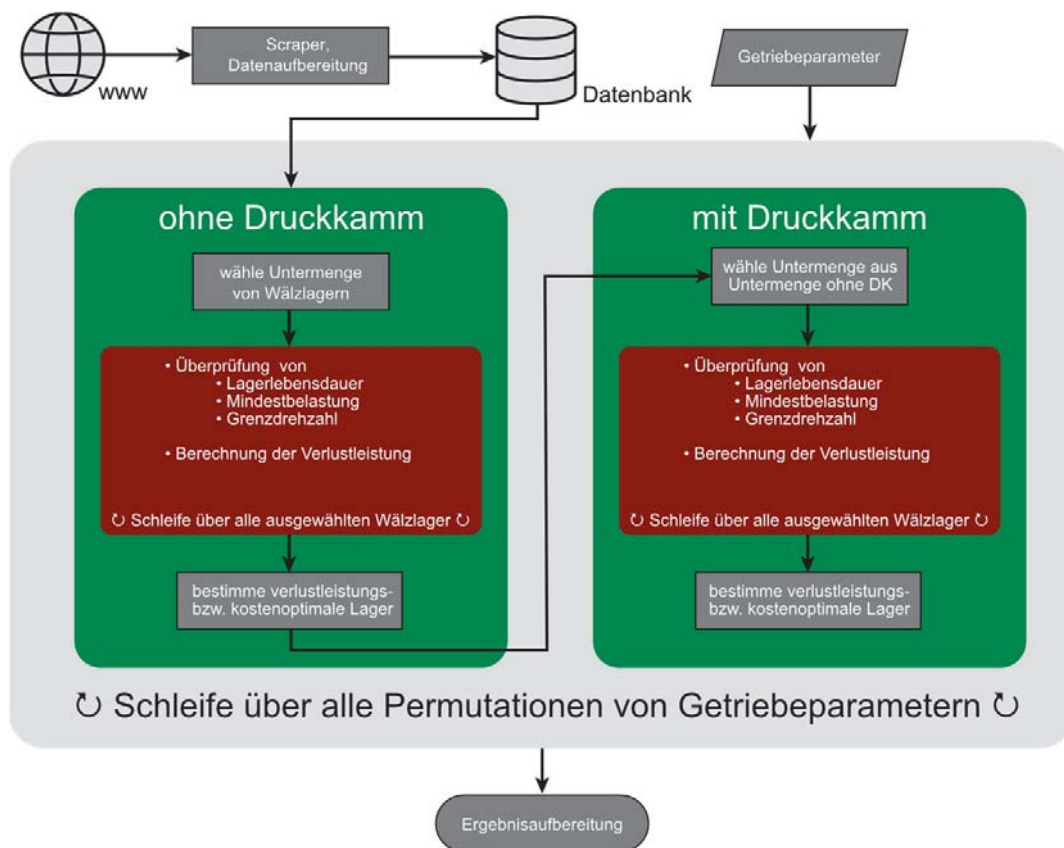
## Methodik

Da die Wälzlagerauslegung und -verlustleistungsberechnung mit unaufwändig auswertbaren analytischen Gleichungen durchgeführt werden kann, ist die Nutzung eines Brute-Force-Ansatzes d. h. die tatsächliche Berechnung diverser Konfigurationen anstelle des Versuchs, allgemeingültige Zusammenhänge aus wenigen Berechnungen oder durch Analyse von Gleichungen zu finden, praktikabel. Der Brute-Force-Ansatz wird für sinnvoll befunden, da die diversen am Markt verfügbaren Wälzlager keinen einfachen Funktionszusammenhängen folgen, sondern höchstens abschnittsweise leicht beschreibbar sind. Die Ergebnisse der Berechnungen werden dann mit statistischen Methoden ausgewertet.

Wenn eine große Menge von Wälzlagern in diversen Lastsituationen etc. berechnet werden soll, bietet sich dafür die algorithmische Umsetzung auf einem Computer an. Zu diesem Zweck müssen die Wälzlagerdaten in einer vom Berechnungsprogramm ansprechbaren Datenbank vorliegen. Eine solche öffentlich zugängliche direkt computernutzbare Datenbank existiert nach dem Wissen des Autors nicht; stattdessen liegen die Daten in gedruckten bzw. PDF-Katalogen und auf den Webseiten der Hersteller vor. Die Auswertung von Webseiten hat sich als einfacher umsetzbar als die Auswertung von PDF-Katalogen herausgestellt, da hierfür bessere Softwarewerkzeuge existieren und in Folge weniger manuelle Datenaufbereitung erforderlich ist.

Um die Daten von den Herstellerwebseiten automatisiert in eine im Berechnungsprogramm nutzbare Form zu überführen, wird die Methode des sog. Web Scraping („Schürfen des Internets“) genutzt. Ein Programm ruft die Herstellerwebseite in einem Webbrowser auf und arbeitet sich an einer dort verfügbaren Liste von Links zu einzelnen Detailseiten spezifischer Wälzlager vor. Die Struktur der Detailseiten ist immer gleich, so dass aus dem HTML-Code reproduzierbar spezifische Daten zum Lager über XPath-Ausdrücke extrahiert werden können. Es werden die Python-Bibliotheken Beautiful Soup /4/ und Selenium /5/ genutzt. Zur Untersuchung der Wahl des jeweils kostengünstigsten Lagers wird eine Händlerwebseite analog gescraped. Bei Lagern, die von verschiedenen namhaften Herstellern verfügbar sind, wird jeweils das günstigste in die Datenbank eingetragen.

Wegen der am einfachsten scrapebaren Webseitenstruktur wurde die Webseite des Herstellers SKF (skf.com) und die des Händlers eKugellager (eKugellager.de) zur Erstellung der Datenbank genutzt (Daten aus Juli 2021).

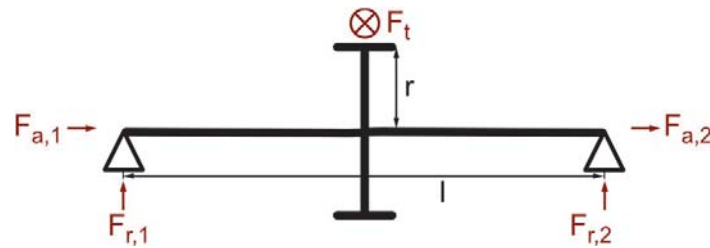


**Abbildung 1:** Flussdiagramm der Analyse

Die Datenbank enthält 1910 Rillenkugellager, 1921 Zylinderrollenlager und 571 Kegelrollenlager, davon 34 % mit Kosten.

Die Lagerverlustleistungsberechnung wird nach SKF-Verfahren /6/ und die Lebensdauerberechnung nach ISO 281 /7/ durchgeführt. Neben der Überschreitung der erforderlichen rechnerischen Lebensdauer wird die Einhaltung der Mindestbelastung und der Grenzdrehzahl geprüft. Kegelrollenlager werden ohne Vorspannung betrachtet. Da mit einer vorgegebenen Betriebsviskosität und nicht mit einer rechnerischen temperaturabhängigen Viskosität eines vorgegebenen Öls gearbeitet wird, werden Verlustleistungsunterschiede überschätzt, wenn sich in einem Getriebe mit vorgegebenem Öl für die Konfigurationen mit und ohne Druckkamm deutlich unterschiedliche Betriebstemperaturen einstellen, was die Verlustleistung der wärmeren Konfiguration senken würde.

Die Bestimmung der Lagerkräfte erfolgt nach den Methoden der technischen Mechanik. Unter der Annahme, dass das Zahnrad mittig zwischen den beiden Lagern sitzt, kann die Lagerbelastung für eine Getriebekonfiguration über die Nenn-Umfangskraft und das Verhältnis von Wälzkreisradius  $r$  zu Lagerabstand  $l$  mit einer Minimalmenge von Variablen bestimmt werden.



**Abbildung 2: Wälzlagerkräfte**

ohne Druckkamm	mit Druckkamm
$F_{r,1} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \beta \cdot r}{l} + \frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2} \quad (1)$	$F_{r,1} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2} \quad (2)$
$F_{r,2} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \beta \cdot r}{l} - \frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2} \quad (3)$	$F_{r,2} = \sqrt{\left(\frac{F_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_t \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot \cos \beta}\right)^2} \quad (4)$
$F_{a,1} = F_t \cdot \tan \beta \quad (5)$	$F_{a,1} = 0 \quad (6)$
bzw. für Kegelrollenlager in Abh. der Radiallast	bzw. für Kegelrollenlager in Abh. der Radiallast
$F_{a,2} = 0 \quad (7)$	$F_{a,2} = 0 \quad (8)$

(mit  $\alpha_n=20^\circ$ )

Ein Flussdiagramm der Analyse ist in Abbildung 1 dargestellt.

