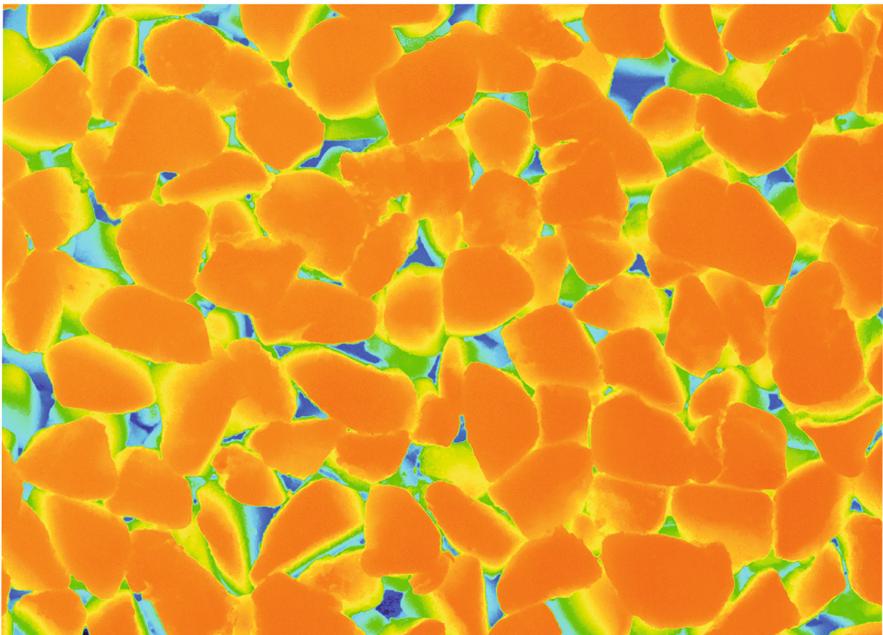




# TU Clausthal

## Institutsmitteilung 2019



Mitteilungen aus dem  
Institut für Maschinenwesen  
der  
Technischen Universität Clausthal  
Nr. 44  
(Dezember 2019)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Redaktion und Layout:

Dr.-Ing. Günter Schäfer, Viktor Martinewski M. Sc., 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:

Ein mittels Laserscanningmikroskop gemessenes Höhenprofil einer Absorberplatte, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird. Die gemessene Porosität wird auf Eignung als Akustikabsorber geprüft.

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



## Inhaltsverzeichnis

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

### A: Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

<i>Heinrich, C.:</i> Steigerung des Verzahnungswirkungsgrades im Teillastbereich durch Druckkammeinsatz .....	5
<i>Erck, M.; Stromberg, H.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.:</i> Formzahl für geradflankige Passverzahnungen.....	13
<i>Mörz, F.:</i> Einflüsse auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen.....	19
<i>Schäfer, G.:</i> Zahnwelle 3.0 .....	29
<i>Stök, M.:</i> Vergleich der Beanspruchung einer Faser- und Stahlseilbewickelten Steiltrommel.....	33

### B: Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

<i>Scherf, S.:</i> Restriktionsgerechte Strukturoptimierung mit CFD für die metalladditive Fertigung.....	45
<i>Wallat, P.:</i> Einflussfaktoren einer Recycling-gerechten Konstruktion auf die Linear- und Kreislaufwirtschaft.....	47

## C: Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.:</i> Systemgrößenmodellierung mit neuronalen Netzen – Ergänzung zur Baugruppenoptimierung .....	61
<i>Prumbohm, M.:</i> Zerlegen statt zerkleinern, lohnt sich das? .....	77
<i>Rehmet, R.; Freundt, F.; Weilandt, T.:</i> Schallabsorber-Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen .....	81

## D: Hochschule und Kontakte

<i>Martinewski, V.:</i> Biomechanik Praktikum .....	89
<i>Rehmet, R.; Martinewski, V.; Wallat, P.:</i> Maschinentechnische Exkursion .....	97
<i>Wallat, P.; Wächter, M.; Lohrengel, A.:</i> Techniker2Bachelor, Hürden bei der Basisanrechnung.....	105
<i>Losch, M.:</i> Wege ins Studium.....	109

## Ausstattung etc.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwer- punkte des Institutes.....	115
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 01.01.2012 .....	121
Erschienenere Institutsmitteilungen seit 2007.....	132
Autoren .....	136
Anfahrt .....	138

## Vorwort

Liebe Freunde des Instituts für Maschinenwesen,

auf den Clausthaler Winter ist erfreulicherweise immer noch Verlass, jedenfalls in diesem Jahr. Draußen vorbeifliegende Schneeflocken geben einen passenden Rahmen für das nahende Weihnachtsfest. Der langjährigen Tradition folgend, möchten wir Ihnen auch mit dieser Institutsmitteilung einen hoffentlich interessanten Einblick in die aktuellen Arbeiten des IMW geben und uns gleichzeitig bei Ihnen für die angenehme Zusammenarbeit in diesem Jahr bedanken.

Circular Economy! Das hört sich nicht nur gut an und passt hervorragend in die aktuelle politische Diskussion. Die Circular Economy ist gleichzeitig auch der rote Faden, der uns als Institute einer rohstofforientierten Technischen Universität eigentlich schon immer miteinander verbunden hat und in Zukunft auch verbinden wird. Die Effizienzsteigerung technischer Systeme und die Entwicklung kreislauffähiger Produkte spielen am Institut für Maschinenwesen daher eine wichtige Rolle.

In diesem Kontext bearbeiten wir inzwischen mehrere Forschungsprojekte. Einige davon werden in der diesjährigen Institutsmitteilung vorgestellt. Da ist z. B. das Projekt von Herrn Rehm, der zusammen mit Forschern der Universität Göttingen einen neuartigen Schallabsorber aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt. Die Göttinger Kollegen bringen die Materialexpertise ein und wir sind für die geforderten akustischen Produkteigenschaften zuständig.

Im Rahmen des von der EU geförderten KIC EIT „Raw Materials“ haben wir erfreulicherweise das Projekt CRAFTH bewilligt bekommen. Zusammen mit Forschern aus Finnland, Frankreich, Niederlande, Belgien und Italien wollen wir in mehreren Industrieworkshops zukünftige Produkte gemäß den Regeln der recyclinggerechten Konstruktion (circular design) so gestalten, dass sie für die Kreislaufwirtschaft geeignet sind. Herr Wallat und Herr Grasser behandeln diese Thematik in Ihrem Beitrag vor allem auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit. Herr Prumbohm erörtert in seinem Artikel die Frage der Wirtschaftlichkeit in Bezug zum Zerkleinerungsprozess von Altfahrzeugen.

Die Effizienzsteigerung ist das verbindende Thema mehrerer Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Welle-Nabe-Verbindungen. Herr Mörz konnte in seinem Projekt die Übertragbarkeit des Rändelpressverbands sogar soweit steigern, dass die Verbindung nicht mehr das schwächste Glied der Kette darstellt, sondern das Versagen im Bereich der nicht gerändelten Welle auftritt. Die Beiträge von Herrn Stromberg, Dr. Schäfer und Herrn Erck stellen den weiterentwickelten Stand der Zahnwellenberechnung vor und Herr Heinrich kann in seinem Artikel zeigen, dass auch für klassische Stirnradgetriebe das Ende der Wirkungsgradsteigerung noch nicht erreicht ist, wenn man sich der Druckkammtechnik bedient.

Bei der Optimierung von Systemen sind die Herausforderungen besonders hoch, wenn man unter der Vielzahl der Einflussgrößen die jeweils beste Konstruktionsvariante herausfinden möchte. Herr Kaczmarek nutzt in seinem Projekt dafür neuronale Netze, um einen neuartigen Verdichtertyp zu entwickeln.

Ähnlich komplex ist das Zusammenspiel zwischen Seil und Winde in mehrlagig bewickelten Seiltrieben. Der Ersatz eines Drahtseils durch ein modernes Faserseil ist daher aufgrund der stark unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse der Seiltypen im Vorfeld genau zu untersuchen. Herr Stök gibt in seinem Artikel wertvolle Hinweise zur erfolgreichen Umsetzung.

Ein ebenso wichtiger Teil der Institutsarbeit ist natürlich die Lehre. Die Durchführung der Maschinentechnischen Exkursion, die Einrichtung eines neuen Praktikums für die Studienrichtung Biomechanik, die Erarbeitung einer Basisanrechnung für Techniker und der Aufbau von Internetskursen für Studieninteressierte aus dem Ausland; dies sind ein paar Aktivitäten, die uns in diesem Jahr zusätzlich zu den üblichen Lehrveranstaltungen beschäftigt haben und zu denen Sie im Heft weitere Informationen finden.

Bezüglich der Studienanfänger gibt es Positives zu berichten, denn entgegen dem allgemeinen Trend haben wir im Maschinenbau gegenüber dem Vorjahr sogar mehr Einschreibungen verzeichnen können. Auch die Mannschaft des IMW ist stabil geblieben.

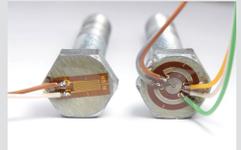
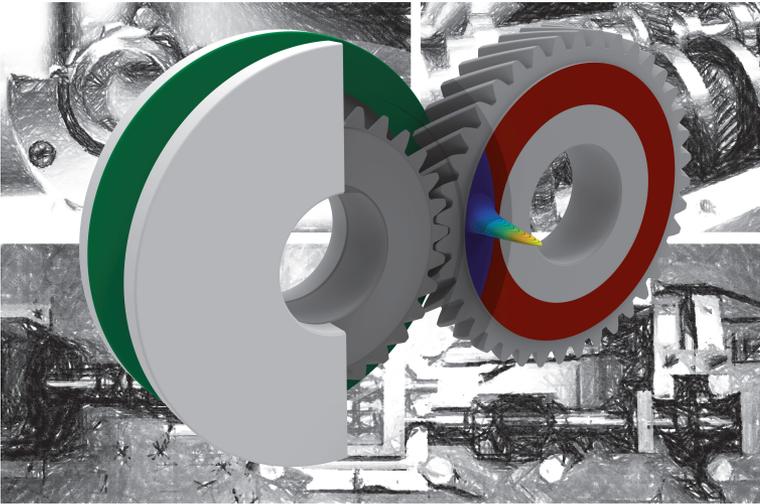
Obwohl wir ihn nur schweren Herzens gehen lassen, hat Prof. Norbert Müller inzwischen seinen wohlverdienten Ruhestand angetreten. Norbert, ich hoffe, wir sehen uns trotzdem noch möglichst oft am IMW. Bis zur Wiederbesetzung wird Herr Dr. Inker mann die Professur Rechnerintegrierte Produktentwicklung verwalten. Herzlich willkommen am IMW.

Die Herren Dr. Hofmann, Dr. Stahr, Dr. Jakob und Dr. Schulze haben in 2019 erfolgreich Ihre Promotion abgeschlossen und sind alle in anspruchsvollen Positionen in der Industrie tätig. Frau Losch, Herr Heinrich und Herr Stromberg sind neu an Bord gekommen.

Wir, die Mitarbeiter des IMW, wünschen Ihnen nun ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes und erfolgreiches Jahr 2020.



A



## Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

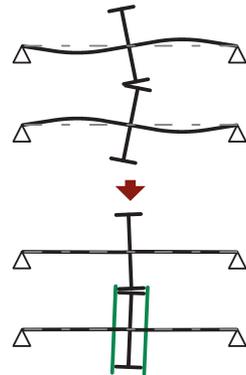




## Steigerung des Verzahnungswirkungsgrads im Teillastbereich durch Druckkammeinsatz

Heinrich, C.

*Mit Druckkämmen kann die Wellenbiegung aufgrund des Kippmoments von Schrägverzahnungen reduziert werden. Die so erwirkte Reduktion der notwendigen Flankenlinienkorrekturen führt im Teillastbereich zu einem besseren Tragverhalten der Verzahnung, welches eine geringere Verlustleistung bedeutet.*



*Thrust cones reduce the shaft deflection induced by the tilting moment of helical gears. The obtainable reduction in flank line corrections leads to better load-bearing behaviour of the gears at partial load, which entails lower power losses.*

### Problemstellung

Unter Last kommt es in Getrieben aufgrund der elastischen Deformation der Bauteile zu Ausrichtungsfehlern in der Verzahnung. Diese führen im Vergleich zur fehlerfreien Ausrichtung zu Lastüberhöhungen in Zahnflanke und -fuß. Mit Flankenlinienkorrekturen in Form von bspw. Schrägungswinkelkorrekturen, Endrücknahmen oder allgemeinen Topologiemodifikationen kann diesen entgegengewirkt werden. Flankenlinienkorrekturen werden aus Festigkeitsgründen für den Fall des maximal auftretenden Drehmoments ausgelegt. Bei niedrigen Drehmomenten führen diese Korrekturen dann zu einem ungleichmäßigen Tragverhalten bis hin zu einem einseitig aufklaffenden Kontakt, d.h. einer Reduktion der tragenden Flankenbreite. Aus der Literatur /1, 2/, oder auch durch Analyse der Position der Variablen Verzahnungsbreite in empirischen Verzahnungsverlustleistungsberechnungsgleichungen wie /3/ oder /4/, kann leicht festgestellt werden, dass breitere Kontakte zu einer geringeren lastabhängigen Zahnradverlustleistung führen. Dies ist auf die geringere Schmierstoffscherung aufgrund der kleineren Hertzschen Abplattung und höheren Parallelsplathöhe bei breiteren Kontakten zurückzuführen. Während insbesondere Industriegetriebe hauptsächlich um ihren Nennbetriebspunkt herumlaufen, werden beispielsweise Getriebe für Elektroautos überwiegend im Teillastbereich gefahren. Das suboptimale Tragverhalten in diesem Bereich stellt ein Potential zur Wirkungsgradsteigerung dar.

Mit Druckkämmen können Axialkräfte aus Schrägverzahnungen verzahnungsnah kompensiert werden. Somit kommt es im Vergleich zur Axialkraftleitung bis in das Gehäuse in der konventionellen, druckkammfreien Konstruktionsvariante zu einer

geringeren Wellenbiegung durch das Kippmoment (vgl. Titelbild). Bei geringerer Wellenbiegung kann die Flankenlinienkorrektur geringer ausfallen und das Tragbild im Teillastbetrieb verbessert werden. Der Einfluss auf die lastabhängige Verzahnungsverlustleistung soll im Folgenden untersucht werden.

## Methodik

Aufgrund des großen Umfangs der eingesetzten Berechnungsverfahren werden diese nicht vollständig wiedergegeben, sondern nur benannt. Dabei wird zum Zweck einer schnellen Berechnung nicht das am Institut vorhandene Druckkamm-simulationsprogramm auf Verzahnungen umfunktioniert, sondern die verbreitete Methode zur Auslegung von Verzahnungsmikrogeometrien angewandt.