Es werden die folgenden Fragestellungen untersucht:

- ① Verlustleistungsverhältnis bei freier Wahl des jeweils effizientesten tragfähigen Lagers
- ② Verlustleistungsverhältnis bei der Wahl des jeweils effizientesten tragfähigen Lagers für die Konfiguration ohne Druckkamm und gleichbleibendem Bohrungsdurchmesser für die Konfiguration mit Druckkamm
- ③ Verlustleistungsverhältnis bei freier Wahl des effizientesten Lagers in der druckkammlosen Konfiguration und keinem Wechsel für die Druckkammkonfiguration
- ④ Verlustleistungsverhältnis bei freier Wahl des effizientesten Lagers in der druckkammlosen Konfiguration und keinem Wechsel des Lagertyps für die Druckkammkonfiguration
- ⑤ Verlustleistungsverhältnis bei der Wahl des effizientesten Kegelrollenlagers in der druckkammlosen Konfiguration und Wahl des effizientesten Lagers beliebigen Typs in der Druckkammkonfiguration
- ⑥ Kostenverhältnis bei freier Wahl des jeweils effizientesten tragfähigen Lagers
- ⑦ Kostenverhältnis bei freier Wahl des jeweils günstigsten tragfähigen Lagers

In Abstufungen wird der folgende Parameterraum untersucht:

- Nenn-Umfangskraft der Verzahnung  $F_t$  1e0-1e5 N
- Schrägungswinkel  $\beta$  10-30°
- Drehzahl  $n$  1e3-1e4 1/min
- nominelle Solllebensdauer  $L_{10h_{soll}}$  4e3-4e4 h
- tatsächliche kinematische Schmierstoffviskosität  $\nu$  25-250 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>
- Verhältnis Wälzkreisradius zu Lagerabstand  $r/l$  1-4

Das Übersetzungsverhältnis ist nicht enthalten; stattdessen wird nur die Hälfte einer Verzahnungsstufe (d. h. nur die langsamlaufende oder nur die schnelllaufende Welle) untersucht. Dies senkt die Anzahl der zu berechnenden Permutationen; die Auswirkungen im Getriebe können so separat betrachtet werden. Die Wellen mit Rad und Ritzel unterscheiden sich durch unterschiedliche  $r/l$ -Verhältnisse.

Ausgewertet werden bei Verlustleistungsbetrachtungen die Wälzlagerverlustleistungsverhältnisse ohne Druckkammverlustleistung. Die Ergebnisse stellen somit den höchstmöglich erreichbaren Gewinn dar. Die Druckkammverlustleistung kann bezogen auf die Wälzlagerverlustleistung in der Lagerungssituation ohne Druckkamm zu den Verhältnissen addiert werden, um die Gesamtlagerungskonzepte zu vergleichen. In /1/ lag die rechnerische Druckkamm-verlustleistung bei etwa 8 % der Wälzlagerleistung in der Lagerungssituation ohne Druckkamm; in /2/ lag sie darunter (es wurde ein weites Kennfeld von Drehzahlen und Drehmomenten untersucht). Hierbei muss beachtet werden, dass die Druckkammverlustleistung für die komplette Getriebestufe gilt, in der vorliegenden Analyse jedoch nur jeweils eine von zwei Wellen einer Getriebestufe betrachtet werden.

Analog stellt das Kostenverhältnis das Verhältnis der Wälzlager ohne Druckkamm dar. Zu den Druckkamm-Fertigungskosten liegen keine repräsentativen Werte vor.

## Auswertung

Die Ergebnisse werden in den Abbildungen 3-5 ausgewertet. Abbildung 3 zeigt die Verlustleistungsverhältnisse bzw. Kostenverhältnisse verschiedener Fragestellungen (bezeichnet durch die Zeilennummierungen ①-⑦) ausgewertet als spaltenweise Variation jeweils eines Parameters und Mittelwertbildung über die restlichen. Die Verhältnisse werden durch Division des Ergebnisses für die Druckkamm-Wälzlagerkonfiguration durch die druckkammlose Wälzlagerkonfiguration gebildet, d. h. Werte kleiner 1 bedeuten geringere Leistungen bzw. Kosten in der Druckkamm-Wälzlagerkonfiguration.

Während in Abbildung 3 die Streuung der Ergebnisse untersucht werden kann, zeigen Abbildungen 4 und 5 die Interaktionen von jeweils zwei Faktoren, wobei die Ergebnisse über die restlichen Faktoren gemittelt werden.

Die Interaktions-Konturplots sind platzsparend in Dreiecksmatrizen sortiert, wobei die Fragestellung der jeweiligen oberen bzw. unteren Dreiecksmatrix (grau markierte Bereiche) durch die Nummer in der oberen linken Ecke des Dreiecks angegeben wird. Die Achsenbeschriftungen gelten zeilen- bzw. spaltenweise.

Grundsätzlich liegen die mittleren Verhältnisse für alle betrachteten Fragestellungen unter 1. Das Verlustleistungsverhältnis ist für die von Heß bearbeitete Motivation des Austauschs von Kegelrollenlagern ⑤ am geringsten (im Mittel bei 0,22). Bei der komplett freien Lagerwahl ① liegt das Verlustleistungsverhältnis im Mittel bei 0,35. Werden die verlustleistungsoptimal gewählten Lager der druckkammlosen Konfiguration für den Druckkammeinsatz nicht getauscht, liegen die Wälzlagerverlustleistungsverhältnisse im Mittel zwar merklich über den Varianten mit frei für den Druckkammeinsatz gewählten Lagern, jedoch unter 1 bei 0,6 (③).

Plausibel sind sinkende Verhältnisse bei steigendem Verzahnungsschrägungswinkel  $\beta$  oder großem Hebelarm (beschrieben durch  $l/l_0$ ).

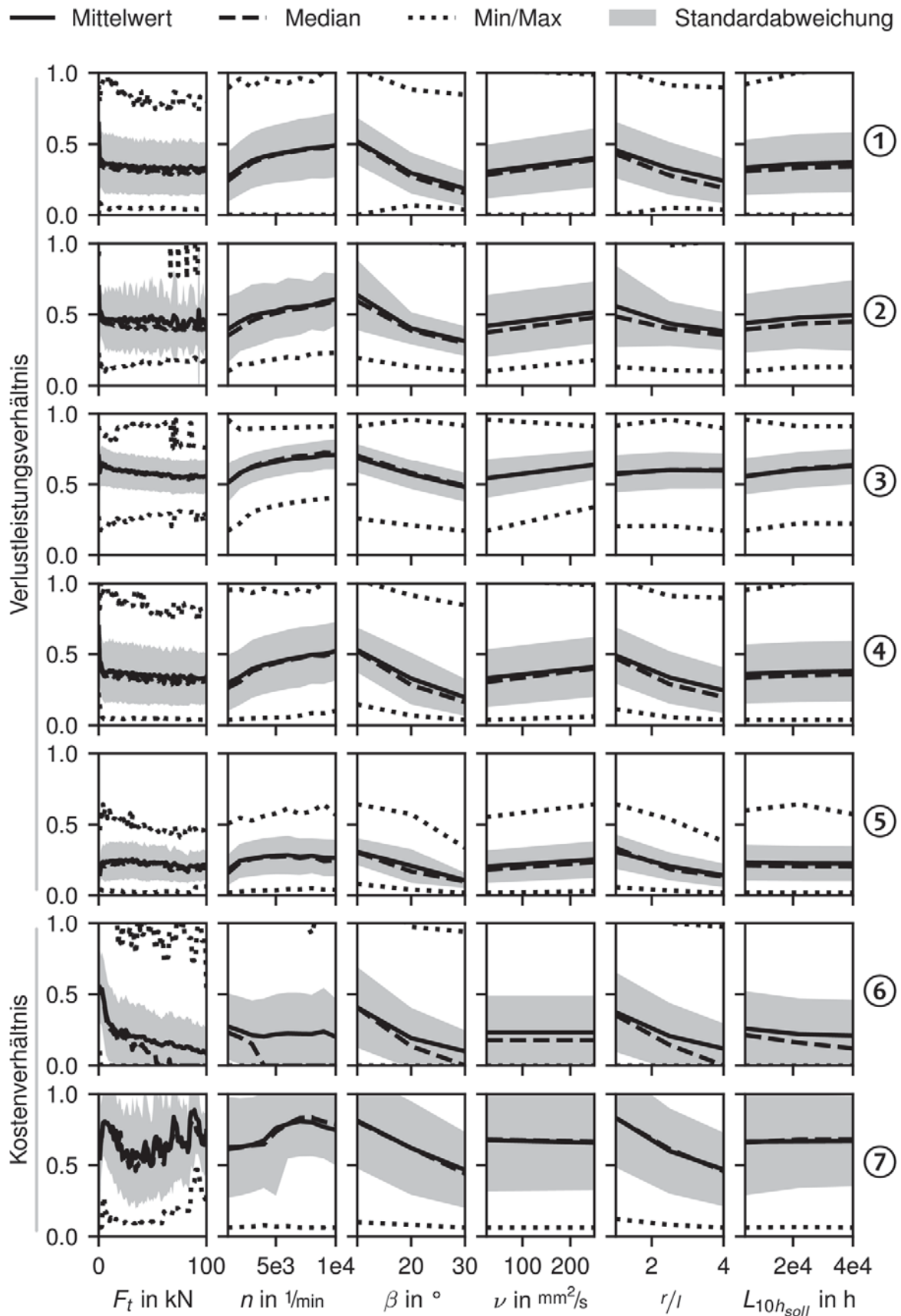
Das mittlere Verlustleistungsverhältnis hängt wenig von der Umfangskraft ab. Es ist bei niedrigen Drehzahlen und Viskositäten kleiner als bei hohen.