Zur Ermittlung der lokalen Lastüberhöhung aufgrund der Kontaktlinienabweichung wird der Ansatz von Weber und Banaschek /5/ in der in /6/ dokumentierten Ausführung implementiert. Hierbei wird die Verzahnung in axialer Richtung in Segmente unterteilt, deren jeweilige Gesamtnachgiebigkeit aus den Anteilen Biegenachgiebigkeit, Schubnachgiebigkeit, Radkörpernachgiebigkeit und Nachgiebigkeit bzgl. Hertzscher Pressung zusammengesetzt wird. Die Wirkung von segmentweisen Punktlasten auf Nachbarsegmente wird über eine Verformungseinflussfunktion bestimmt. Die Berücksichtigung der erhöhten Nachgiebigkeit des Zahns an dessen Körperkanten wird bei der für unendlich ausgedehnte Zähne definierten Einflussfunktion durch Spiegelung der außerhalb des Zahns folgenden rechnerischen Verformungen um die Kante realisiert.

Mit auf diesem Wege aufgestellten Nachgiebigkeitsmatrizen für jeden Zahn im Eingriff wird eine Summe aus konstanter Kontaktlinienverschiebung, -abweichung, und -korrektur gesucht, die zu einer der drehmomentbedingten Zahnnormalkraft entsprechenden Kräftesumme führt.

Die Kontaktlinienabweichung setzt sich zusammen aus den Herstellungsabweichungen minus Einlaufbetrag und der Abweichung aufgrund der elastischen Verformung. Die Herstellungsabweichung wird mit linearerem Verlauf über die Verzahnungsbreite aufgebracht; der maximale Wert wird durch Überlagerung von Toleranzwerten nach IT-Klasse aus DIN ISO 1328-1 /7/ und DIN 3964 /8/ nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ermittelt. Der Einlaufbetrag wird nach DIN 3990-1 /9/ berechnet. Die Gehäuseverformung ist gegenüber der Wellenverformung vernachlässigbar /6/. Lagefehler aufgrund der Lagerluft können in den meisten Fällen durch geschickte Wahl der konstruktiven Anordnung kompensiert werden. Die Torsionsverformung wird analytisch berechnet.

Die Bestimmung der Wellenbiegeline und somit Zahnradschiefstellung wird mit einem vereinfachten FE-Modell in Ansys Workbench durchgeführt, um die versteifende Wirkung durch den Radkörper und die Lagersteifigkeit präzise abbilden zu können. Die Wälzlagersteifigkeit wird nach DIN 3990-1 /9/ bestimmt, wobei keine Vorspannung angenommen wird, und über COMBI214-Elemente in die FE-Rechnung integriert.

Die Bestimmung der Reibung in Abhängigkeit der errechneten Linienlastverteilung folgt /1/. Dabei wird die zentrale Schmierstalthöhe in einem Segment nach Chittenden, Dowson et al. /10/ in eine Reibwertberechnung nach Evans und Johnson /11/ für thermoelastohydrodynamische Schmierung unter Berücksichtigung von Festkörperkontakt eingesetzt.

## Beispiel

Eine beispielhafte Rechnung wird an einem an eine E-Achse angelehnten Getriebe mit den in Tabelle 2 aufgeführten Eckdaten durchgeführt. Dabei sitzen die Zahnräder wie im Titelbild mittig zwischen den Lagern.

Der Lagerabstand ist hier sehr kurz gehalten; bei mehrstufigen Getrieben ist dieser zwangsweise größer, was zu einer stärkeren Wellenbiegung inklusive Zahnrad-schiefstellung durch Umfangs- und Radialkraft führen würde. Eine weitere Verschärfung der Problematik ließe sich bspw. durch höhere Schrägungswinkel oder weniger steife Lager in der konventionellen Variante ohne Druckkamm erzielen.

Zum Ausgleich der Fertigungsfehler (Verzahnungsqualität IT 6) wird eine Ritzelbombierung mit einer maximalen Rücknahme von 5  $\mu\text{m}$  vorgesehen. Die Flankenlinienkorrektur zum Ausgleich der elastischen Verformungen wird jeweils für das maximale Drehmoment als Freiform optimiert.

Die ermittelten Kippwinkel für die verschiedenen Konfigurationen und Lastfälle sind in Tabelle 3 aufgeführt.

In Abbildung 1 ist die Linienlastverteilung für eine konventionelle Lagerung (angestellte Kegelrollenlager ohne Druckkamm) ohne Korrektur der elastischen Verformungen, jedoch mit Korrektur der Fertigungsfehler (Bombierung) dargestellt. Mit Korrektur der elastischen Verformung (Abbildung 2) lässt sich eine Homogenisierung des Lastverlaufs und eine geringere Spitzenlast erreichen.

In den Abbildungen 3 & 4 wird die Linienlastverteilung für eine konventionelle und eine Druckkammkonstruktion bei 25 % Last verglichen. Eindeutig erkennbar ist die größere Länge des nicht aufgeklafften Kontaktes beim Druckkammeinsatz in Abbildung 4.

Die so ermittelten Verlustleistungen der Verzahnung für zwei Teillaststufen, 25 % und 10 % Drehmoment bei  $5000 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl, sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der rechnerische Gewinn bei niedrigen Drehmomenten ist signifikant.

	konventionell	Druckkamm	Reduktion
25 % Last	300 W	273 W	9 %
10 % Last	107 W	83 W	22 %

Tabelle 2: Daten des Beispielgetriebes

<b>Verzahnung</b>		<b>Wellen</b>	
Zähnezahlen	27 / 84	Lagerabstand	110 mm
Modul	2,5 mm	<i>Antrieb</i>	
Zahnbreite	48 mm	Außendurchmesser	40 mm
Eingriffswinkel	20°	Innendurchmesser	30 mm
Schrägungswinkel	20°	<i>Abtrieb</i>	
Profilverschiebungen	0 mm / 0 mm	Außendurchmesser	50 mm
<b>Belastung</b>		Innendurchmesser	40 mm
Nennleistung	300 kW	<b>Lager</b>	
Antriebsmoment	573 Nm	<i>konventionell</i>	
Antriebsdrehzahl	5000 min <sup>-1</sup>	Antrieb	2 x 30208
Schmierstoff	ISO VG 46 @ 40 °C	Abtrieb	2 x 30210
<b>Werkstoff</b>		<i>Druckkammvariante</i>	
E-Modul	210 GPa	Antrieb	2 x NU 208
Querkontraktionszahl	0,3	Abtrieb	NU 210, NUP 210

Tabelle 3: Kippwinkel in rad (Bogenmaß)

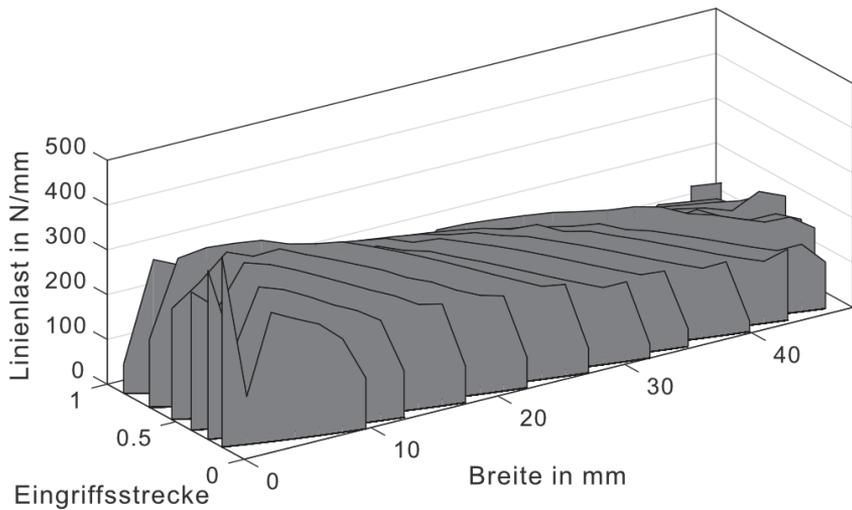
	konventionell		Druckkamm	
	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
100 % Last	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
25 % Last	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$
10 % Last	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$

## Fazit

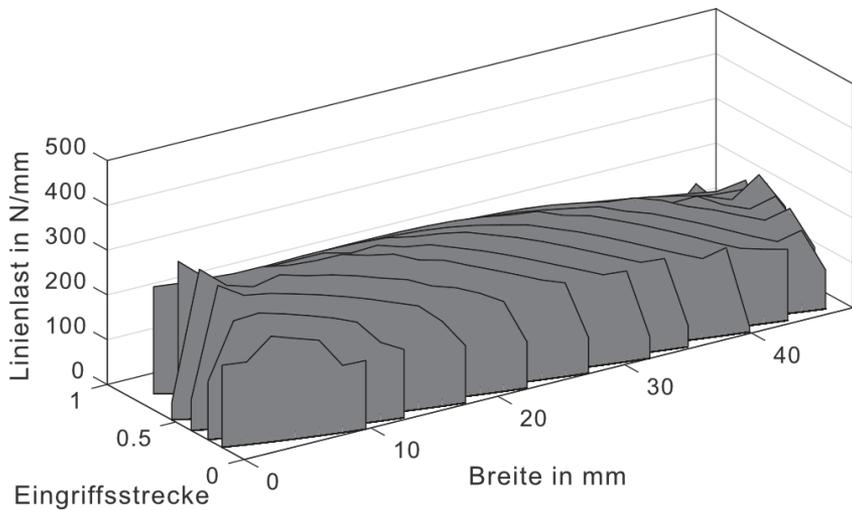
Bereits durch den Austausch von axialkraftbedingt notwendigen Kegelrollenlagern gegen axial lastfreie effizientere Wälzlagertypen und Druckkämme kann eine signifikante Wirkungsgradsteigerung erzielt werden /12/.

Der beschriebene Effekt stellt eine weitere Steigerung dar, welche ohne Zusatzaufwand ebenfalls ausgenutzt werden kann. Die Verzahnungsverluste dominieren üblicherweise oder entsprechen den Wälzlagerverlusten /13, 14/, wobei die restlichen Beiträge zur Gesamtleistung vergleichsweise klein sind.

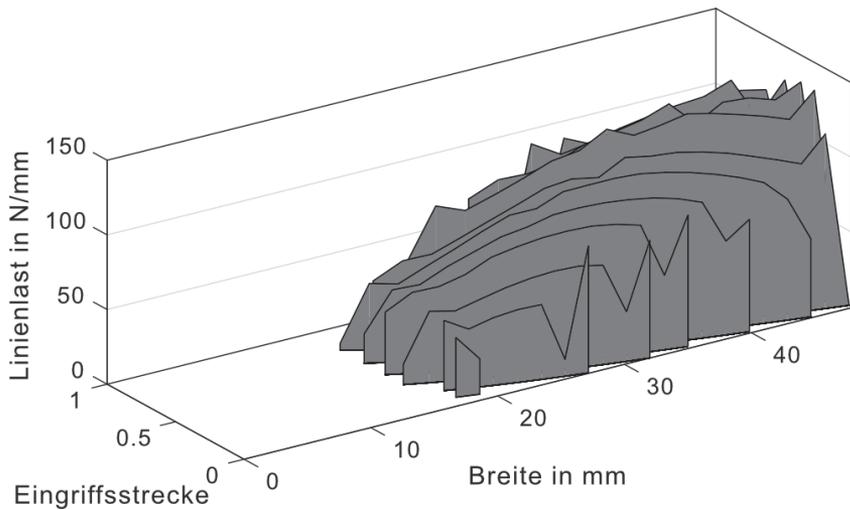
Der vorgestellte Zusammenhang ist insbesondere bemerkenswert, da er auch bei bereits effizienzoptimierten Verzahnungen, wie z.B. Low-Loss-Verzahnungen, Wirkung zeigt.



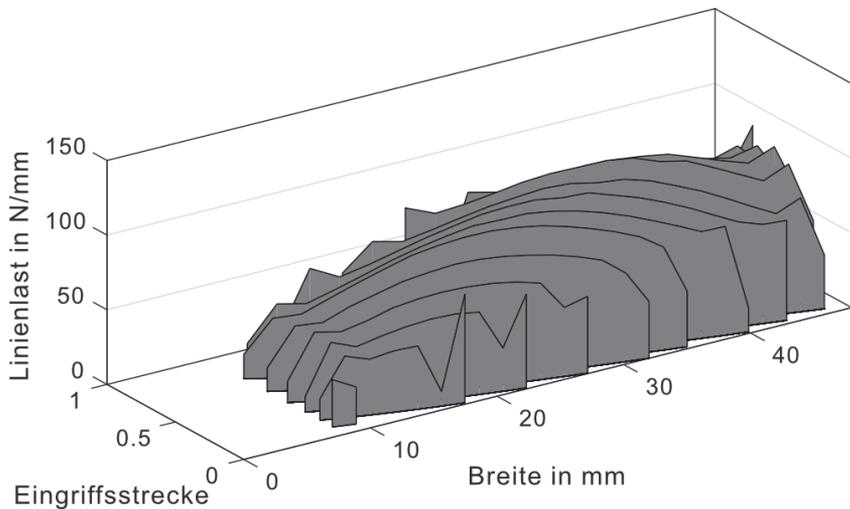
*Abbildung 1: Linienlastverteilung bei 100 % Last, konventionelle Konstruktion, Flankenlinienkorrektur nur Bombierung*



*Abbildung 2: Linienlastverteilung bei 100 % Last, konventionelle Konstruktion, Flankenlinienkorrektur optimiert*



**Abbildung 3:** *Linienlastverteilung bei 25 % Last, konventionelle Konstruktion, Flankenlinienkorrektur für Volllast optimiert*



**Abbildung 4:** *Linienlastverteilung bei 25 % Last, Druckkammkonstruktion, Flankenlinienkorrektur für Volllast optimiert*