Die Streuung der Ergebnisse ist begrenzt, so dass eine Auswertung der Tendenzen über Mittelwerte sinnvoll ist. In Ausnahmefällen (beschrieben durch Min/Max-Linien) können auch kontraproduktive Fälle, d. h. mit Verlustleistungsverhältnissen größer 1 oder extreme Gewinne mit Verlustleistungsverhältnissen nahe 0 auftreten.

Bei hohen Lasten und Drehzahlen ist der Kostenunterschied besonders hoch, wobei hier in Frage gestellt werden muss, ob die Inklusion der zusätzlichen Kosten durch den Druckkamm nicht das Gesamtkostenverhältnis wieder deutlich über 1 schieben würde.

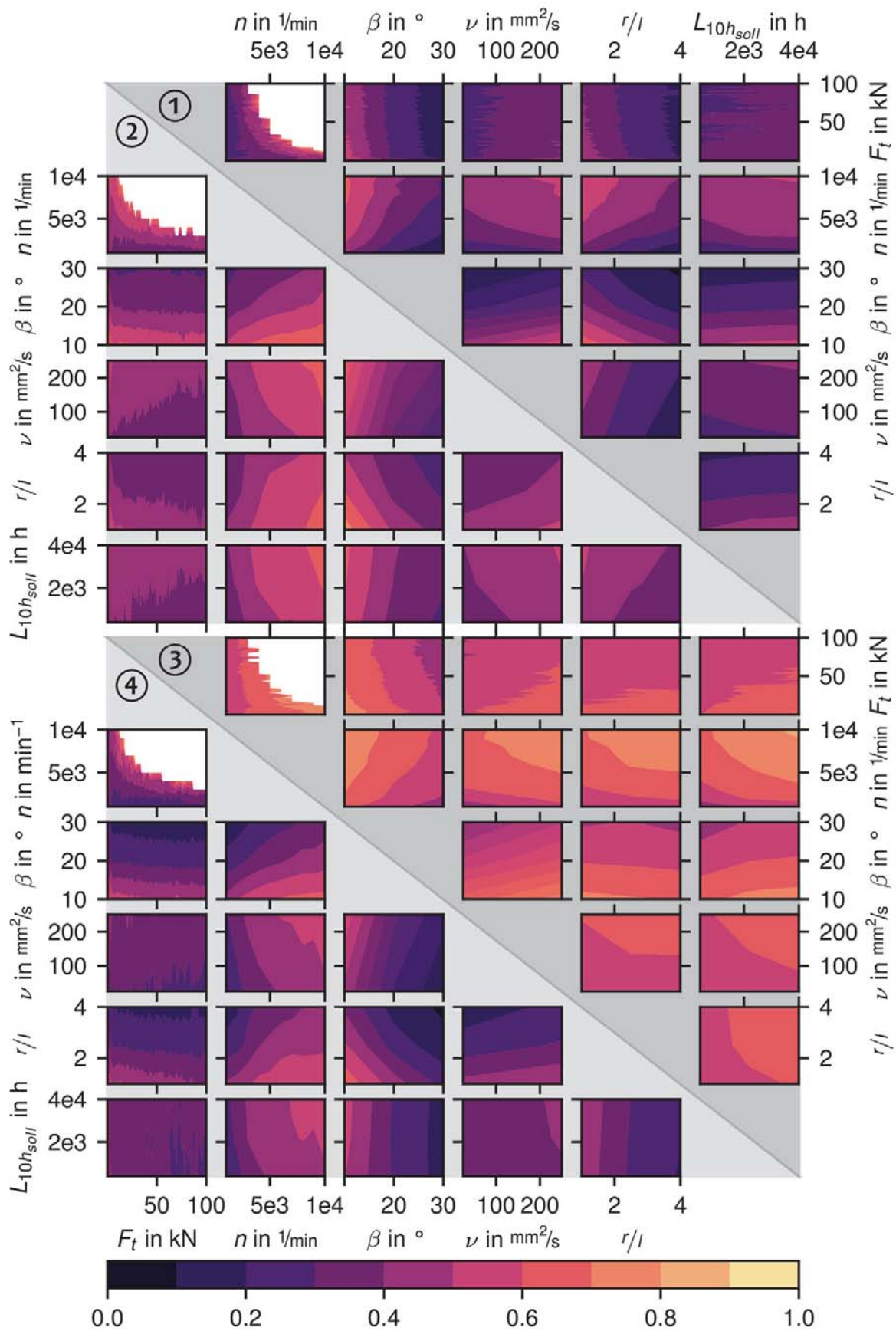
## Fazit

Die Erkenntnis zur Möglichkeit der Beeinflussung der Wälzlagerverluste beim Druckkammeinsatz wurde verallgemeinert und erweitert. Wenn auch die vorher betrachtete Ausgangssituation mit Kegelrollenlagern den Best Case darstellt, so sind auch unter anderen Umständen Wirkungsgradgewinne möglich.



**Abbildung 3:** Wälzlagerverlustleistungs- & -kostenverhältnisse – Streuung





**Abbildung 4:** Wälzlagerverlustleistungsverhältnisse – Faktorinteraktion

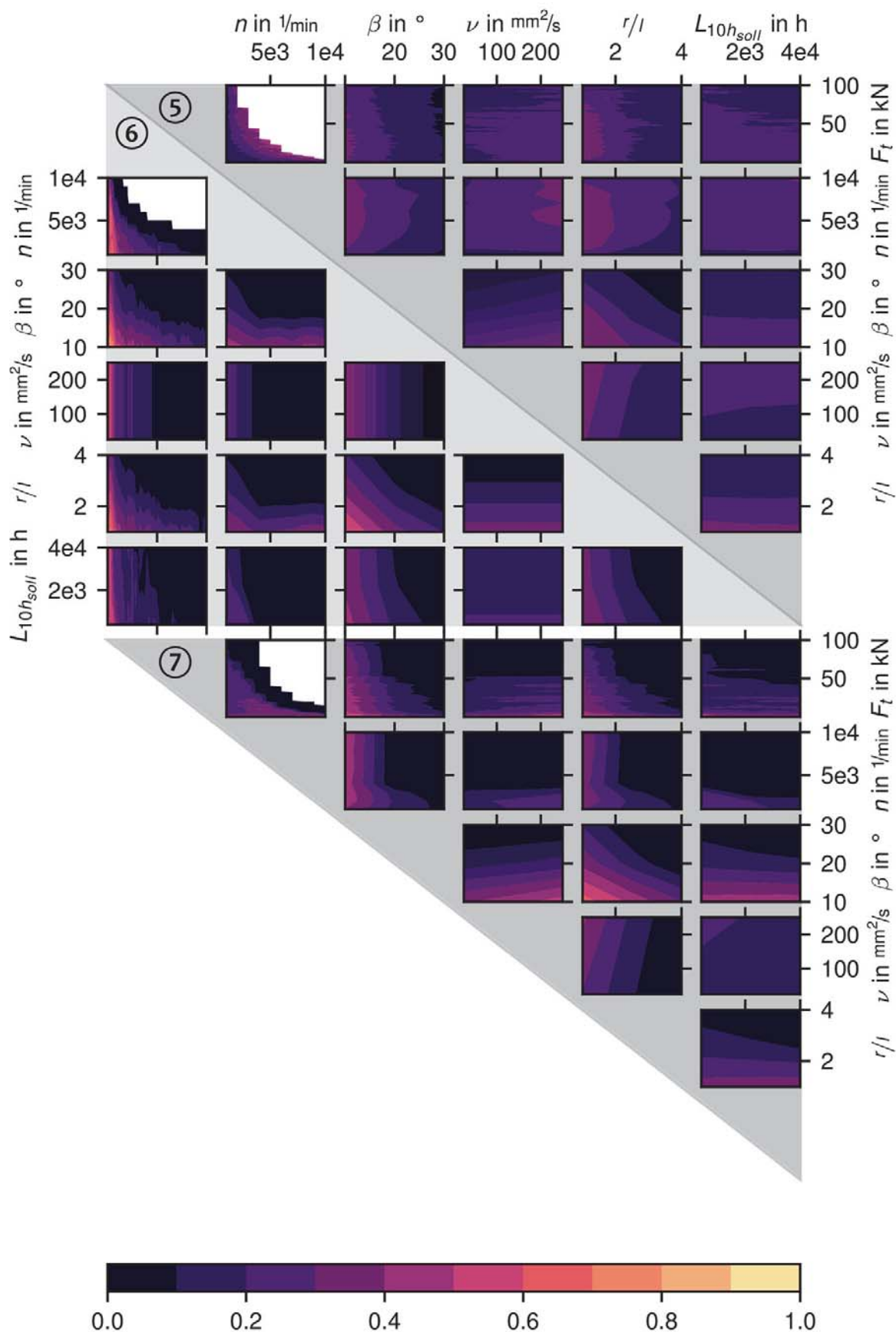


Abbildung 5: Wälzlagerleistungs- & -kostenverhältnisse – Faktorinteraktion

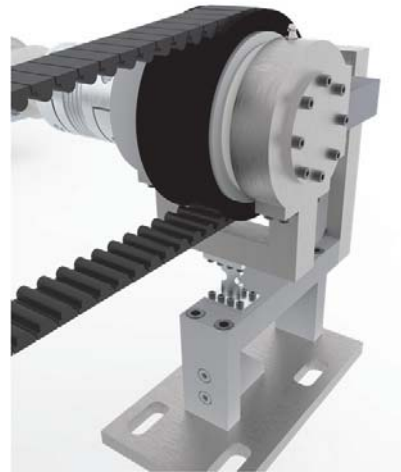
## Literatur

- /1/ Heß, M.: Beeinflussung der Reibungsverluste in schrägverzahnten Getrieben durch Druckkamm lager. In: Institutsmitteilung Nr. 39, S. 33–44, IMW TU Clausthal, 2014
- /2/ Heß, M.: Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnten Getrieben, Dissertation TU Clausthal, 2018
- /3/ Heinrich, C.: Steigerung des Verzahnungswirkungsgrads im Teillastbereich durch Druckkammeinsatz. In: Institutsmitteilung Nr. 44, S. 5–12, IMW TU Clausthal, 2019
- /4/ Richardson, L.: Python-Bibliothek Beautiful Soup, <https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup/>, 2021
- /5/ Selenium HQ: Python-Bibliothek Selenium, <https://github.com/SeleniumHQ/selenium/tree/trunk/py>, 2021
- /6/ SKF Gruppe: Hauptkatalog. SKF Group, Göteborg, 2014
- /7/ DIN ISO 281:2010-10: Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO 281:2007)

## Konstruktive Optimierung des Freilauf-Doppelprüfstandes

Duchâteau, F.; Lohrengel, A.

Die Lebensdauer von Freiläufen unter reiner Torsionsbelastung kann von Anwendern und Herstellern realistisch abgeschätzt werden. Die in der Praxis häufig auftretenden parasitären Zusatzlasten führen zu einem verfrühten Ausfall des Freilaufs, da diese in der Auslegung bisher nicht genau berücksichtigt werden können. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens soll diese Auslegungsgrundlage geschaffen werden. Der bereits bestehende Prüfstand zum Aufbringen und Messen von Radiallasten an Freiläufen soll für die weitere Forschung konstruktiv angepasst werden. Primär wird hierfür die Prüflingsaufnahme umgestaltet, um einen zentralen Prüfraum mit direkter Messaufnahme zu schaffen.



*The lifespan of Freewheels due to solely torsional load can be estimated realistically by the user as well as the manufacturer. In practice the torsional loads are overlaid with additional loads, resulting from radial forces or tilted tracks, which causes a premature failure. Until today, the resulting reduction of lifespan cannot be predicted precise. A design basis is to be created as part of a research project for these circumstances. The design of the existing test rig for applying and measuring radial loads on freewheels is to be adapted for further research. Primarily, the test piece fixture will be redesigned to create a central test area with direct measurement fixture.*

### Einleitung

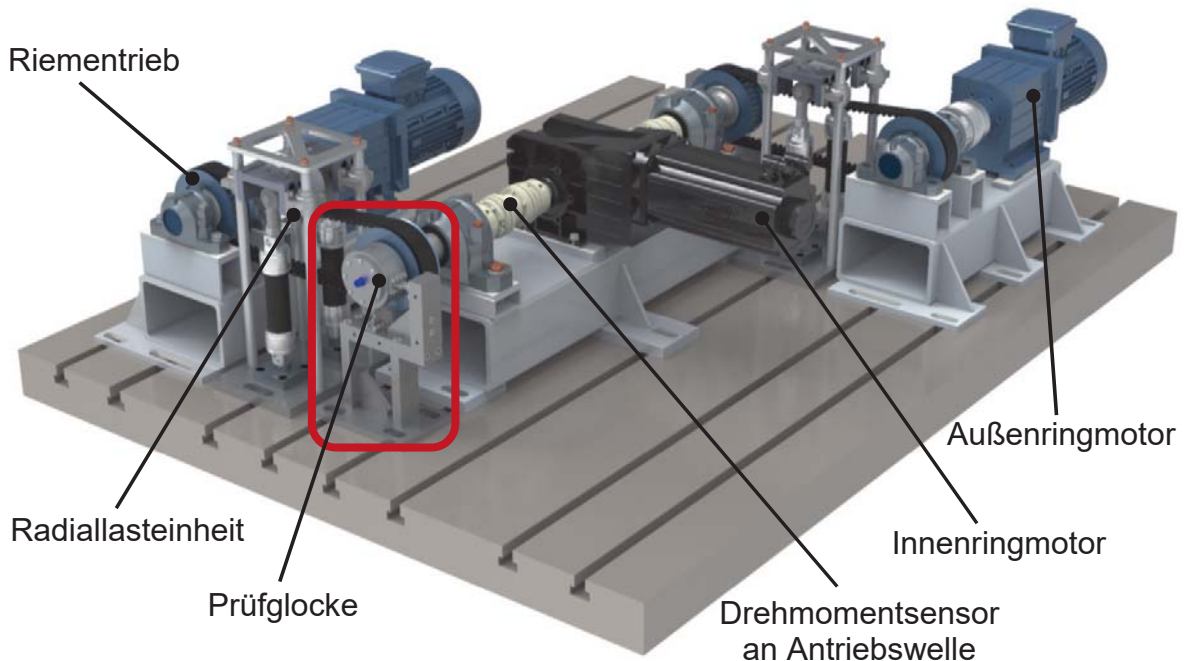
Ein Freilauf wird im industriellen Umfeld für die Aufgabe der richtungsabhängigen Drehmomentübertragung eingesetzt. Unterschieden wird dabei in Klemmrollenfreiläufe in Klemmkörperfreiläufe. Bei Klemmrollenfreiläufen wird die Klemmwirkung durch eine spezielle Rampengeometrie im Innen- oder Außenring ermöglicht. Die Klemmkörperfreiläufe besitzen einen zylindrisch ausgeführten Innen- und Außenring, wobei die Klemmwirkung durch die spezielle Form der Klemmkörper erzeugt wird. Eine Dimensionierung dieser Freilaufarten unter Belastung durch das regulär wirkende Sperrmoment ist nach heutigem Stand treffsicher möglich. Die Auslegung hinsichtlich einer definierten Belastung und der Lebensdauer erfolgt mit Berechnungsprogrammen wie z. B. JFRED, die als Ergebnis aus mehreren Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) entwickelt wurden. Häufig lassen sich in der praktischen Anwendung aus konstruktiven oder wirtschaftlichen Gründen zusätzliche parasitäre Belastungen im Freilauf nicht vermeiden. Eine Zusatzlast (in Form radialer Kräfte oder Verkippung der Laufbahn)

bewirkt eine über den Umfang und ggf. der Breite des Freilaufs ungleichmäßige Belastungsverteilung der beteiligten Freilaufkomponenten, sodass einige Klemmkontakte im Freilauf öfter und stärker belastet werden als andere. Dies hat zur Folge, dass es zu einer Abweichung zwischen der Anzahl an tatsächlichen Schaltzyklen und der Anzahl der erfassten Lastwechsel bei Spitzenbelastung kommen kann. Diese Tatsache führt zu einer signifikanten Lebensdauerverkürzung bei Freiläufen unter Zusatzlast im Vergleich zu Freiläufen ohne den Einfluss parasitärer Lasten. Da der Einfluss einer Zusatzlast auf die Lebensdauer noch nicht eindeutig bestimmt werden kann, besteht weiterer Forschungsbedarf. Die genannte Lebensdauerverkürzung durch radial wirkende Zusatzlasten wurde in einem Vorgängervorhaben für Klemmrollenfreiläufe mit Kreisbogenrampe bereits untersucht und kann in Ansätzen in der Freilaufauslegung berücksichtigt werden. In einem weiteren Forschungsprojekt soll der bestehende Ansatz weiter optimiert und verbessert werden. Die Auslegungsgrundlage für Klemmrollenfreiläufe mit Kreisbogenrampe soll im aktuellen Vorhaben auch auf Klemmrollenfreiläufe mit ebener Klemmrampe und auf Klemmkörperfreiläufe übertragen werden. Für die Erreichung des Forschungsziels werden neben Simulationen am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik (iaf) der Universität Kassel eine Vielzahl an Versuchen am IMW durchgeführt. Am IMW besteht bereits aus dem Vorgängervorhaben ein aufgebauter Prüfstand für die Untersuchung des Einflusses einer radialen Zusatzlast auf Freiläufe. Für das aktuelle Vorhaben mit unterschiedlichen Freilaufotypen und -geometrien ist eine Anpassung des Prüfstands notwendig.