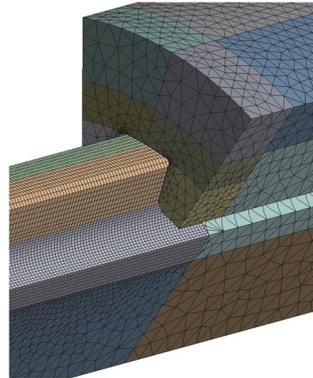
## Literatur

- /1/ Elisaus, V.; Mohammadpour, M.; Theodossiades, S. & Rahnejat, H.: Tribological Investigation of Truncated thermo-Elastohydrodynamic Elliptical Point Contacts in High Performance Transmissions. In: 3rd Biennial International Conference on Powertrain Modelling and Control. Loughborough, 2016
- /2/ Fatourehchi, E.; Mohammadpour, M.; King, P. D.; Rahnejat, H.; Trimmer, G.; Womersley, B. & Williams, A.: Effect of tooth microgeometry profile modification on the efficiency of planetary hub gears. In: 3rd Biennial International Conference on Powertrain Modelling and Control. Loughborough, 2016
- /3/ ISO/TR 14179-1:2001-07: Zahnradgetriebe - Wärmehaushalt - Teil 1: Berechnung von Zahnradgetrieben bei 95 °C Ölsumpftemperatur, 2001
- /4/ Ohlendorf, H.: Verlustleistung und Erwärmung von Stirnrädern, Technische Universität München, Dissertation, 1958
- /5/ Weber, C.; Banaschek, K. & Niemann, G.: Formänderung und Profilirücknahme bei gerad-und schrägverzahnten Rädern. Braunschweig : F. Vieweg, 1955
- /6/ Linke, H. & Börner, J.: Stirnradverzahnung: Berechnung, Werkstoffe, Fertigung. München : Hanser, 1996
- /7/ DIN ISO 1328-1:2018-03: Zylinderräder - ISO-Toleranzsystem - Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken
- /8/ DIN 3964:1980-11: Achsabstandsabmaße und Achslagetoleranzen von Gehäusen für Stirnradgetriebe
- /9/ DIN 3990-1:1987-12: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Einführung und allgemeine Einflußfaktoren
- /10/ Chittenden, R. J.; Dowson, D.; Dunn, J. F. & Taylor, C. M.: A Theoretical Analysis of the Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Concentrated Contacts. II. General Case, with Lubricant Entrainment along Either Principal Axis of the Hertzian Contact Ellipse or at Some Intermediate Angle. In: Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Bd. 397 (1985), Nr. 1813, S. 271–294
- /11/ Evans, C. R. & Johnson, K. L.: Regimes of Traction in Elastohydrodynamic Lubrication. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science Bd. 200 (1986), Nr. 5, S. 313–324
- /12/ Heß, M.: Einsatz von Druckkämmen zur Effizienzsteigerung von schrägverzahnten Getrieben, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2018
- /13/ Laruelle, S.: Etude du comportement thermique d'un motoréducteur, INSA Lyon, Dissertation, 2017
- /14/ Höhn, B.-R.; Michaelis, K. & Hinterstoißer, M.: Optimization of gearbox efficiency. In: GOMABN, Goriva i maziva. Bd. 48.4 (2009), S. 441–480

## Formzahlen für geradflankige Passverzahnungen

Erck, M.; Stromberg, H.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.

*Um einen präzisen Festigkeitsnachweis von geradflankigen Passverzahnungen nach DIN 743 oder der FKM Richtlinie zu ermöglichen werden Formzahlen benötigt, die von den Geometrienormen nicht bereitgestellt werden. Es steht nur eine grobe Abschätzung aus DIN 743-2 zur Verfügung. Dieser Mangel motiviert die numerische Ermittlung von Torsionsformzahlen für Geometrie nach DIN 5464 und ISO SAE J499.*



*In order to enable a precise proof of durability according to DIN 743 or the FKM guideline for parallel side spline hub connections stress concentration factors are required which are not provided by the geometry standards. DIN 743-2 only provides a rough estimation. This shortage motivates a numerical identification of stress concentration factors for torsion loads for geometry according to DIN 5464 and ISO SAE J499.*

### Stand der Technik

Insbesondere bei der Verwendung dünner Naben ist der Einsatz evolventischer Passverzahnungen nach DIN 5480 oder ähnlichen Normen teils problematisch, da es unter Belastung zu einer Gleitbewegung über die Flanke kommt, bei der die Nabe durch Radialkräfte aufgeweitet wird /1/. Hierbei sinkt das übertragbare Drehmoment, da sich die Überdeckung verringert und der wirksame Hebelarm am Zahn steigt. Zudem führt die Mikrobewegung zu erhöhtem Verschleiß. Daher werden in derartigen Fällen geradflankige Passverzahnungen eingesetzt.

DIN 5464 stellt ausschließlich die Geometrie bereit und liefert keine Auslegungsgrundlage. DIN 743-2 beinhaltet nur eine Abschätzung der Kerbwirkungszahl in Abhängigkeit des Kopfkreisdurchmessers. Im Falle der ISO SAE J499 beinhaltet die Norm eine Formel zur Auslegung, die allerdings ohne Berücksichtigung von Fußrundungsradius und Werkstoff nur einen groben Anhaltspunkt liefern kann.

Für eine zweckmäßige Auslegung geradflankige Verzahnungen werden Formzahlen benötigt, um einen Festigkeitsnachweis nach DIN 743 oder der FKM Richtlinie führen zu können. Da diese im Stand der Technik nicht vorhanden sind, wurden im Rahmen einer Projektarbeit /2/ numerisch Formzahlen für geradflankige Verzahnungen nach DIN 5454 und ISO SAE J499 bestimmt.

## Modellaufbau

Im Rahmen der beschriebenen Untersuchung wurden reine Torsionslasten betrachtet. Somit kann die Rotationssymmetrie ausgenutzt und die FEM Simulation als Sektor-Modell aufgebaut werden.

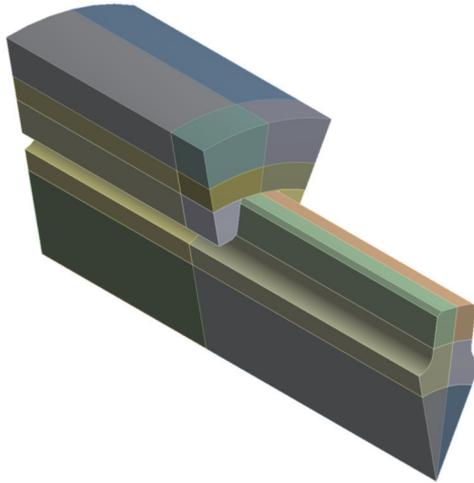


Abbildung 1: Sektormodell

Beide Geometrienormen geben eine Auswahl wählbarer Durchmesser und Zähnezahlen vor. Daher wird keine Interpolation zwischen einzelnen Geometrien benötigt und es können alle genormten Geometrien auch numerisch untersucht werden. Dies trifft allerdings nicht auf den Fußrundungsradius der Welle zu, der in beiden Normen frei wählbar ist. Da der Stand der Forschung zu evolventischen Zahnwellenverbindungen eine starke Abhängigkeit der Formzahl vom Fußrundungsradius zeigt, wird der Fußrundungsradius der Welle in dieser Untersuchung variiert.

Als Versagensort wird entsprechend dem Ergebnis von Voruntersuchungen die Oberfläche des Fußrundungsradius der Welle untersucht. In diesem Bereich wird ein verfeinertes Netz aus Hexaedern mit quadratischen Ansatzfunktionen verwendet.

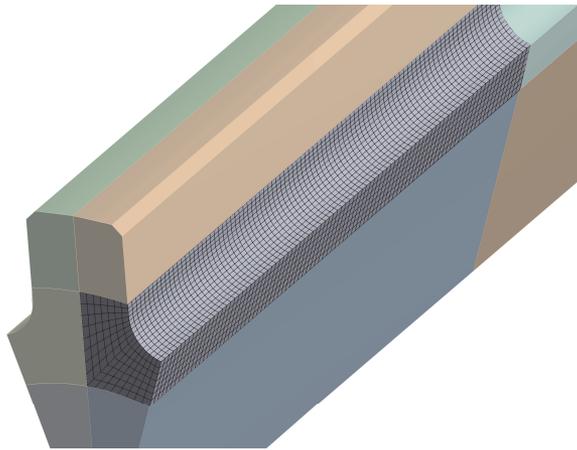


Abbildung 2: Netz im Auswertungsbereich

Die freie Stirnseite der Welle wird dreiwertig gelagert, während das Drehmoment in die Knoten der Nabenoberfläche eingeleitet wird. Die Kontaktfläche zwischen Welle und Nabe wird als reibungsbehafteter Kontakt mit  $\mu=0,2$  behandelt.

Zur Absicherung des Netzes wird eine Konvergenzstudie an einer Verbindung nach DIN 5464 – 10 x 46 x 56 durchgeführt.

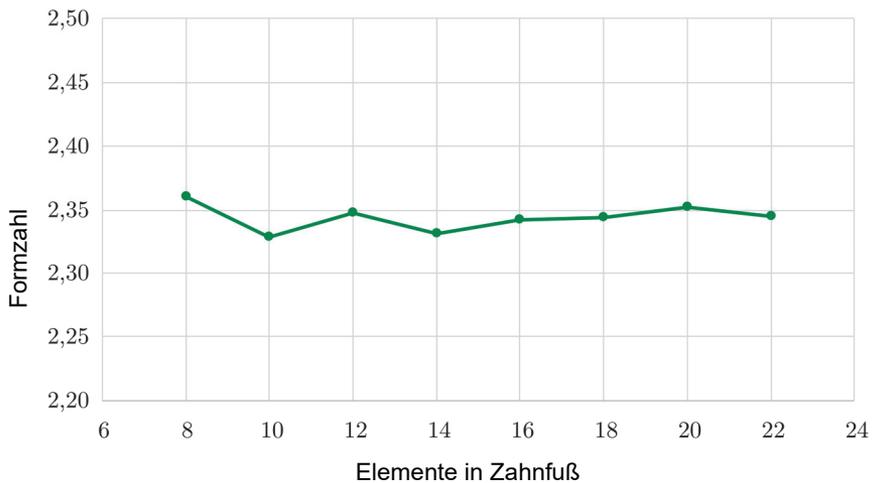


Abbildung 3: Netzkonvergenz

Somit kann gezeigt werden, dass das verwendete Netz mit 16 Elementen im Zahnfuß eine hinreichende Rechengenauigkeit für die Formzahl erreicht.

## Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung werden die Formzahlen der verschiedenen Baugrößen sowie Fußrundungsradien und der Einfluss von Nabendicke und Passung bestimmt. Die Formzahl wird als Verhältnis der maximalen Vergleichsspannung nach von Mises in der Zahnfußrundung der Welle im Vergleich zur von Mises Vergleichsspannung des Nennquerschnitts bestimmt. Als Nenn Durchmesser wird der kleinste ungestörte Durchmesser der Welle – nach DIN 5464 ist dies  $d_3$  – gewählt. Die Spannungsverteilung stellt sich in allen Fällen ähnlich zu Abbildung 4 dar.

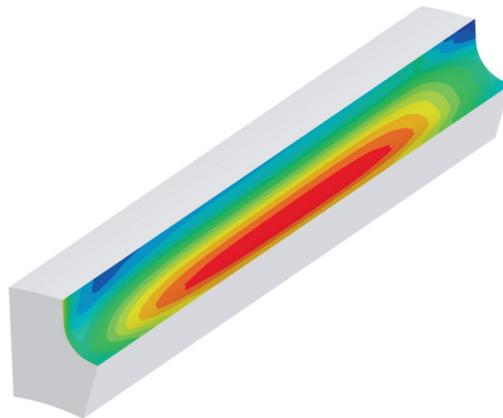


Abbildung 4: Qualitative Spannungsverteilung

Eine Variation der Nabenwandstärke zeigte keinen Einfluss auf die Formzahl. Somit wurde die Erwartung bestätigt, dass geradflankige Verzahnungen hier unproblematischer als evolventische Verzahnungen sind. Da DIN 5464 auch eine Variation der Flankenpassung ermöglicht, wurde am Beispiel der Verbindung DIN 5464 10 x 16 x 20 ein Vergleich der Formzahl bei Verwendung der größten und der kleinsten Passung durchgeführt. Dies bedeutet ein Übermaß von -0,221 mm bei einer F10/d9 Passung bzw. ein Übermaß von 0,008 mm für eine F10/n6 Passung. Hierbei wurde ein Unterschied von 6% festgestellt. Daher wird die gewählte Passung zunächst als untergeordneter Faktor betrachtet.

Wie von evolventischen Verzahnungen bekannt ist, hat der Fußrundungsradius großen Einfluss auf die Formzahl. Um im Verhältnis zur Geometrie sinnvolle Radien, für die Simulation zu wählen, wird der Radius über das Verhältnis aus Radius und Fußkreisdurchmesser der Welle gewählt. Die gefundenen optimalen

Fußrundungsradien sind in einigen nicht aber in allen Fällen die größten untersuchten Radien, also die Vollausrundung (vgl. Abbildung 5).

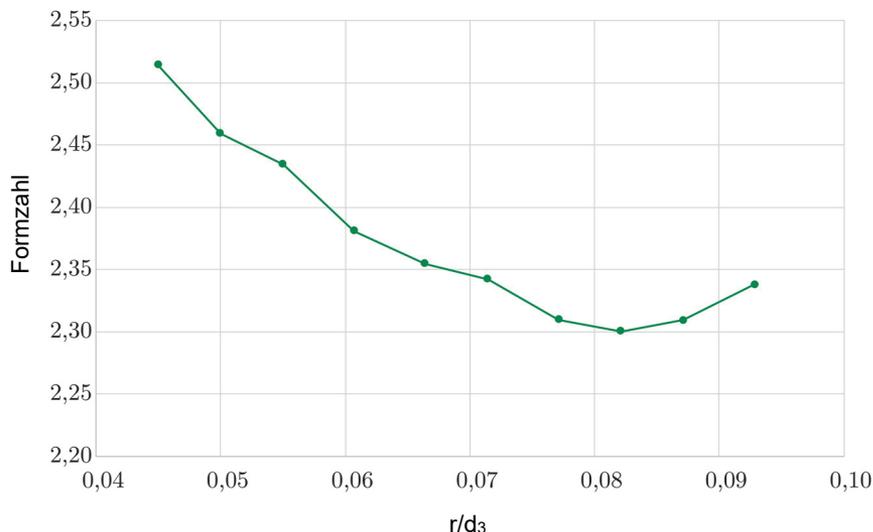


Abbildung 5: *Abhängigkeit der Formzahl vom Fußrundungsradius*

Aus diesen Ergebnissen kann ein idealer Fußrundungsradius sowie die Formzahl aller untersuchten Radien ermittelt werden. Für die manuelle Anwendung würde aus der Fülle der Daten ein nichtmehr anwendbares Tabellenwerk entstehen. Daher werden in Tabelle 1 nur die minimale und die maximale Formzahl einer Verbindung nach DIN 5464 angegeben. Alle Daten inklusive der Fußrundungsradien sind in der Passverzahnungssoftware der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., die im Vorhaben FVA 591 III entwickelt wurde, und dem Abschlussbericht für FVA Mitglieder verfügbar. Hier sind auch Interpolationsvorschriften implementiert.

Tabelle 1: *Formzahlen für DIN 5464*

Verbindung	$\alpha_k$ minimal	$\alpha_k$ maximal
10 x 16 x 20	2,3	2,51
10 x 18 x 23	2,33	2,48
10 x 21 x 26	2,27	2,52
10 x 23 x 29	2,36	2,52

<b>Verbindung</b>	<b><math>\alpha_k</math> minimal</b>	<b><math>\alpha_k</math> maximal</b>
10 x 26 x 32	2,3	2,53
10 x 28 x 35	2,27	2,53
10 x 32 x 40	2,3	2,52
10 x 36 x 45	2,25	2,52
10 x 42 x 52	2,27	2,53
10 x 46 x 56	2,3	2,53
16 x 52 x 60	2,64	2,82
16 x 56 x 65	2,69	2,91
16 x 62 x 72	2,63	2,8
16 x 72 x 82	2,65	2,74
20 x 82 x 92	3,13	3,74
20 x 92 x 102	2,84	3,49
20 x 102 x 115	2,79	3,26
20 x 112 x 125	2,86	3,28

## Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Untersuchungen steht nun eine fundierte Grundlage für die Auslegung von geradflankigen Passverzahnungen zur Verfügung. Diese muss allerdings weiter validiert werden. Primär muss die Stützwirkung weiter untersucht werden.

## Literatur

- /1/ Schäfer, G.; Wild, J.: Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480; Institutsmittteilung Nr. 40, IMW Clausthal 2015
- /2/ Erck, M.; Numerische Bestimmung von Torsionsformzahlen für Keilwellenverbindungen, Projektarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2019, unveröffentlicht

## Einflüsse auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen

Mörz, F.; Schäfer, G.

*Im folgenden Artikel wird eine Übersicht zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen gegeben. Neben dem Einfluss von Fügelänge, Nabenwandstärke und Materialkombination wird auch der Fügevorgang von dünnwandigen Naben in Rändelpressverbindungen anhand aktueller Untersuchungsergebnisse diskutiert.*



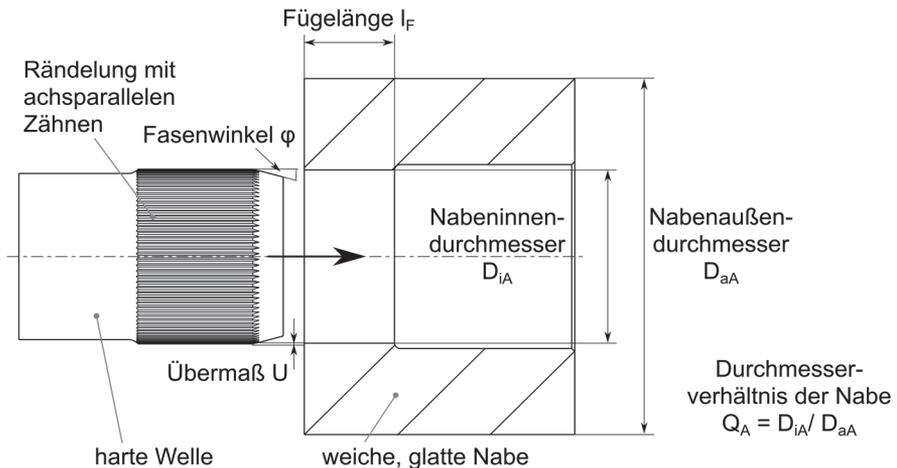
*The following article is presenting a summary of the parameters that are influencing the joining process of knurled shaft-hub-connections. In addition to the influence of joining length, hub wall thickness and material combination, the joining process of thin-walled hubs in knurled shaft-hub-connections is discussed on the basis of current investigation results.*

### Prinzip der Rändelpressverbindungen

Rändelpressverbindungen sind eine spezielle Form der Welle-Nabe-Verbindung, die sich durch eine Kombination von reib- und formschlüssiger Kraftübertragung auszeichnet. Dazu wird einer der beiden Verbindungspartner mit einer Rändelung versehen und in den anderen Verbindungspartner eingepresst.

Grundsätzlich muss eine Härte- bzw. Festigkeitsdifferenz zwischen den beiden Verbindungspartnern vorhanden sein. Zur Herstellung solcher Verbindungen wird der härtere der beiden Verbindungspartner mit einer Rändelung versehen. Während des Fügevorgangs wird diese Rändelung in den weicheren Verbindungspartner abgebildet, wodurch ein Formschluss entsteht. Außerdem ist ein Übermaß zwischen den beiden Partnern vorhanden. Aufgrund dieses zusätzlichen Übermaßes entsteht gleichzeitig eine radiale Vorspannung zwischen den beiden Bauteilen der Verbindung.

In Abbildung 1 ist der prinzipielle Aufbau einer solchen Verbindung mit einer harten, gerändelten Welle und einer glatten Nabe dargestellt. Die Umkehrung, also die Paarung einer innengerändelten Nabe mit einer glatten Welle ist ebenso denkbar.



*Abbildung 1: Prinzip der Rändelpressverbindung: Einpressen und/oder Einschneiden einer harten gerändelten Welle (siehe links) in eine weiche, glatte Nabe (siehe rechts)*

### Herstellungsverfahren der Rändelung

Für die Verwendung in Rändelpressverbindungen eignen sich aufgrund des axialen Fügevorgangs vorwiegend achsparallele Rändel der Form RAA nach DIN82 /1/.

Diese Rändelungen können auf unterschiedliche Art und Weise hergestellt werden. Die konventionellen Verfahren zur Herstellung solcher Rändelungen sind das Rändelformen und das Rändelfräsen. Dabei wird die Rändelung mit einem oder mehreren sogenannten Rändelrädern auf einer Drehmaschine in das Werkstück geformt oder gefräst /2/.

Darüber hinaus können mit weiteren, speziellen Verfahren wie dem Rändelwalzen, dem Wälzfräsen oder dem rekursiven Axialumformen ebenfalls Rändelungen erzeugt werden. Dafür sind jedoch spezielle Fertigungsmaschinen und Werkzeuge erforderlich /3/.

Der Einfluss unterschiedlicher Fertigungsverfahren auf Rändelpressverbindungen wird aktuell im Rahmen eines FVA Forschungsprojektes untersucht: FVA 658II „Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle“ AiF Nr.: 20172 N/1.

### Abtragen der Zahnköpfe der Rändelung

In einem weiteren Fertigungsschritt können nach dem Herstellen der Rändelung die Zahnspitzen der Rändelung abgetragen werden. Dadurch ist es möglich definierte Außendurchmesser-Toleranzen am Zahnkopf der Rändelung für den Einsatz in

Rändelpressverbindungen zu erzielen (vgl. Abbildung 2). Aufgrund dessen sind dabei auch kleinere Korrekturen der Rändelung z.B. bei nicht vollständig ausgebildeten Rändelspitzen möglich, siehe hierzu auch /4/.

Neben der fertigungsgerechten Tolerierung wird eine Verbesserung der Zentrierung der Verbindungspartner, welche durch die flachen Zahnköpfe besser zueinander geführt werden, erwartet. Dies ist u. A. Forschungsgegenstand in aktuellen Untersuchungen /5/.

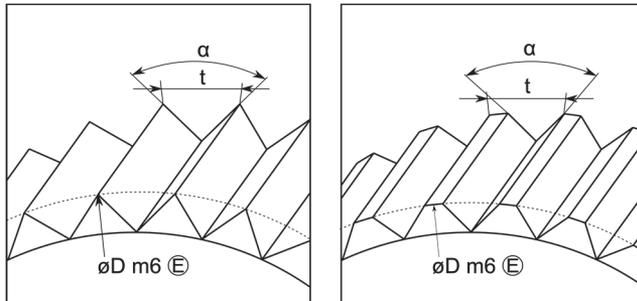


Abbildung 2: Gegenüberstellung einer Rändelung mit spitzen Zahnköpfen (links) und einer Rändelung mit abgetragenen Zahnsitzen (rechts) mit Bemaßung und Tolerierung

## Fügen von Rändelpressverbindungen

Für die Ausbildung von Rändelpressverbindungen beim Fügevorgang spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- die Materialkombination
- die Gestaltung der Fase am gerändelten Verbindungspartner
- das Übermaß
- die Nabenwandstärke bzw. das Durchmesser Verhältnis  $Q_A$
- der Aufbau der Fügevorrichtung

### Materialkombination

Beim Fügen von Rändelpressverbindungen wird die Rändelung, welche sich auf dem härteren Verbindungspartner befindet, in den weicheren Verbindungspartner eingebracht. Gebräuchlich sind Stahl/Stahl-Verbindungen mit einem gehärteten und einem ungehärteten Verbindungspartner, sowie Stahl/Aluminium-Verbindungen. Grundsätzlich können die Verbindungspartner aber aus verschiedensten Materialien bestehen, solange eine gewisse mindest Härte-Differenz zwischen den Bauteilen eingehalten wird.

Bader gibt in /5/ dazu Richtwerte für schneidend gefügte Rändelpressverbindungen an: Hier sollte das Härteverhältnis für Stahl/Stahl- und Stahl/Aluminium-

Verbindungen mindestens 1,8:1 betragen. Für Stahl/Messing-Kombinationen wird das Mindest-Härteverhältnis mit 1,6:1 angegeben.

Lätzer gibt in /7/ für Rändelpressverbindungen mit Stahl/Aluminium-Kombinationen ein Mindest-Härteverhältnis von 2,5:1 an.

### Fase

Je nach Ausgestaltung der Fase am gerändelten Verbindungspartner kann zwischen schneidendem (spanabhebendem) oder umformendem Fügevorgang unterschieden werden. Liegt der Fasenwinkel  $\phi$  zwischen  $5^\circ$ - $15^\circ$ , stellt sich ein vorwiegend umformender Fügevorgang ein. Liegt der Fasenwinkel  $\phi$  im Bereich zwischen  $15^\circ$ - $60^\circ$  stellt sich ein umformend/spanabhebender Fügevorgang ein. Für Fasenwinkel  $\phi$  größer  $60^\circ$  kann von einem rein schneidenden Fügevorgang gesprochen werden /7/. In einer neueren Veröffentlichung wird der Bereich für den umformend/spanabhebenden Fügevorgang mit etwa  $45^\circ$ - $60^\circ$  angegeben /8/.

Fasen mit großen Fasenwinkeln haben einen geringeren Platzbedarf in axialer Richtung. Wird die Fase jedoch so groß gewählt, dass ein schneidender Fügevorgang stattfindet, dann wird radial nur wenig oder kein Material in der Nabe verdrängt. Die Flächenpressung zwischen den Verbindungspartnern ist geringer als bei umformend gefügten Verbindungen. In experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass schneidend gefügte Rändelpressverbindungen den umformend gefügten Rändelpressverbindungen hinsichtlich der dynamischen Drehmomentübertragungsfähigkeit unterlegen sind /9/.

### Übermaß

Das Übermaß zwischen Welle und Nabe ist eine wichtige Einflussgröße für die Drehmomentübertragungsfähigkeit, aber auch für die erforderliche Fügekraft zum Fügen der Verbindung. Inwieweit das zwischen den Bauteilen vorhandene Übermaß während des Fügens auch in der Rändelpressverbindung umgesetzt wird hängt von verschiedenen Faktoren ab:

Bei einem schneidenden Fügevorgang wird das Material des weicheren Verbindungspartners in Form von Spänen beim Fügen der Rändelpressverbindung ausgebracht. Aufgrund dessen kann hier vor einer geringen Nabenaufweitung durch das Fügen ausgegangen werden.

Beim umformenden Fügevorgang muss jedoch sichergestellt sein, dass das umgeformte Material des weicheren Verbindungspartners in die Freiräume der Rändelung des gerändelten Verbindungspartners fließen kann bzw., dass das Volumen in den Rändelzwischenräumen ausreichend groß ist. Dabei kommt es gleichzeitig zu einer radialen Aufweitung der Nabe, welche zu einer Vergrößerung dieser Zwischenräume führen kann. Dies sollte besonders bei dünnwandigen Naben berücksichtigt werden. Sofern hierzu keine genaueren Informationen vorliegen, sollte die Nabenaufweitung experimentell ermittelt werden.

## Nabenwandstärke

Für eine maximale Drehmomentübertragungsfähigkeit von Rändelpressverbindungen sollten möglichst dickwandige Naben eingesetzt werden. Es empfiehlt sich ein Naben Durchmesser Verhältnis von mindestens  $Q_A=0,5$ .

Häufig sind so dickwandige Naben in praktischen Anwendungen aber aus Platzgründen nur mit enormen Aufwand oder gar nicht zu realisieren. Für eine platzsparende Rändelpressverbindung kann hier die Nabenwandstärke reduziert werden.

Mit einer verringerten Nabenwandstärke geht eine Reduzierung der maximal übertragbaren Lasten einher. Zudem können zusätzliche Vorkehrungen für einen erfolgreichen Fügeprozess nötig werden.

Aktuelle Untersuchungen /5/ haben gezeigt, dass sehr dünnwandige Naben ( $Q_A=0,8$ ) eine zusätzliche Abstützung des Nabenmaterials während des Fügevorgangs erforderlich machen. Aufgrund der verwendeten Rändelgeometrie (Rändel mit abgetragenen Zahnköpfen; Übermaß  $U_{geom}=0,33mm$ ; Fase  $\phi=15^\circ$ ; umformender Fügevorgang) und den verwendeten Materialkombinationen (16MnCr5<sub>gehärtet</sub>/C45 und C45/EN-AW5083) entstehen während des Fügevorgangs Spannungen, die zu einer vollständigen Plastifizierung der Nabe führen. Dementsprechend kann die Nabe während des Fügens radial ausweichen und die Rändelpressverbindung wird nur mit einem sehr geringen Übermaß oder unzureichend ausgebildet.

In solchen Fällen können Stützringe zur radialen Abstützung der Nabe verwendet werden, um ein Ausweichen der plastifizierten Bereiche zu verhindern. Diese Stützringe sind in aktuellen Forschungsarbeiten aufgrund der Probengeometrie radial teilbar ausgeführt. Ein dreiteiliger Aufbau ermöglicht hier eine gleichmäßige Anlage der Stützringe über dem Nabenaußendurchmesser, die verwendeten Stützringe werden an die Flügelänge  $l_F=6mm$  und  $l_F=15mm$  angepasst (vgl. Abbildung 3). Die Ringe werden vor dem Fügen drehmomentgesteuert mit einer minimalen Vorspannung in Anlage gebracht. Damit wird sichergestellt, dass es bei der Montage der Stützringe zu keiner Verformung der Nabe im Fügebereich kommt. Eine größere Vorspannung des Stützrings vor dem Fügen ist aber ebenso denkbar und könnte ggf. zur Realisierung größerer Übermäße mit dünnwandigen Naben beitragen.