### Aufbau des Freilauf-Doppelprüfstands

Für die experimentelle Untersuchung der Lebensdauer von Freiläufen steht am IMW unter anderem der in Abbildung 1 gezeigte Prüfstand zur Verfügung, mit dem unterschiedliche Prüfbedingungen realisiert werden können. Der bisherige Versuchsaufbau wurde im Rahmen des FVA-Projektes 694 – Freilauf kombinierte Lasten entwickelt und realisiert. Der Prüfstand ist symmetrisch aufgebaut, sodass zeitgleich zwei Prüflinge getestet werden können. Der konstruktive Aufbau des Prüfstands eignet sich für die Untersuchung des Einflusses der radialen Zusatzlast auf die Freilauflebensdauer. Der konzeptionelle Aufbau wurde bereits in [1] vorgestellt. Durch die symmetrische Anordnung können parallel zwei Freiläufe geprüft werden. Die Innenringe der Freiläufe werden unter Vorgabe der Amplitude und der Frequenz oszillierend entweder in Klemm- oder Freilaufrichtung geschaltet. Die Freiläufe sind dabei entgegengesetzt zueinander einzubauen, sodass jeweils ein Freilauf klemmt, während der andere freiläuft. Die Außenringe der Freiläufe sind in eine Trägernabe montiert, die wiederum mit einem verstärkten Riementrieb verbunden ist. Über den Riementrieb wird eine konstante, umlaufende Drehbewegung des Außenrings realisiert, sodass ein Entsperrn der Prüflinge in Freilaufrichtung garantiert werden kann. Die Höhe der Radiallast wird über die jeweilige Spannrolle des entsprechenden Riementriebs mittels pneumatischer

Muskeln (siehe in Abbildung 1 Radiallasteinheit) aufgebracht. Die Zusatzlast kann individuell für beide Prüfseiten eingestellt werden.



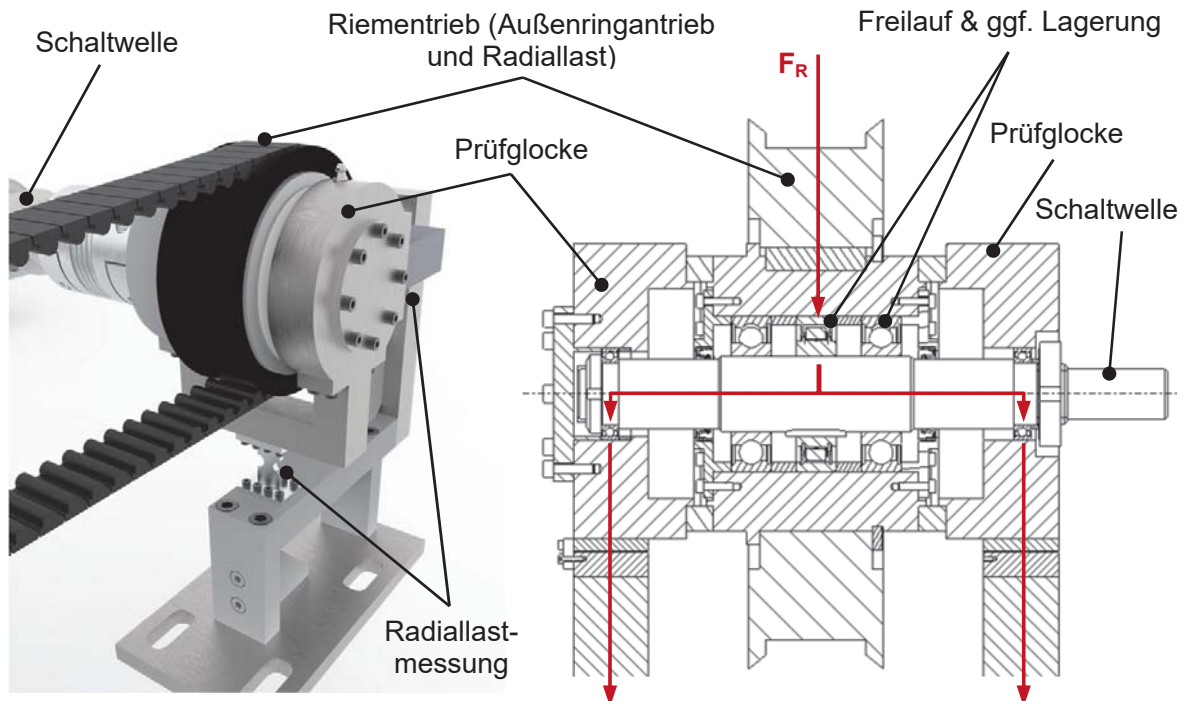
**Abbildung 1:** Konzeptioneller Aufbau des bisherigen Freilauf-Doppelprüfstands /2/

Im Versuchsbetrieb werden das Drehmoment sowie die wirkende radiale Zusatzlast am Prüfling aufgezeichnet. Der Verdrehwinkel wird mittels eines Drehwinkelgebers an der Innenwelle erfasst. Beschleunigungssensoren detektieren einen auftretenden Schaden im Freilauf. Weitere Abschaltkriterien, wie Winkelgrenzen, sind in der Steuerung hinterlegt. Der bisherige Prüfaufbau ist auf die Verwendung von dem im Vorhaben FVA 694 I untersuchten Klemmrollenfreilauf mit Kreisbogenrampe ausgerichtet. Im Rahmen des FVA-Folgevorhabens 694 II – Freilauf kombinierte Lasten 2 sind drei unterschiedliche Freilaufgeometrien an dem Freilauf-Doppelprüfstand zu untersuchen. Hierfür soll eine Anpassung der Prüflingsaufnahme (siehe rot markierten Bereich in Abbildung 1) zu einer erhöhten Flexibilität hinsichtlich der unterschiedlichen Freilaufausführungen führen.

### Neukonstruktion der Prüflingsaufnahme

Die Anpassung des Prüfstands wird an der Freilaufaufnahme mit der dazugehörigen Messtechnik vorgenommen. Bei der konstruktiven Anpassung der Prüflocke wird auf den Erhalt der Vergleichbarkeit zu bisherigen Versuchen geachtet, sodass die grundlegenden Funktionsprinzipien unverändert gelten. Der bisher verwendete Aufbau ist auf genau einen Prüfling ausgelegt. Die Innenwelle und die hohle Außenwelle zur Aufnahme des Prüflings sind bisher einseitig über einen Lagerbock fest über das Maschinenbett gelagert, auf der anderen Seite befindet sich an einer einseitig montierten Prüflocke die DMS-Messeinrichtung. Über die DMS-Messung wird die auf den Freilauf wirkende Radiallast erfasst und überwacht. Mehr Flexibilität

bietet eine Lösung mit einer leicht austauschbare Prüflingsaufnahme, die vom restlichen Prüfaufbau losgelöst gehandhabt werden kann. Die neu konstruierte Prüfeinheit ist in Abbildung 2 gezeigt.



**Abbildung 2:** Zeichnung der überarbeiteten und entkoppelten Prüfeinheit

Die neue Prüflingsaufnahme verfügt über dasselbe Funktionsprinzip, wie der bisherige Aufbau. Die Trägernabe (und damit der Außenring des Freilaufs) wird über einen kontinuierlich rotierenden Riementrieb angetrieben, über den auch weiterhin die Radiallast eingeleitet wird. Die Welle zur Aufnahme der Freilaufinneringringe wird mittels einer Ausgleichskupplung an die oszillierende Schaltwelle angeschlossen. Die Messung der Radiallast erfolgt analog zum vorherigen Aufbau mittels DMS-Messung. Über die rechtwinklige Anordnung der DMS-Messeinheiten ist die vektorielle Richtung der Radiallast bestimmbar, siehe Abbildung 2 links. Durch das unveränderte Messprinzip bleibt die Vergleichbarkeit zu vorherigen Versuchsergebnissen erhalten. In die symmetrisch aufgebaute Prüfeinheit wird der Prüfling mit ggf. notwendigen weiteren Stützlageren vormontiert und anschließend im restlichen Prüfstand eingebaut. Der prinzipielle Aufbau der Prüfeinheit ist in Abbildung 2 rechts gezeigt, neben dem mittig eingesetzten Freilauf ist auch eine beidseitige Stützlagerung vorgesehen, da Freiläufe selbst keine Lagereigenschaften besitzen. In Freilaufriichtung wird die Zusatzlast über die Stützlager abgeführt, der Kraftfluss der Radialkraft  $F_R$  ist in Abbildung 2 rechts als roter Verlauf eingezeichnet. Beim Klemmen des Freilaufs in Sperrichtung kommt es zu einer Aufweitung des Freilaufs, wodurch die Radiallast dann über den Freilauf statt über die Stützlager geleitet wird.

Die rotierende mittlere Hohlwelle der gezeigten Prüfglocke wird beidseitig axial gegen die feststehenden Messgehäuse abgestützt. Die Abstützung erfolgt über Reibringe aus Kunststoff, die einen radialen Ausgleich durch die Zusatzlast bei gleichzeitig geringer Reibung gewährleisten. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die Radialkraft vollständig über den Prüfling geleitet wird und gleichzeitig die axiale Position des Prüflings gehalten wird. Die Radiallast wird über den Prüfling weiter auf die Schaltwelle (Innenwelle) geleitet. Über die beidseitige Lagerung der Schaltwelle und den insgesamt symmetrischen Aufbau der Prüfeinheit wird die Radiallast gleichmäßig an die DMS-Messstellen geleitet, sodass die im Freilauf wirkende Radiallast direkt erfasst werden kann.

Die Schaltwelle wird an einer Ausgleichkupplung montiert, die einen Winkel- und Radialversatz während der Versuche ausgleicht. Auf diese Weise kann eine nahezu vollständige Abkopplung zum restlichen Prüfaufbau gewährleistet werden, sodass eine sehr präzise und direkte Radiallastmessung durchgeführt werden kann. Das neue Konzept für die Aufnahme von Prüflingen ermöglicht den flexiblen Wechsel zwischen mehreren unterschiedlichen Prüflingaufnahmen, die jeweils genau auf unterschiedliche Prüflingsgeometrien und Freilaufarten zugeschnitten werden können. Der Wechsel zwischen unterschiedlichen Prüflingen kann somit ohne große Umbau- und Stillstandszeiten vollzogen werden.

Um einen schnellen Prüflingswechsel im Prüfstand zu realisieren, können auch mehrere derselben in Abbildung 2 gezeigten Aufnahmen eingesetzt werden, sodass Prüflinge unabhängig vom Prüfstandsbetrieb bereits vormontiert werden können. Durch die einfache Anbindung am Prüfstand ist ein schneller Austausch der gesamten Prüflingaufnahme möglich, sodass die Stillstandszeit am Freilauf-Doppelprüfstand zukünftig reduziert werden kann. Eine minimierte Stillstandszeit steht besonders im Rahmen des durchzuführenden Forschungsvorhabens mit vielen Radiallastversuchen im Vordergrund.

### Kenndaten des Freilauf-Doppelprüfstands

Bei der Umkonstruktion der Freilaufaufnahme wurde auf eine Vergleichbarkeit zum vorherigen Aufbau geachtet, sodass zukünftige Versuchsergebnisse weiterhin mit bereits durchgeführten Versuchen verglichen werden können. Mit dem Prüfstands-aufbau können maximal folgende Prüfbereiche abgebildet werden:

- Maximaler Verdrehwinkel  $\varphi = \pm 10^\circ$
- Maximales Torsionsmoment  $T_{\max} = 200 \text{ Nm}$
- Maximale Radiallast je Prüfling  $F_{\text{rad,max}} = 36 \text{ kN}$
- Maximale Prüffrequenz  $f = 15 \text{ Hz}$

Mit dem aufgebauten Prüfstand können die für das Forschungsvorhaben ausgewählten Prüflingstypen untersucht werden. Zu untersuchen sind zwei Klemmrollenfreilaufarten mit unterschiedlicher Rampenausführung sowie erstmals Klemm-



körperfreiläufe unter dem Einfluss unterschiedlich hoher Radiallasten. Eine Anpassung des Prüfstands an den jeweiligen Freilauf typ erfolgt über die neue Prüflingsaufnahme, die abhängig von der jeweiligen Prüflingsgeometrie individuell konstruiert wird.

## Zusammenfassung

Das vorgestellte Prüfstandskonzept dient der Optimierung des Prüfaufbaus und einem flexiblerem Prüflingswechsel an dem bereits bestehenden Freilauf-Doppelprüfstand, damit eine zeiteffiziente Durchführung des versuchsintensiven Vorhebens möglich wird. Mit diesem Prüfstand kann der Einfluss einer zusätzlichen Radiallast auf die Freilauflebensdauer untersucht werden. Die neu entwickelte Prüfeinheit ermöglicht durch den in sich geschlossenen und vom restlichen Prüfaufbau abgekoppelten Aufbau die Möglichkeit, beliebige Freilauf typen und -geometrien ohne große Umbaumaßnahmen flexibel zu untersuchen. Die direkte Einleitung der Radiallast auf die Prüflinge kann direkt und ohne rechnerische Korrektur erfasst werden, sodass das Fehlerpotential noch einmal reduziert wird.

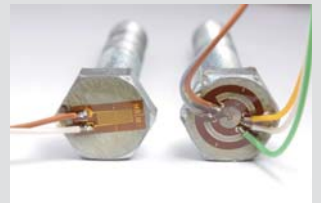
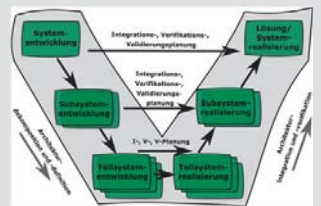
Der Einfluss der Radiallast auf die Freilauflebensdauer und die damit einhergehenden Lastverteilungen in einem Freilauf werden an dem Doppelprüfstand im Rahmen des Forschungsvorhabens 694 II – Freilauf kombinierte Lasten 2 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik analysiert. Die flexibel austauschbare Prüfeinheit ermöglicht die notwendigen Untersuchungen der geometrisch unterschiedlichen Klemmrollen- und Klemmkörperfreiläufe, die im Rahmen des genannten Forschungsvorhabens getestet 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 „Freilauf – kombinierte Lasten“ (FVA 694 II, IGF-Nr. 21066/N).

## Literatur

- /1/ Nagler, N; Lohrengel, A.: Einfluss kombinierter Lasten auf die Freilauflebensdauer – Konzept, Institutsmitteilung Nr. 38, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2013
- /2/ Martinewski, V; Ochse, G.: Sachstandsbericht zum FVA-Projekt 694 II Freilauf kombinierte Lasten 2; Technische Universität Clausthal, Universität Kassel; 2020



Hochschule und Kontakte





















D



## 15. Auflage Entwicklungsmethodik Projekt

Wächter, M.

*15 Jahre Entwicklungsmethodik Projekt - ein Ausblick in wie weit die methodische Entwicklung einer Lösung für eine konstruktive industrienaher Problemstellung im Rahmen einer Lehrveranstaltung semester-begleitend möglich ist.*

	1	2	3	4
Prüfling positionieren	 von Hand	 Kreuztisch	 Schiene	 Schraube
Prüfling fixieren	 Selbsthemmung	 Klammer	 Eigengewicht	 magnetisch
Messgerät positionieren	 von Hand	 Kreuztisch	 Schiene	 Spindel
Messgerät fixieren	 Klett	 Selbsthemmung	 magnetisch	 Bajonett
Schwingungen ausfiltern	 Anhängen	 Luftkissen	 Elastomere	 Maschendraht

*15 years of development methodology project - an outlook on the extent to which the methodical development of a solution for a constructive industry-related problem is possible within the framework of a course during the semester.*

### Lehrkonzept

Die Veranstaltung Entwicklungsmethodik ist aus der Veranstaltung Konstruktionslehre I hervorgegangen und ist eine Pflichtveranstaltung im Bachelorstudiengang Maschinenbau, ferner im Curriculum des Bachelorstudiengangs Verfahrenstechnik/ Chemieingenieurwesen und des Masterstudiengangs Wirtschaftsingenieurwesen als Wahloption verankert.

Die Lernziele der Veranstaltung werden darin gesehen, die Begriffe und Methoden der Produktentwicklung zu vermitteln und von den Teilnehmer\*innen anzuwenden, die verschiedenen Entwicklungsmethoden können zugeordnet, beurteilt und eingesetzt werden. Die Studierenden sollen eine praxisnahe Aufgabenstellung nach funktionalen Gesichtspunkten abstrahieren können und geeignete Methoden der Produktentwicklung auswählen, anwenden und bewerten. Darüber hinaus soll die Fähigkeit zu einer ergebnisorientierten Arbeit im Team gefördert werden.