Abbildung 3: Montage eines Stützrings an einer dünnwandigen Aluminium-Nabe mit  $l_F=15mm$

### Fügevorrichtung

Für das Erreichen einer guten Rundlaufgenauigkeit gefügter Rändelpressverbindungen spielt neben der Rändelgeometrie (hier Rändelung mit abgeschliffenen Zahnköpfen) auch die Fügevorrichtung eine wichtige Rolle.

In der für die Untersuchungen verwendeten Fügevorrichtung erfolgt die Ausrichtung der Verbindungspartner zueinander über die Aufnahme- und Zentrierdurchmesser an den Wellen- und Naben-Proben. Diese Durchmesser sind mit Spielpassungen mit einer guten Genauigkeit (H6/f6 und H7/f7, vgl. Abbildung 4) gefertigt. In Abbildung 5 ist ein typischer Fügekraftverlauf beim Fügen einer solchen Rändelpressverbindung dargestellt.

Werden hier jedoch die maximal möglichen geometrischen Abweichungen betrachtet, wird deutlich, dass sich allein aufgrund der Passungen zur Führung der Bauteile eine maximale Rundlaufabweichung von 0,066mm einstellen kann. Hinzu kommen Abweichungen die innerhalb der einzelnen Bauteile (Welle, Nabe und Vorrichtung) zwischen den verschiedenen Geometrieelementen vorhanden sind.

Dementsprechend können geringere Rundlaufabweichungen mit dieser Art der Fügevorrichtung nur mit sehr großem Aufwand realisiert werden. Ein anderer Aufbau zur Führung der Bauteile zueinander während des Fügevorgangs kann hier Verbesserungen bringen.

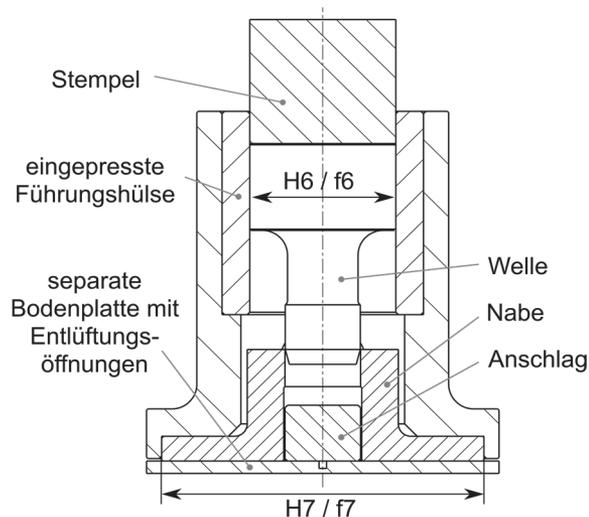


Abbildung 4: Verwendete Fügevorrichtung

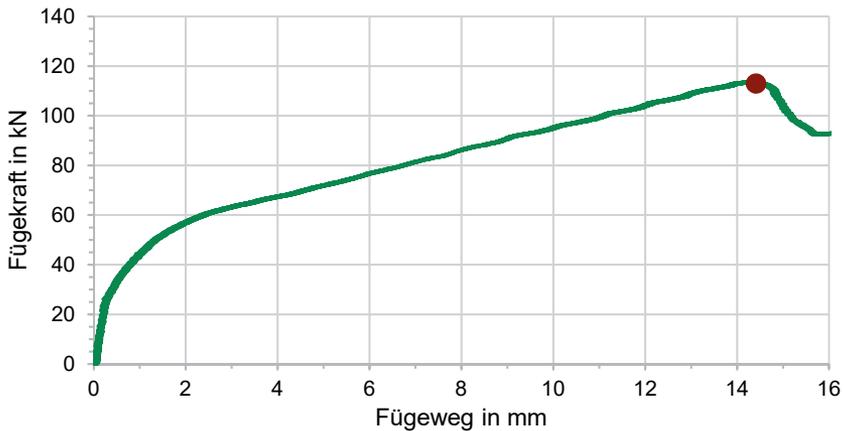


Abbildung 5: *Typischer Fügekraftverlauf einer dickwandigen 16MnCr5<sub>gehärte</sub>/C45-Probe mit  $l_F=15\text{mm}$ ; die Markierung kennzeichnet die maximale Fügekraft*

### Einflussgrößen auf die Fügekraft

Der Einfluss der Fügelänge  $l_F$ , der Nabenwandstärke  $Q_A$ , sowie des Nabenmaterials auf die maximale Fügekraft beim Fügen (siehe vorhergehender Abschnitt) von Rändelpressverbindungen sind in den folgenden Diagrammen aufgetragen.

Mit zunehmender Fügelänge  $l_F$  ist ein Anstieg der maximalen Fügekraft zu erwarten. Diese Steigerung kann bei allen untersuchten Nabenmaterialien (C45 und ENAW-5083) und Nabenwandstärken  $Q_A$  beobachtet werden (vgl. Abbildung 6).

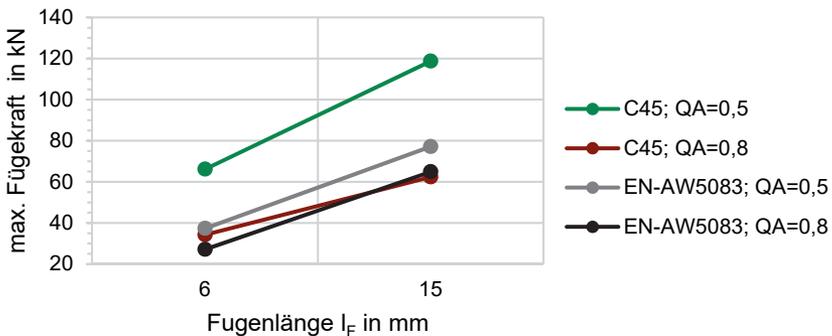


Abbildung 6: Einfluss der Fügelänge auf die max. Fügekraft /10/

Die Nabenwandstärke  $Q_A$  hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die max. zu erwartenden Fügekräfte. Mit zunehmender Nabenwandstärke kann eine Steigerung der max. Fügekraft beobachtet werden. Dieser Effekt ist bei Stahl-Naben (C45) deutlich ausgeprägter als bei den untersuchten Aluminium-Naben (EN-AW5083) (vgl. Abbildung 7).

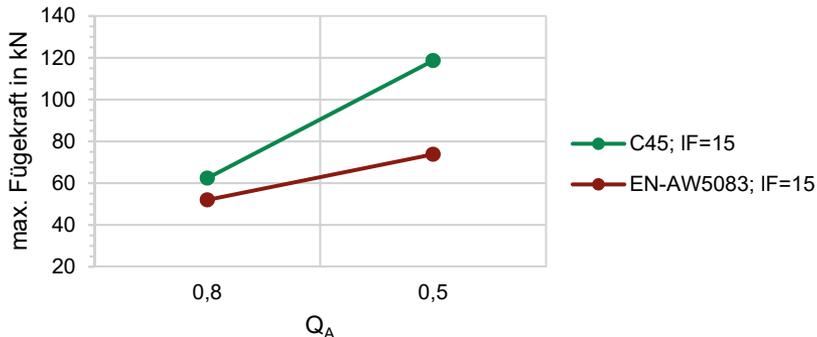


Abbildung 7. Einfluss der Nabenwandstärke  $Q_A$  auf die max. Fügekraft /10/

Der Einfluss des Nabenwerkstoffes auf die max. Fügekräfte ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier wird deutlich, dass unabhängig von der Nabenwandstärke  $Q_A$  und der Fügelänge  $l_F$ , die zu erwartenden max. Fügekräfte bei Stahl-Naben (C45) größer sind, als bei Aluminium-Naben (ENAW-5083) mit sonst gleicher Geometrie.

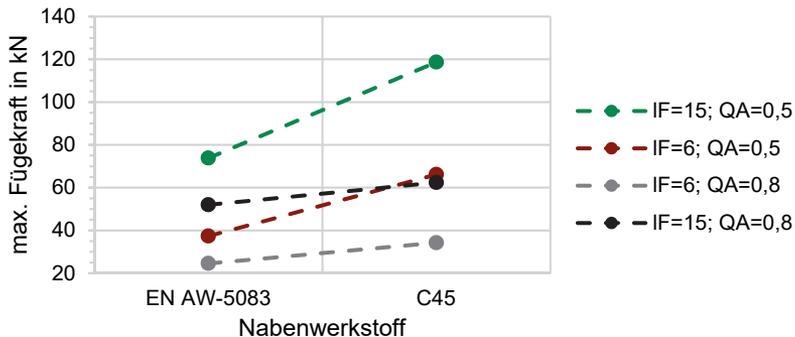


Abbildung 8: Einfluss des Nabenwerkstoffes auf die max. Fügekraft /10/

Die Rändelungen der hier gefügten Proben wurden mittels Rändel-Walzen hergestellt und die Zahnsitzen der Rändelungen anschließend abgeschliffen. Die Fase an der Welle ( $\varphi=15^\circ$ ) und das Übermaß ( $U_{geom}=0,33\text{mm}$ ) zwischen Welle und Nabe sind bei den untersuchten Proben konstant. Für die Auswertung der Fügekräfte wurden die Ergebnisse mehrerer Fügeversuche mit gleicher Geometrie gemittelt /10/.

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde eine Reihe wichtiger Einflussfaktoren auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen erläutert und diskutiert. Dabei wurden die Einflussgrößen Fügelänge, Nabenwandstärke und Materialkombination separat betrachtet. An diese Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren untereinander eine wichtige Rolle spielen können.

Bereits bei der konstruktiven Gestaltung von Rändelpressverbindungen sollte deshalb der Fügevorgang z.B. durch spezielle Führungselemente an den Verbindungspartnern berücksichtigt werden. Besonders das Abtragen der Rändelspitzen nach dem Fertigen der Rändelung verspricht Vorteile hinsichtlich der einzustellenden Bauteiltoleranzen, der Einfluss auf die Rundlaufgenauigkeit der Verbindungen wird aktuell noch untersucht.

Auch die Gestaltung der Vorrichtung zur Führung der Verbindungspartner während des eigentlichen Fügevorgangs spielt eine wichtige Rolle, damit hinreichend kleine Rundlaufabweichungen erreicht werden können.

Der Einsatz dünnwandigen Naben ermöglicht darüber hinaus die Anwendung von Rändelpressverbindungen auf kleinstem Bauraum. Für die Herstellung solcher Verbindungen sollte beim Fügevorgang eine mögliche Pastifizierung der Naben berücksichtigt werden. Dem kann z.B. durch Vorkehrungen zur radialen Abstützung der Naben Rechnung getragen werden. So wird sichergestellt, dass die Rändelpressverbindungen hier prozesssicher ausgebildet werden können.

## Literatur

- /1/ Norm DIN 82: Rändel, Januar 1973
- /2/ Hommel+Keller Präzisionswerkzeuge GmbH: zeus Rändeltechnik: Rändelräder, Rändelwerkzeuge, Sonderwerkzeuge, Rollierrollen. 3. Auflage. Produktkatalog, Jan. 2018
- /3/ Mörz, F.: Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle Forschungsvorhaben Nr. 658 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (AiF 20172 N/1), unveröffentlichter Sachstandsbericht, Mai 2019
- /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, Nr. 16, S. 260–271
- /5/ Mörz, F.: Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle Forschungsvorhaben Nr. 658 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (AiF 20172 N/1), unveröffentlichter Sachstandsbericht, Oktober 2019
- /6/ Bader, M.: Untersuchungen von Rändel-Welle-Nabe-Verbindungen mit am Praxiseinsatz orientierten Randbedingungen. In: VDI-Berichte (2012), Nr. 2176, S. 105–116
- /7/ Lätzer, M.: Füge- und Übertragungsverhalten torsionsbelasteter Stahl-Aluminium-Rändelpressverbindungen, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2016
- /8/ Suchý, L.; Gerstmann, T.; Leidich, E.; Awiszus, B.: Influence of Hub Parameters on Joining Forces and Torque Transmission Output of Plastically-Joined Shaft-Hub-Connections with a Knurled Contact Surface. In: machines (2018). <https://www.mdpi.com/2075-1702/6/2/16>
- /9/ Mänz, T.: Auslegung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2017
- /10/ Stök, M.: Experimentelle Torsionsuntersuchungen an rändelgewalzten Rändelpressverbindungen, Technische Universität Clausthal, interne Studienarbeit, 2019, unveröffentlicht

## Zahnwelle 3.0

Schäfer, G.

*Die Ausnutzung verfügbarer Potentiale ist auch bei der Gestaltung von Passverzahnungen eine sinnvolle Strategie, zumal dabei keine zusätzlichen Arbeitsschritte notwendig sind und die Kompatibilität in dieser z.B. nach DIN 5480 genormten Welle-Nabe-Verbindung erhalten bleibt.*



*The modification of splined shaft-hub connections promises significant benefits in compliance with the geometry standard DIN 5480.*

### Einleitung

Passverzahnungen, im allgemeinen Sprachgebrauch auch Zahnwellen oder Steckverzahnungen genannt, sind als leistungsfähige Welle-Nabe-Verbindung in Antriebssträngen häufig zu finden. Ausfallursachen sind einerseits Verschleiß durch z.B. mangelhafte Schmierung oder ungünstige Belastungskombinationen und andererseits Bruch, wie oben rechts im Bild zu sehen. Der Rissbeginn und damit bruchursächlich ist die Kerbe durch den Fußrundungsradius an der Lastflanke.

### Entschärfung der Fußrundungskerbe

Nach DIN 5480 /4/ wird bislang für die spanend hergestellte Wellenverzahnung ein Fußrundungsradius des Bezugsprofils von  $\rho_{FP} = 0,16 \cdot m$  vorgegeben, gleichzeitig wird aber auch ein „Mindest-Formübermaß“ (Tabelle 1) und ein „mindestens“ einzuhaltendes Kopfspiel genannt. Aus diesen Formulierungen ist eine Freiheit zur Modifikation erkennbar, deren sinnvolle Ausgestaltung nachfolgend betrachtet wird.