In der Vergangenheit wurde der Fokus weniger auf die Lernziele gelegt, da standen die Lehrinhalte:

- Modellvorstellungen zum Produktentwicklungsprozess
- Methoden zur Lösungsfindung (diskursive Methoden, intuitive Methoden)
- Morphologischer Kasten, Konstruktionskataloge, Bionik, bewusstes Vorwärtsschreiten, Methode der Negation, V-Modell, Triz, Design Thinking, Disruption, Scrum
- Methoden zur Bewertung und Auswahl von Lösungen
- Methoden zur Planung und Durchführung von Entwicklungsprojekten

im Vordergrund, entsprechend wurden in schriftlicher oder mündlicher Form diese Lehrinhalte abgeprüft.

Mit der Berufung von Professor Lohrengel auf die Professur für Maschinenelemente und Konstruktionslehre wurden erstmalig im Wintersemester 07 / 08 die Erreichung der Lernziele in Form einer Projektarbeit abgeprüft. Gemeinsam mit einem Industriepartner wurde eine Themenstellung für eine Projektarbeit ausgearbeitet. In Teams von 4 Studierenden sollte nach der besten Lösung für die Problemstellung gesucht werden, dazu waren die in der Vorlesung vermittelten Lerninhalte anzuwenden.

Mit diesem Konzept änderte sich auch die zeitliche Struktur der Veranstaltung. In der Vergangenheit folgte wöchentlich auf eine Vorlesungseinheit (2 x 45 Minuten) eine Übungseinheit. Aktuell erstreckt sich die Vorlesung (3 x 45 Minuten) über die erste Semesterhälfte, daran schließt sich die Kick Off Veranstaltung zum Projektstart an und die Betreuung der Projektaufgabe erfolgt dann wöchentlich, dazu ist zu abgesprochenen Teilaufgaben ein Vertreter des Industriepartners vor Ort und kann gezielte Fragen der Teams beantworten. Der Industrievertreter wird dann von Professor Lohrengel zu den einzelnen Teams begleitet, so dass schon während der Bearbeitungsphase die unterschiedlichen Arbeitsweisen und Lösungsansätze in den einzelnen Teams erkennbar sind.

Erst im Rahmen der Abschlussveranstaltung, in der alle Teams ihre Lösungen präsentieren, bekommen alle Teams einen Einblick in die Ergebnisse der Mitbewerber. Warum Mitbewerber? Die Bewertung der Projektarbeit erfolgt zweigleisig. Von Institutsweise werden die Projektarbeiten bewertet unter dem Aspekt „Wie sind die vermittelten Lehrinhalte angewandt und in welcher Tiefe sind die Lernziele erreicht.“ Daraus ergibt sich in der Regel eine Note für das Team, die für alle Teammitglieder identisch ist. Sollte sich belegen lassen, dass die ergebnisorientierte Arbeit im Team nicht von allen Mitglieder in identischer Intensität erfolgte, kann es auch zu individuellen Notenanpassungen kommen. Der Industriepartner prämiert die aus seiner Sicht innovativste(n) Lösung(en). Die Prämierungen sind in der Vergangenheit recht unterschiedlich ausgefallen, so gab es z. B. Sachpreise, Gutscheine für Aktivitäten und auch die Möglichkeit im Rahmen eines Praktikums die Fortführung der Projektumsetzung zu begleiten.

In der Regel ist eine Exkursion zum Industriepartner Bestandteil des Konzeptes. Es zeigt sich, dass die Einblicke in das Unternehmen, im speziellen in die Fertigung, dem Projekt noch einmal einen Push geben.


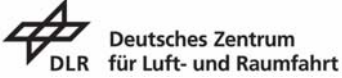


Ein Statement einer wissenschaftlichen Mitarbeiterin, die bei diesem Lehrkonzept in jedem Wintersemester mitwirken kann, ist: „Dies Format macht Arbeit, aber es ist jedes Semester wieder spannend und erfrischend.“

## Industriepartner und Projekte

In diesem Wintersemester wird das Konstruktionsprojekt als Prüfungsleistung des Moduls Entwicklungsmethodik nun bereits zum 15. Mal durchgeführt, dabei waren die bisherigen Aufgabenstellungen themenübergreifend ausgerichtet. In manchen Jahren waren für die Finalisierung der Aufgabenstellung einige Abstimmungsrunden erforderlich. Für das Konstruktionsprojekt soll der Einsatz der Methoden zur Lösungsfindung im Vordergrund stehen, Aufgabenstellung in denen der Fokus auf eine konstruktive Ausdetaillierung gerichtet ist, gehen nicht konform mit den Lernzielen. Nachfolgend eine Auslistung der Projektthemen und der Industriepartner.

**Tabelle 1:** Projektthemen und Industriepartner

Thema	Partner
Konstruktion einer lastabhängigen Bremse im Kniegelenk einer Beinprothese	 QUALITY FOR LIFE
Kleiner Oberflächenmessplatz	
Mähdrescher Reifendruckvariation	
Optimierung der Verbindung Waschraum - Antrieb	
Kennzeichnung von Schaltelementen	
Regelbare Volumenstromverteilung	
Zusammenführen Mikrofonkorb und Griff	
Entwicklung einer Lenkachsfederung für Gegengewichtsstapler	
Schaltkupplung für Nebenaggregat in Fahrzeugen	
Zentralschnittstelle	
Gesamtfahrzeugprüfstand	 The Power of Dynamic Testing

Aktivierungsmechanismus für Untertagewerkzeuge	
Bremsmechanismus für Nanosatelliten	
Mikropartikelfilter Waschautomat	
In-Ear-Kopfhörer	

### Zusammenfassung

Nunmehr über 15 Semester haben ca. 160 Projektteam die Herausforderung angenommen, eine Lösung für die verschiedensten Themenstellungen aus unterschiedlichen Branchen auszuarbeiten. Im stärksten Jahrgang wetteiferten 23 Teams um die beste Prämierung.

Im letzten Semester, welches auf Grund der Corona Pandemie komplett Online erfolgte, konnte am Institut hautnah erfahren werden, welche Entwicklung die Einsatzmöglichkeiten von Videokonferenzen für Projektbesprechungen erfahren haben. Vor sieben Jahre war erstmalig aufgrund der räumlichen Entfernung des Projektpartners der Versuch unternommen, die Projektbesprechung zwischen Industriepartner und Projektteams über Videokonferenzsystem abzuhalten. Damals kam man Einvernehmlich zu Ergebnis, dass virtuelle Besprechungen die absolute Ausnahme sein sollten. Im Corona Semester nahm nun nicht nur der Industrievertreter per Videokonferenz an den Teambesprechungen teil, sondern alle Teammitglieder standen so in Kontakt.

Die Ergebnisse und somit wohl auch die Zufriedenheit der Industriepartner sind von unterschiedlicher Qualität. Der unvoreingenommene Blick auf eine Problematik ergibt immer wieder Lösungen, die bei den Projektpartnern für Überraschung sorgten, Ideen werden zu Patenten angemeldet und/oder bis zur Produktreife weiterentwickelt.

Von Studierendenseite wird die Veranstaltung als arbeitsintensiv angesehen, die Anwendung der erlernten Methoden in einer praxisnahen Problemstellung aber durchweg gelobt.

Ich persönlich freue mich in jedem Wintersemester auf die Herausforderung und hoffe, dass der ein oder andere Industrievertreter\*in sich auch auf das Experiment einlassen und mit dem Institut und den Teilnehmern der Veranstaltung Entwicklungsmethodik eine Lösung für eine Problemstellung erarbeiten lassen möchte.







## Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

### 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 15 wissenschaftlichen Mitarbeitern /-innen. Weitere 8 Mitarbeiter/-innen und 1 Auszubildender arbeiten in der Verwaltung, IT, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

### Technische Ausrüstung

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

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf sieben Verspannprüfständen bis 1 MW, sechs Torsions-Schwingprüfständen bis 500 kNm, zwei kombinierten Umlaufbiege- und Torsionsprüfständen, einem statischen Torsionsprüfstand bis 5 kNm sowie zwei separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung und zwei Druckkammprüfständen durchgeführt werden. Für das Fügen von Naben auf Hohlwellen mit Innenhochdruck steht eine Maximator-Hochdruckanlage bereit. Für die Untersuchung von Freiläufen stehen zwei dynamische Servoschaltprüfstände mit zusätzlichen Axialbelastungseinheiten, zwei Lebensdauerprüfstände, ein dynamischer Servoschaltprüfstand mit zusätzlicher Radialbelastungseinheit, eine hochdynamische Belastungseinheit für stirnseitige Verschraubungen und ein statischer Prüfstand zur Ermittlung der Drehfedersteifigkeit zur Verfügung. Zur Prüfung förder technischer 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 Zer-kleinerung und einer zur Ver-einzelung ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an ver-fahrenstechnischen Maschinen. Für Untersuchungen an den genannten Maschi-nenteilen 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 elektrodynami-scher 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 maschi-nenakustischen Beurteilung von Maschinenstrukturen stehen gängige Analysever-fahren 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 Startlochbohr-maschine (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 und einen File-Server mit 80 TB. Als Standardsoftware für numerische Simulationen stehen eine Vielzahl von

Programmen zur Verfügung, u. a. ANSYS mit HPC-Option, ABAQUS und Creo Simulate.