Grundsätzlich lässt die Vergrößerung des Fußrundungsradius als Kerbradius eine Reduzierung der Kerbschärfe erwarten, was in der Folge eine Reduzierung der Beanspruchung bedeutet. In /1/ wurden dazu grundlegende Untersuchungen angestellt, die in /2/ und /3/ mit Erweiterungen kurz zusammengefasst dargestellt wurden. In Abbildung 1 ist eine zentrale Aussage daraus grafisch dargestellt. Durch die Vergrößerung des Fußrundungsradius kann die Zahnfußbeanspruchung um mindestens 15% reduziert werden, wobei mit einem Verhältnis  $\rho_{FP}/m = 0,48$  ein Optimum erreicht ist. Die weitere Vergrößerung zur Vollausrundung führt zu einer signifikanten Reduzierung des Wellenkernquerschnitts, was eine Beanspruchungserhöhung zur Folge hat. Der größer werdende Fußrundungsradius ist grundsätzlich über den Wellenfußformkreisdurchmesser  $d_{FF1}$  an die Evolvente gekoppelt und schneidet damit bei größerem  $\rho_{FP}$  tiefer in die Welle ein, siehe auch Abbildung 2.

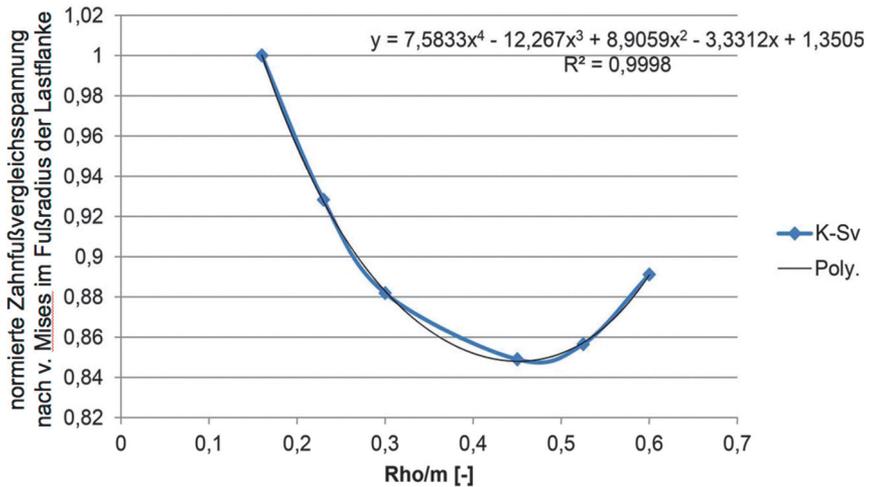


Abbildung 1: Verhalten der Zahnfußvergleichsspannung als Funktion des Zahnfußrundungsradius für Profile nach DIN 5480 /4/ aus /1/

Die vergleichbare internationale Norm ISO 4156 /6/ sieht für den Fußrundungsradius das Verhältnis 0,2 und alternativ die Vollausrundung vor, womit das Optimum auch in diesem Standard nicht perfekt abgebildet ist. Das optimale Verhältnis von 0,48 für die allgemein günstige 30°-Verzahnung ist damit dreimal so groß wie die Vorgabe der DIN 5480 /4/, woraus sich der Titel dieses Beitrags erklärt.

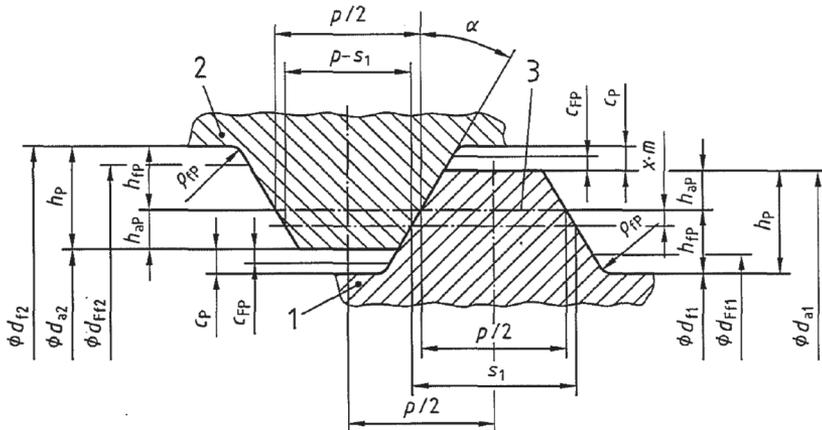


Abbildung 2: Bezugsprofil DIN 5480 /4/

## FAQ's bei der Umsetzung

Die aus Gründen der Tragfähigkeit dringende Empfehlung zur Verdreifachung des üblichen Fußrundungsradius bei spanender Herstellung wird inzwischen von den Nutzern schnell erkannt, offen bleibt dann häufig die Frage wie die Werkzeugkonstruktion erfolgen soll. Um vollständige Kompatibilität mit den nach Norm gefertigten Naben zu behalten, muss der Wellen-Fußformkreisdurchmesser  $d_{F1} \leq |d_{a2}| - 2 \cdot c_{Fmin}$  unbedingt eingehalten werden. Werte für  $c_{Fmin}$  finden sich in Tabelle 1 und /4/,  $d_{a2}$  ist der Nabenkopfkreis nach /4/. Weitere Einschränkungen sind bei der Fußgestaltung zur Einhaltung der Kompatibilität nicht zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Mindest-Formübermaß /4/

$d_B$ mm	Mindest-Formübermaß $c_{Fmin}$ $\mu m$		
	Modul 0,5 bis 1,5	Modul 1,75 bis 4	Modul 5 bis 10
bis 12	25	–	–
über 12 bis 25	28	30	–
über 25 bis 50	30	35	40
über 50 bis 100	35	40	45
über 100 bis 200	40	45	50
über 200 bis 400	–	50	55
über 400	–	–	65

Bei der Konstruktion des Werkzeugs ist für die Festlegung des Wellen-Fußkreisdurchmessers  $d_{F1}$  dann der Fußrundungsradius  $r_{FP}$  so an die Evolvente anzuschließen, dass sich ein tangentialer Übergang ergibt. In der Regel verbleibt dann zwischen den beiden Fußausrundungen ein kurzer Kreisbogenabschnitt mit dem Fußkreisdurchmesser  $d_{F1}$ . Weitere Hinweise zur Berechnung des genauen Wellen-Fußkreisdurchmessers finden sich auch in DIN 5480-16 /5/. Mit dieser Konstruktionsstrategie sind die Werkzeughersteller in der Lage das optimierte Werkzeug auszuliefern. Es bleibt zu hoffen, dass zukünftig diese Modifikation Eingang in Lager- oder kurzfristig verfügbare Artikel findet, zumal damit die Paarbarkeit mit Normnaben gegeben ist und gleichzeitig ein Festigkeitsgewinn von mindestens 15% für die Verbindung erreicht wird, da die Nabe üblicherweise im Vergleich der beiden Bauteile eine entsprechende Reserve bereithält. Aus diesem Grund ist die Fußradiusvergrößerung in der Nabe nicht zwingend notwendig. Grundsätzlich ist aber auch in der Nabe eine Vergrößerung des Fußrundungsradius möglich und sinnvoll, dabei ist die verbleibende Restwandstärke speziell bei dünnwandigen Naben zu beachten.

## Zusammenfassung

Für die Auslegung von Passverzahnungen als Welle-Nabe-Verbindung konnten in den letzten Jahren einige allgemeingültige Hinweise erarbeitet werden [7], so ist der  $30^\circ$  Flankenwinkel und eine Verzahnungsbreite von  $0,6$  bis  $0,8 \cdot$  Bezugsdurchmesser für allgemeine Anwendungen empfehlenswert. Für die Wahl der beiden abhängigen Größen Modul und Zähnezahl sollte eine Zähnezahl von ca. 30 angestrebt werden. Im Rahmen des hier vorliegenden Artikels wird dazu ein Wellen-Fußrundungsradius von  $0,48 \cdot$  Modul empfohlen, der vollständige Kompatibilität mit den nach Norm gefertigten Naben gewährleistet. Die dazu notwendige Strategie bei der Werkzeugkonstruktion mit der unbedingten Beachtung des Wellen-Fußformkreises und die tangentielle Übergangsbedingung zwischen Evolvente und Fußrundungsradius wurden kurz erläutert.

## Literatur

- /1/ Biansompa, E. N.; Schäfer, G.: Zahnwellenberechnung: FVA-Berechnungsrichtlinie für Zahnwellen-Verbindungen. FVA-Forschungsvorhaben Nr. 591 I. Frankfurt/Main, 2015 (FVA-Heft 1139)
- /2/ Schäfer, G.: Betrachtung der Zahnfußausrundung von Passverzahnungen, Institutsmitteilung Nr. 40, Seite 23 – 28, IMW Clausthal 2015, ISSN 0947-2274
- /3/ Schäfer, G.: Kerbspannungen von Passverzahnungen auf Hohlwellen, Institutsmitteilung Nr. 41, Seite 21 – 28, IMW Clausthal 2016, ISSN 0947-2274
- /4/ DIN 5480-1: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser, Teil 1: Grundlagen, Hrsg. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, März 2006
- /5/ DIN 5480-16: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser, Teil 16: Werkzeuge, Hrsg. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, März 2006
- /6/ ISO 4156: Straight cylindrical involute splines – Metric modul, side fit – Generalities, dimensions and inspection. International Standards Organization (ISO), 1989
- /7/ Schäfer, G.: Zahnwellenverbindung – Auslegung, Potentiale und Festigkeitsnachweis von Passverzahnungen, Institutsmitteilung Nr. 39, Seite 5 – 12, IMW Clausthal 2014, ISSN 0947-2274

## Vergleich der Beanspruchung einer Faser- und Stahlseilbewickelten Seiltrommel

Stök, M.

*Die Belastung auf eine Seiltrommel durch die Bewicklung mit einem Faser- oder Stahlseil unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Seileigenschaften. Für eine bestehende Seiltrommel wird untersucht, welchen Einfluss die Verwendung eines Faserseils anstelle eines Stahlseils hat. Viele Faktoren haben einen Einfluss auf die Lasten, sodass für jedes Seiltrommelsystem eine individuelle Betrachtung notwendig ist.*



*The drum load caused by a fibre or steel rope differs due to different properties. To examine the influence of the different ropes on an existing construction the stress caused by the winding pack are compared and evaluated. Many contradicting influences to the drum load necessitate an individual consideration for each rope drum system.*

### Einleitung

Die Eigenschaften von Stahl- und Faserseilen unterscheiden sich voneinander. Die Vorteile des Faserseils sind nach Schwarzer /1/ die hohen ertragbaren Biege- wechselzahlen, das geringe spezifische Gewicht und die damit verbundene Hand- lichkeit. Nachteile sind die großen Dehnungen von teilweise über 50% und die damit verbundene Brucharbeit, sowie eine Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung, Wasser und Chemikalien. Die Empfindlichkeiten können durch geeignete Beschichtung vermieden werden.

Für die Belastung einer Seiltrommel sind die Seilzugkraft, der Längs- und Querelastizitätsmodul sowie die Reibwerte im Kontakt Seil - Seil und Seil – Trommel entscheidend. Insbesondere die sehr unterschiedlichen Querelastizitätsmodule führen zu gegenteiligen Lasten. Früher wurde deshalb davor gewarnt bestehende Trommelkonstruktionen, die für Stahlseile ausgelegt sind, mit einem Faserseil zu bewickeln, z.B. /2/. Inzwischen ist insbesondere die Erforschung von Faserseilen weiter vorangeschritten, sodass für jede Seiltrommel individuell geprüft werden sollte, ob eine Bewicklung mit dem jeweils anderen Seil möglich ist.

## Die Belastung der Seiltrommel

Durch das Seilpaket wirken Axialkräfte auf die Bordscheiben und ein Druck auf den Trommelmantel, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Die analytische Berechnung der Belastung einer Seiltrommel bei ein- und mehrlagigen Bewicklung ist bereits von verschiedenen Autoren, wie /2,3,4/, beschrieben worden.

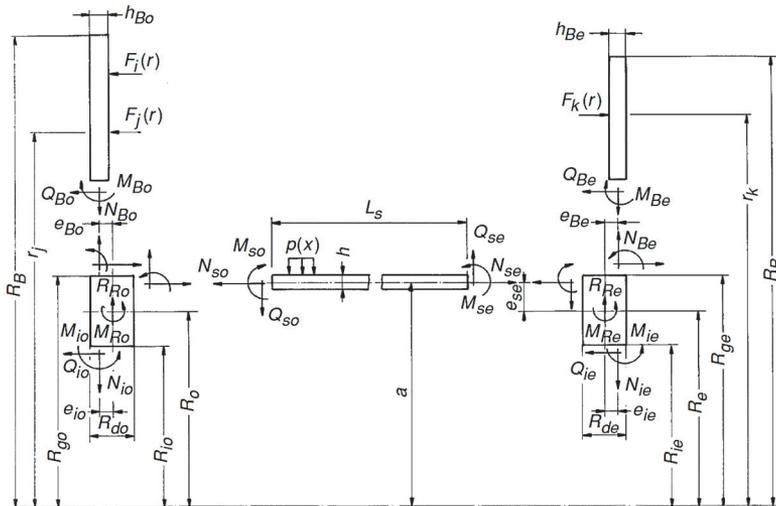


Abbildung 1: Das mechanische Ersatzschaltbild einer Seiltrommel /4/

Dietz /3/ beschrieb erstmals einen Entlastungseffekt. Dabei verformt jede Umschlingung den Trommelmantel in radialer Richtung. Da die Absenkung des Trommelmantels nicht lokal auf das Abmaß des Seils beschränkt ist, kommt es auch zu einer Absenkung des Trommelmantels im Bereich der Nachbarwindung. Durch die zusätzliche Absenkung des Trommelmantels sinkt die Spannung im bereits aufgewickelten Seil und damit der Druck auf die Seiltrommel.

Der zweite Entlastungseffekt tritt bei der Mehrlagenwicklung auf. Die zusätzlichen Lagen führen zu einer weiteren Belastung und Absenkung des Trommelmantels. Wie bereits beim Entlastungseffekt der einlagig bewickelten Seiltrommel für die Nachbarwindung gezeigt wurde, nimmt nun die Vorspannung in der unteren Lage ab und damit der von ihr erzeugte Druck. Hinzu kommt das die Quersteifigkeit von Seilen erheblich geringer als ihre Längsteifigkeit oder der Steifigkeit des Trommelmantels ist. Der Seilquerschnitt der unteren Lage wird durch die Last der oberen Lage deformiert. Der mittlere Seildurchmesser nimmt ab, was eine Spannungsminde rung zur Folge hat. Durch die Entlastungseffekte nimmt der Druck auf den Mantel der Seiltrommel nicht proportional mit der Windungs- und Lagenanzahl zu.

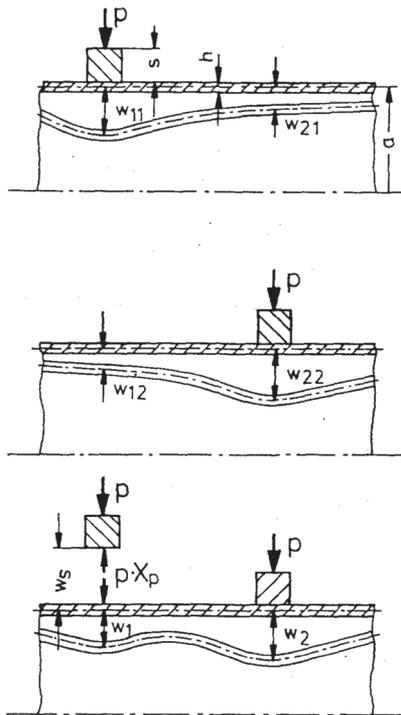


Abbildung 2: Der Entlastungseffekt einer einlagig bewickelten Seiltrommel /3/

Die unsymmetrische Verformung des Trommelmantels bei einer Seiltrommel mit Lebusrillung thematisierte Mupende /4/ erstmals. Er zeigt, dass dies mit unterschiedlichen Drücken im Parallel- und Kreuzungsbereich zusammenhängt. Diese resultieren aus abweichenden Wickelradien im Seilpaket. Im Kreuzungsbereich liegen die Seillagen alle übereinander, während sie in den Parallelbereichen in den Lücken der unteren Lage liegen. Der Druck ist dadurch im Parallelbereich größer als im Kreuzungsbereich.

Für die Lebus-Rillung berechnete Mupende /4/ die axialen Kräfte auf die Bordscheiben getrennt für den Parallel- und Kreuzungsbereich. Die Last vom Seil auf die Bordscheibe während des Aufstiegs in die nächste Lage ist nicht konstant. Mit zunehmendem Keilwinkel  $\alpha$  steigt diese bis zu ihrem Maximum beim Winkel  $\alpha_0$  an. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt.

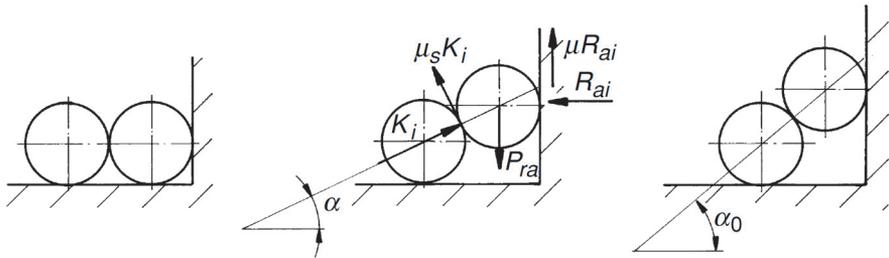


Abbildung 3: Die auf die Bordscheibe wirkende axiale Last  $R_{ai}$  /4/

Der Querelastizitätsmodul von Faserseilen ist erheblich geringer als der von Stahlseilen. Henschel /2/ stellte fest, dass bei Seilen mit einer hohen Querkompression, also einem geringen Querelastizitätsmodul, die Last auf die Bordscheiben steigt. Mupende /4/ stellte für Stahlseile ebenfalls fest, dass Seile mit einem niedrigen Querelastizitätsmodul den Trommelmantel geringer und die Bordscheiben höher belasten. Bei Seilen mit einem hohen Querelastizitätsmodul ist es andersrum, der Trommelmantel wird hoch und die Bordscheiben gering belastet.

Durch den geringen Querelastizitätsmodul fällt die Ovalisierung des Faserseils bei einer Bewicklung unter Last erheblich größer aus als bei einem Stahlseil, vgl. Abbildung 4. Dies führt zu einem kompakteren Seilpaket mit einem geringeren Radius der Seillagen, wie in Abbildung 5 dargestellt. Die Kraft der sich abstützenden Seile auf die Bordscheibe nimmt dadurch zu. Jedoch sinken der Radius des Kraftangriffspunktes und durch die Entlastungseffekte der Druck auf den Trommelmantel. /5/

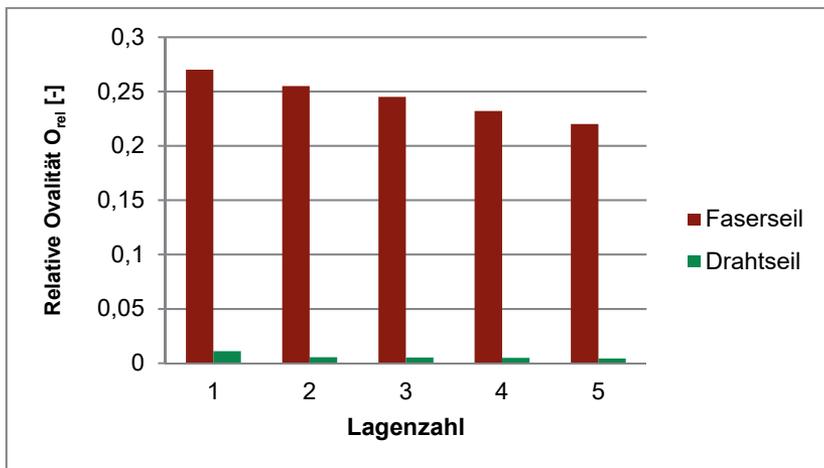


Abbildung 4: Die Unterschiede in der Ovalisierung von Faser- und Stahlseilen /5/

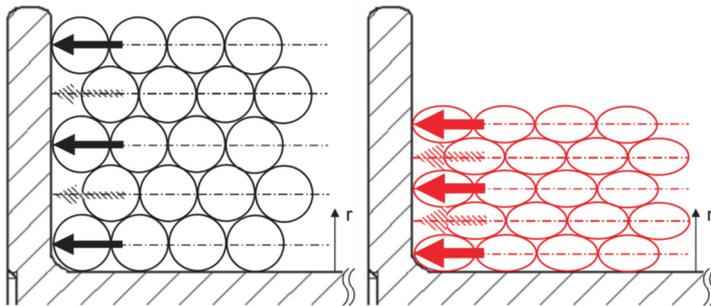


Abbildung 5: Die unterschiedlichen Seilpakete mit einem Stahlseil links und einem Faserseil rechts /5/

Da der Reibwert einen Einfluss auf die Bordscheibenlasten hat, sind in /5/ die Reibwerte für Faserseile untersucht worden. Dies umfasst sowohl den Kontakt für die Seile untereinander, als auch der Seile mit der Seiltrommel. Bei der Reibwertermittlung für die Faserseile ist die Längsspannung der Seile verändert worden, da auch diese einen Einfluss auf den Reibwert hat. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 zu sehen.

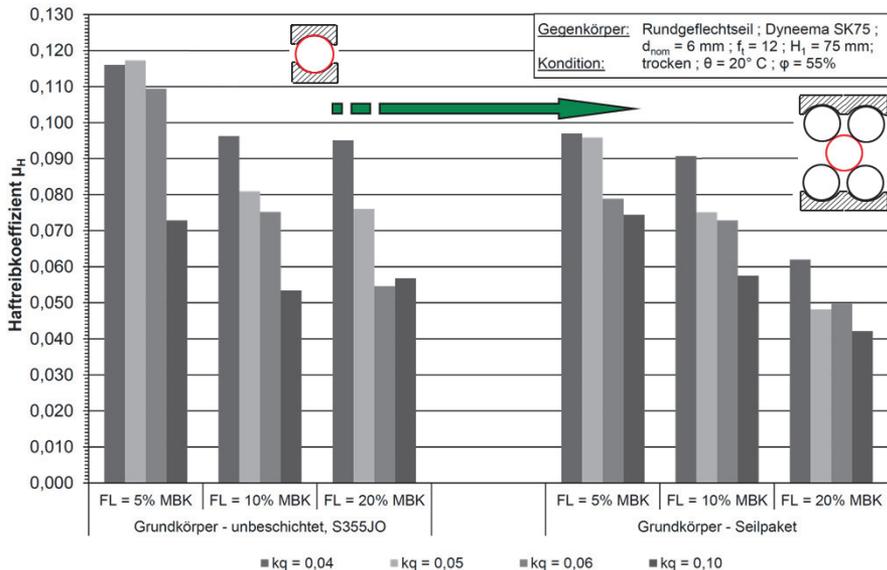


Abbildung 6: Die Reibwerte von Faserseilen unter verschiedenen Längsspannungen im Kontakt mit der Seiltrommel (links) oder mit anderen Seilen (rechts) /5/

## Vergleich zwischen einer Faser- und Stahlseilbewickelten Seiltrommel

Die Seiltrommel wird mit den analytisch berechneten Lasten für eine Stahl- und Faserseilbewicklung belastet. Es wurden dabei folgende Randbedingungen verwendet:

- identische Seilzugkraft für beide Seile
- sechslagige Bewicklung
- Längselastizitätsmodul  $E_{sL}$ 
  - Faserseil: 61,97 GPa
  - Stahlseil: 91 GPa
- Querelastizitätsmodul  $E_{sQ}$ 
  - Faserseil: 311 MPa
  - Stahlseil: 1963 MPa
- Reibwerte
  - Faserseil: 0,05
  - Stahlseil: 0,18

Daraus ergeben sich unterschiedliche Belastungen für die Seiltrommel. Die Trommelmanteldrücke sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wurde der Trommelmanteldruck auf den geringsten Druck normiert um die Verhältnisse leichter erfassen zu können.

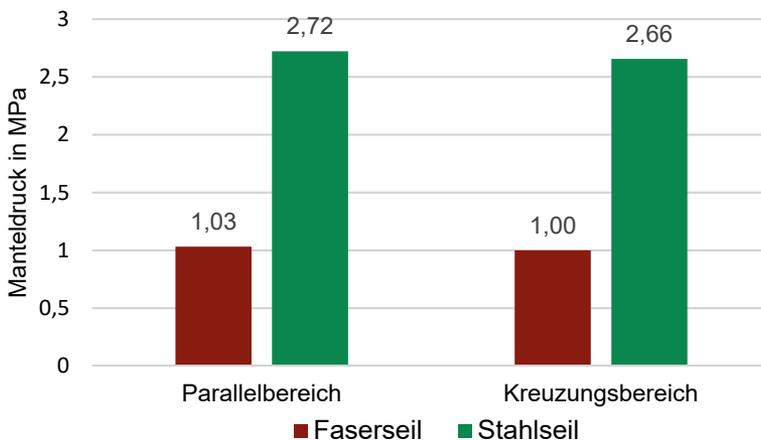


Abbildung 7: Die normierten Trommelmanteldrücke für die Vergleich der Faser- und Stahlseilbewicklung

Die Axialkräfte für jede Lage des Seilpaketes sind bei dem Stahl und Faserseil unterschiedlich. Der qualitative Verlauf ist in Abbildung 8 zu sehen. Die gesamte Axialkraft, des Stahlseils ist 1,2% größer als die des Faserseils. Die Aussage, dass die

Bordscheibenlast mit geringerem Querelastizitätsmodul zunimmt, trifft hier nicht zu, da die geringeren Reibwerte des Faserseils die Erhöhung der Axialkraft mindern.

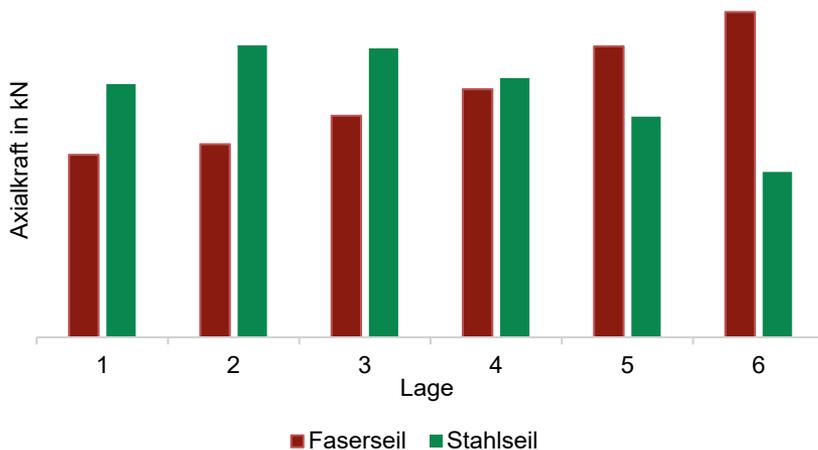


Abbildung 8: Die Axialkräfte für jede Lage des Seilpaketes bei einer Bewicklung mit einem Faser- oder Stahlseil. /7/

Für die Simulation wird ein linearelastisches Materialmodell verwendet. Dies führt dazu, dass die Spannungen in der Seiltrommel bei beiden Seilarten die Fließgrenze erheblich übersteigen. Ausgewertet wurden die Spannungen in dem Trommelmantel und die Spannungen in der Übergangskerbe vom Trommelmantel in die Bordscheibe. Diese sind in Abbildung 9 dargestellt.

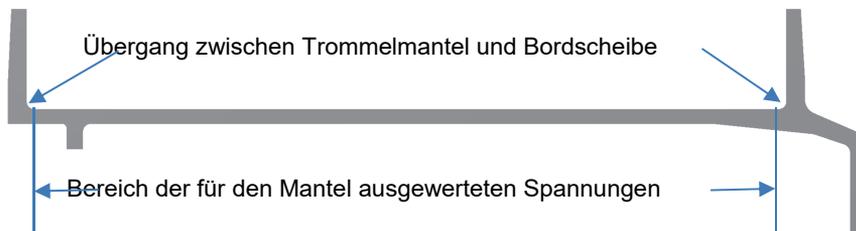


Abbildung 9: Die ausgewerteten Bereiche der Seiltrommel. Abbildung aus /8/

In Abbildung 10 sind die Vergleichsspannungen für die Bewicklung mit beiden Seilmaterialien gegenübergestellt. Um die Spannungsunterschiede schneller erfassen zu können, sind die Spannungen auf die Fließgrenze normiert worden.

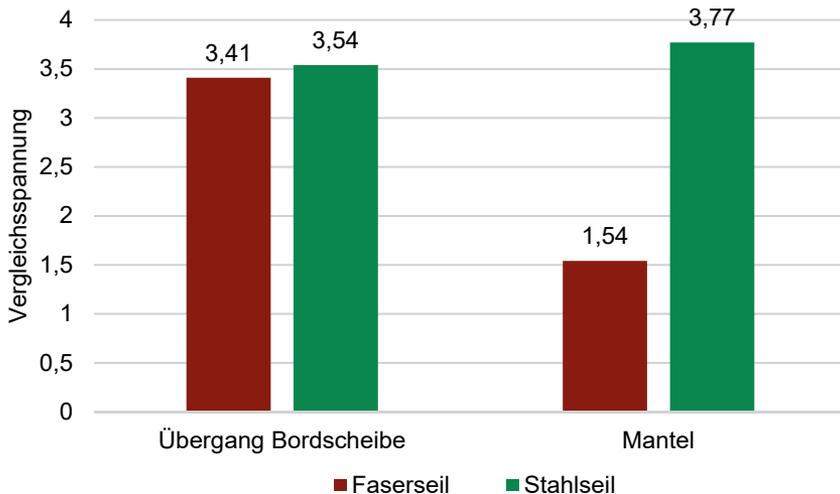


Abbildung 10: Die in der Seiltrommel auftretenden und auf die Fließgrenze normierten maximalen Vergleichsspannungen //

Bei der faserseilbewickelten Seiltrommel tritt die höchste Spannung mit dem 3,41-fachen der Fließgrenze am Übergang zwischen der Bordscheibe und dem Trommelmantel auf. Die Beanspruchung im Trommelmantel ist auf der Innenseite mit dem 1,54-fachen der Fließgrenze am höchsten.