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, eine DIMENSION BST 768 für den Bau von thermoplastischen Prototypen, 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 (Magics RP), 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 vier umfangreich ausgestattete PC-Arbeitsplätze zur Verfügung. Außerdem können Virtual-Reality-Demonstrationen mithilfe von Großbildmonitor und 3D-Shutterbrille inkl. Gestensteuerung durchgeführt werden.

Ganz neu am Institut ist ein Biomechaniklabor entstanden. Dieses beinhaltet ein Ergometer mit der Möglichkeit zur Ergospierometriemessung. Neben der Anwendung innerhalb der Forschung, steht es für die Durchführung des Biomechanikpraktikums in der Lehre zur Verfügung.

## **Kooperationsangebote**

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

### ***Entwicklung, Konstruktion und Fertigung***

- Entwicklung neuer Konstruktionen und Systeme
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen

### ***Versuche, Messungen und Berechnungen***

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM
- Erarbeitung von Berechnungsansätzen für Maschinenelemente
- Schadensfallanalysen
- DMS- und Schwingbeschleunigungs-Messungen unter Betriebsbedingungen an Maschinenteilen
- Durchführung von maschinenakustischen Untersuchungen und Optimierungen
- Durchführung von Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen auf den Prüfständen

### ***Beratung und Gutachten***

- Beratung, Untersuchung und Erstellung von Gutachten zur Bauteilfestigkeit
- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen

## **Forschungsschwerpunkte**

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

### ***Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen***

Neben allgemeinen Fragen der Grundlagen des Maschinenwesens wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente besonders im Vordergrund:

- Zahn- und Keilwellen-Verbindungen (Passverzahnungen)
- Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen
- Pressverbindungen mit Rändel
- Innenhochdruckgefügte und konventionelle Pressverbindungen mit geometrischen Schwächungen (z. B. Axial- oder Radialbohrungen in Welle und / oder Nabe)
- Kreuz- und Gleichlauf-Gelenkwellen
- Nichtschaltbare Kupplungen mit Ausgleichsfunktion
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt)
- Stahldrahtseile und Kunststoffseile
- Freiläufe
- Druckkamm als Axiallager in Getrieben
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Konstruktion von Maschinen für das Recycling

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der elastoplastischen Beanspruchung von Maschinenelementen und der Entwicklung von Berechnungssoftware für Maschinenelemente.

### ***Maschinenakustik***

Im Rahmen der Maschinenakustik werden Forschungsarbeiten zur Lärminderung von Bauteilen und Maschinensystemen durchgeführt. Für experimentelle Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanz- und Dämpfungselementen steht entsprechende Messwerterfassungs- und Verarbeitungshardware und -software zur Verfügung.

### ***Rapid Prototyping / Rapid Tooling / Additive Manufacturing***

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet Rapid Prototyping / Rapid Tooling / Additive Manufacturing umfassen die gesamte Rapid Tooling Verfahrenskette. Mit dem Anwendungslabor „openTUCreate“ steht dieses Wissen und seine Umsetzung den regionalen Firmenanwender offen.



## Veröffentlichungen des Institutes seit 2012

### Veröffentlichungen 2021

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

### Veröffentlichungen 2020

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

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

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

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

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

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

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

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

### Veröffentlichungen 2019

Stromberg, H.; Lohrengel, A.; Wesling, V.: Abschätzen kritischer Kerben mit neuronalen Netzen. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 1. und

2. Oktober 2019 in Aachen, Seite 112 – 123. <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2019-08781>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Veröffentlichungen 2018

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

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

Wild, J.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Optimierung der Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen in erweiterter Form. In: Tagungsband zur 8. VDI-

Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 155 – 164, ISBN 978-3-18-092337-6

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

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

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

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

Mörz, F.; Schäfer, G., Wild, J.; Selzer, M.; Ziaei, M.: FVA-742 II, 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 Druckkammern aus der Mischreibung in die Vollschmierung aufgenommene Rauheitsschriebe. <http://dx.doi.org/10.21268/20170623-152310>. Version: Juli 2017

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

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

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

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

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

## Veröffentlichungen 2016

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Wendler, J.; Wild, J.: Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen: Tragfähigkeit von Profildellen (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 17<sup>th</sup> 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; 6<sup>th</sup> 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.: Druckkammlagerungen 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 16<sup>th</sup> 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 TiB<sub>2</sub>-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 Profیلwellen (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

## Veröffentlichungen 2012

Heinze, T.; Lohrengel, A.; Stahr, K.: Dimensionierung von Seiltrieben - zum Verformungsverhalten von Faserseilen; Hebezeuge Fördermittel - Fachzeitschrift für Technische Logistik, 7-8/2012; ISSN 0017-9442, August 2012

Thoden, D.; Lohrengel, A.; Stahr, K.: Finite Elemente Design als Konstruktionsmethode für lärmarme Produkte; In: Hanselka, H. (Hrsg.): Fortschritte der Akustik - Tagungsband der 38. Deutschen Jahrestagung für Akustik DAGA 2012 in Darmstadt, S. 167-168; ISBN: 978-3-939296-04-1, Berlin, 2012.

Schäfer, G.: Neuerungen in der Berechnung von Passverzahnungen – Der Festigkeitsnachweis; 5. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2012, VDI-Berichte 2176, S. 197-210, ISBN 978-3-18-092176-1

Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Klüß, D.; Ruther, C.: Akustische Charakterisierung von organischem Gewebe. Fortschritte der Akustik: DAGA 2012, 38. Jahrestagung für Akustik, 19.-22. März 2012 in Darmstadt, ISBN: 978-3-939296-04-1

Lohrengel, A.; Schmelter, R.; Schäfer, G.: effects of locale property changing of hardable sheetmetals to transmission of sound, International Conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Turin 18.-20.06.2012

Hartlieb, B.; Müller, N.; Schröder, B.: Normung für Kleinunternehmen aus Industrie und Handwerk, 1. Auflage Berlin, Beuth, ISBN: 978-3-410228-30-1

Amorim, F.L.; Lohrengel, A.; Neubert, V.; Higa, C.F.; Czelusniak, T.: Selective Laser Sintering of Mo-CuNi Composite to be Used as EDM Electrodes, Rapid Prototyping Journal. 2012

Müller, N.; Siemann, E.: Generative Fertigung in der Produktentwicklung – Schicht für Schicht zum Bauteil, (2012), Ingenieur Spiegel (ISSN 1868-5919)

Amorim, F.L.; Müller, N.; Schäfer, G. ; Bassani, I.; Higa, C.F.; Noronha, M.A.; Czelusniak, T.: "Producing EDM Electrodes using Selective Laser Sintering: Conventional Materials", Advanced Materials Research. 2012

Nagler, N.: FVA-653 I, Axiale Belastbarkeit der Freiläufe, Zwischenbericht, Forschungsreport 2012, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2012

Mänz, T.: FVA-658 I, Untersuchungen von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Zwischenbericht, Forschungsreport 2012, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2012

Nangue, A.: FVA-467 II, Tragfähigkeit von Profilverbindungen (Zahnwellen-Verbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen, Zwischenbericht, Forschungsreport 2012, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2012

Schäfer, G.: FVA-591, FVA-Berechnungsrichtlinie für Zahnwellen-Verbindungen, Zwischenbericht, Forschungsreport 2012, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2012

## Erschienenene Institutsmitteilungen seit 2009



Institutsmitteilung 2009



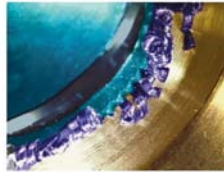
Institutsmitteilung 2010



Institutsmitteilung 2011



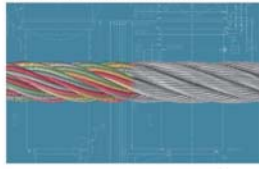
Institutsmitteilung 2012



Institutsmitteilung 2013



Institutsmitteilung 2014





Die jeweiligen Institutsmittellungen 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

**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

**Kaczmarek, Dennis:** Jahrgang 1991, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.12.2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
kaczmarek@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

**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

**Maume, Elke:** Jahrgang 1991, studierte Mechatronik-Automatisierungssysteme an der HS Harz und Mechatronik an der HS Nordhausen, seit 01.07.2020 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.  
maume@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

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

stoek@imw.tu-clausthal.de

**Stromberg, Henrik:** Jahrgang 1992, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.10.2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

stromberg@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

**Wallat, Phillip:** Jahrgang 1988, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Clausthal, seit 01.04.2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

wallat@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.