Bei der Bewicklung mit einem Stahlseil sind die Spannungen im Übergang zwischen der Bordscheibe und dem Trommelmantel mit dem 3,54-fachen der Fließgrenze annähernd identisch mit den Beanspruchungen durch das Faserseil. Aufgrund des erheblich höheren Drucks vom Seilpaket auf den Trommelmantel sind die Spannungen mit dem 3,77-fachen der Fließgrenze im Trommelmantel jedoch erheblich höher als mit einem Faserseil.

Zu erklären ist der erhebliche Unterschied zwischen den beiden Beanspruchungen durch den Einfluss des Verhältnisses aus der Längs- zur Quersteifigkeit des Seils. Das Verhältnis  $E_{sl}/E_{sq}$  beträgt für das Faserseil 200 und für das Stahlseil 46. In Abbildung 11 ist für verschiedene Verhältnisse und Lagenanzahlen dargestellt, wie sich die Spannungen relativ zur einlagig bewickelten Seiltrommel verhalten. Während bei einem Verhältnis von 200 die Spannungen sich bis zur sechsten Lage nicht einmal verdoppeln, steigt es bei einem Verhältnis von 46 um ca. 4,5. So kommt es bei dem Stahlseil, trotz der selben Seilzugkräfte und ähnlichen Spannungen in der ersten Lage zu einer erheblich höheren Belastung und Beanspruchung im Trommelmantel bei der sechslagigen Bewicklung.

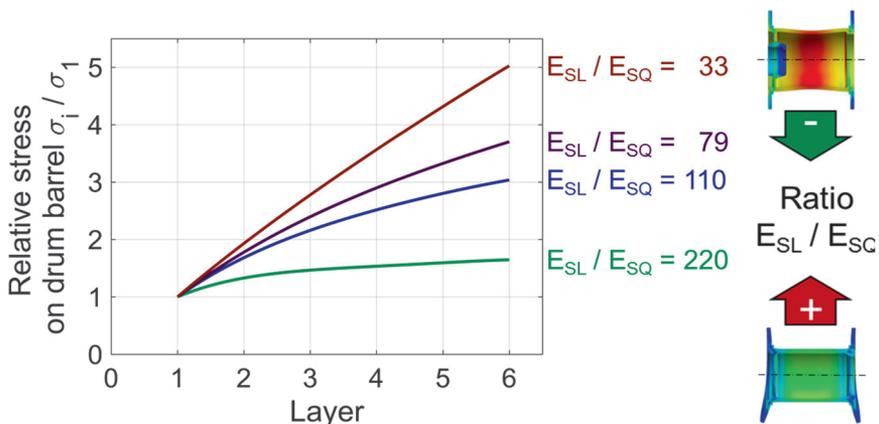


Abbildung 11: Der Einfluss des Steifigkeitsverhältnisses auf die Spannung im Trommelmantel /6/

Die für die Berechnung angenommenen Seil und Trommelparameter sind nur beispielhaft gewählt und müssen keinem im realen Einsatz befindlichem System entsprechen. Die Parameter bewegen sich jedoch im üblichen Rahmen für Stahl- und Faserseile.

Aufgrund der sehr hohen Spannungen in den Seiltrommeln ist über ein Materialmodell das eine Plastifizierung berücksichtigt nachzudenken. Die Spannungen werden dadurch erheblich geringer ausfallen, allerdings wird die Verformung zunehmen. Eine größere Verformung führt aufgrund der Entlastungseffekte zu geringeren Lasten. Dies ist in dieser Berechnung nicht berücksichtigt worden. Wie diese hohen Spannungen ertragen werden können ist deshalb Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### Zusammenfassung

Die Aussage, dass bei einem Faserseil die Bordscheiben höher und der Trommelmantel niedriger belastet werden als bei einem Stahlseil, konnte nicht allgemeingültig bestätigt werden. Im Übergang zwischen der Bordscheibe und dem Trommelmantel ist nur ein geringer Spannungsunterschied, da die gesamte Axialkraft bei beiden Seilen annähernd gleich ist. Der Unterschied wird mit der erheblich höheren Mantelbelastung beim Stahlseil zusammenhängen.

Die Beanspruchung des Trommelmantels durch das Faserseil sind erheblich geringer als die von dem Stahlseil hervorgerufenen. Dies hängt mit dem höheren Verhältnis aus Längs- zu Quersteifigkeit zusammen.

## Literatur

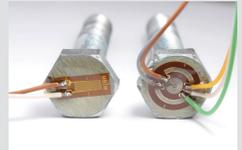
- /1/ Schwarzer, T.: Beitrag zur Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoff- und Stahlseilen, 2011
- /2/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, 1999
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig Bewickelter Seiltrommeln. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1972
- /4/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagiger Bewicklung und elastischen und teilplastischem Werkstoffverhalten. Göttingen: Culviller Verlag, 2001
- /5/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Proceedings of the OIPEEC Conference 2015, Dr. I.M.L. Ridge, Stuttgart, ISBN: 978-0-9552500-5-7.
- /6/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Finite element analysis of wire rope stiffness; Proceedings of the OIPEEC Conference 2019
- /7/ Stök, M.: Untersuchung des Einflusses verschiedener Seile und Seilparameter auf die Beanspruchung einer Seiltrommel, unveröffentlichte Masterarbeit, TU-Clausthal, 2019
- /8/ Stök, M.: Vergleich von Beanspruchung und Verformung einer Windentrommel mit und ohne Rillung mit Hilfe eines 2D Finite Elemente-Modells, unveröffentlichte Bachelorarbeit, TU-Clausthal, 2017



## Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung



**B**



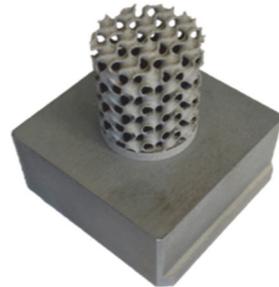


## Restriktionsgerechte Strukturoptimierung mit CFD und metalladditive Fertigung

Scherf, S. C.

*Im folgenden Artikel werden Methoden zur Optimierung von Strukturreaktoren der chemischen und Prozessindustrie vorgestellt. Neben Ansatzpunkten zur Verbesserung der Nachhaltigkeiten von Strukturreaktoren wird ein Überblick aktueller Forschungsthemen gegeben.*

*The following article presents methods for the optimization of structured reactors in the chemical and process industries. In addition to aspects for improving the sustainability of structured reactors, an overview of current research topics is given.*



### Simulationsmethoden und Additive Fertigung für die Herstellung von nachhaltigeren Strukturreaktoren

In der chemischen und Prozessindustrie (CPI) stehen Nachhaltigkeit, hohe Energieeffizienz und geringer Ressourcenverbrauch zunehmend im Vordergrund und stellen neue Anforderungen an Reaktoren, dessen Entwicklung und Prozesse. Möglichkeiten zur Verbesserung von Strukturreaktoren der CPI bieten sich prinzipiell auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette:

- In der rechnergestützten Entwicklung von Reaktoren und Prozessen, durch die Reduktion von Experimenten und ressourcenschonenderen Fertigungsverfahren
- Auf Produktebene, durch eine verbesserte Funktionserfüllung der chemisch-verfahrenstechnischen Reaktoren bzw. durch Prozessintensivierung
- Und auf Prozessebene, durch bedarfsgerechtere agilere Prozesssteuerungen.

Um die oben genannten Ziele der CPI auf den Ebenen zu adressierten werden vermehrt Simulationsmethoden eingesetzt. Insbesondere in der Produktentwicklung von chemisch-verfahrenstechnischen Strukturreaktoren werden phasenübergreifend vermehrt Simulationsmethoden eingesetzt. Zur Absicherung der Anforderungserfüllung werden dabei Methoden wie die numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) eingesetzt um Lösungskonzepte zu analysieren. Ziel der Analyse ist es ein tiefgreifendes Verständnis über die Fluid-Struk-

tur-Interaktion und den damit verbundenen physikalischen und chemischen Vorgängen im Reaktorentwurf zu erlangen. Aufbauend auf den Erkenntnissen kann das Simulationsmodell für die Multizieloptimierung des Reaktorentwurfs genutzt werden. Funktionsziele der Reaktorentwicklung können dabei z.B. eine zu maximierende Wärmeübertragungsleistung und spezifische Reaktoroberfläche, sowie ein zu minimierender Druckverlust, sein. Im Designentwurf bzw. Designstudien, spätestens aber in der finalen Ausgestaltung der Reaktorstruktur, müssen fertigungstechnische Restriktionen berücksichtigt werden. Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren behindern dabei häufig die funktionsgerechte Ausführung von Reaktoren.

Für die Herstellung von Strukturreaktoren, werden daher zunehmend keramik- oder metallverarbeitende Prozesse der Additiven Fertigung (engl. Additive Manufacturing, AM) eingesetzt. Diese Prozesse bieten durch die schichtweise Fertigung viele Freiheitsgrade, die in der Entwicklung und Konstruktion maßgeschneiderter Reaktoren, für eine funktionsgerechtere Geometriegestaltung auf Produktebene, genutzt werden können. Gleichzeitig bietet die Additive Fertigung durch ihre Eigenschaften digital, generativ und direkt, auf Entwicklungs- und Herstellungsebene viele Potentiale zur Einsparung von Energie und Ressourcen. Wie bei allen Fertigungsverfahren, sind aber auch bei der Verwendung von Prozessen der Additiven Fertigung Fertigungsrestriktionen zu berücksichtigen. Um die Fertigbarkeit neuartiger Designs zu gewährleisten und eine definierte Qualität zu erhalten, müssen, neben den Restriktionen des additiven Prozesses, auch Nachbearbeitungsverfahren und deren Restriktionen in der Entwicklung berücksichtigt werden.

Für die industrielle Entwicklung innovativer Reaktorkonzepte, ist eine generische simulationsbasierte Entwicklungsmethodik notwendig, die die Potential von Simulationsmethoden und Additiver Fertigung vereint.

### Aktuelle und geplante Arbeiten

Zum Thema wird aktuell an geeigneten Simulationsmodellen für die restriktionsgerechte Strukturoptimierung, an Nachbearbeitungsverfahren /1/ und neuen Beheizungskonzepten für Strukturreaktoren geforscht. Um die praktische Anwendbarkeit der Reaktorkonzepte zu validieren und weiterentwickeln, werden experimentelle Untersuchungen an ausgewählten Reaktorkomponenten zusammen mit dem Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik der TU Clausthal durchgeführt.

### Literatur

- /1/ Lisa J. Sawatzki, Reiner Sackermann, Sören C. Scherf, Armin Lohregel: Ermittlung und Optimierung der Durchlaufzeit-Anteile der AM-Prozesskette unter Berücksichtigung AM-gerechter Konstruktionsmerkmale. Konstruktion für die Additive Fertigung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020

## Einflussfaktoren einer Recyclinggerechten Konstruktion auf die Linear- und Kreislaufwirtschaft



Wallat, P.; Grasser, F.

*Die recyclinggerechte Konstruktion ist kein neuer Ansatz dennoch nimmt die Bedeutung stets zu. Die Anforderungen an diese Konstruktionssystematik ändern sich allerdings fortwährend. Die Einflüsse sind vielschichtig und vielseitig. Die wesentlichen Einflüsse aus Technik, Wirtschaft und Recycling werden in diesem Artikel dargestellt, anschließend wird das methodische Vorgehen präsentiert um diese Einflüsse für die Recyclinggerechte Konstruktion aufzubereiten.*

*Design for a Circular Economy is not a new approach but the relevance is rising in a steady pace. The requirements for this design approach are constantly changing. Those influences are complex and versatile. The article shows the main influences from the technical, economic and recycling view, followed by the methodical procedure to generate sufficient information to aid the Design for Circular Economy.*

### Die Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft unterscheidet sich zur Linearwirtschaft im Wesentlichen durch die Rückgewinnung der in den Produkten enthaltenen Rohstoffen. Die Ausbeute aus den Altprodukten soll dabei nach Möglichkeit maximal sein. Die 100% Quote zu erreichen ist nicht in allen Fällen möglich. Durch notwendige Verarbeitungsschritte im Rückgewinnungsprozess ist es nicht möglich die Rohstoffe vollkommen im Kreislauf zu halten. Schon die aufgewendete Energie, zur Produktion der Güter, kann nicht vollständig zurückgewonnen werden.

Dennoch liegt hier, für einen rohstoffarmen Staat wie Deutschland, ein großes Potential, um auch in Zukunft ein gewisses Maß an Kontrolle über die Rohstoffströme zu haben.

Davon abgesehen steigt die Rohstoffeffizienz der natürlichen Rohstoffe. Dies wird auch im deutschen Ressourceneffizienzprogramm II angestrebt /1/. Weiterhin ist eine höhere Ressourceneffizienz gleichzeitig positiv für produzierenden Unternehmen. So kann bei gleichen Input mehr Output generiert werden oder bei einer Verringerung des Inputs ein gleicher Output geschaffen werden. Beides beeinflusst die Umsatzrendite positiv.

Die Europäische Union hat für die Kreislaufwirtschaft mit der Richtlinie 2008/98/EG /2/ eine weitere Grundlage geschaffen, um die Kreislaufwirtschaft und

die Bestrebungen normativ zu beschreiben. In Anlehnung an diese werden in diesem Forschungsumfeld fünf – englischsprachige – Kreislaufansätze betrachtet: *Reduce, Reuse, Repair, Remanufacturing* und *Recycling*.

Jeder Ansatz setzt an einer anderen Position innerhalb der Kreislaufwirtschaft und der Wertschöpfung an.

### **Wirtschaftliche Aspekte**

Im Gegensatz zur linearen Wirtschaft liegt bei der Kreislaufwirtschaft auch nach der Nutzung eine Verantwortung beim Hersteller. Diese ist mit Kosten verbunden, welche der Hersteller schon in der Konstruktion und Produktion aufbringen muss oder nach der Nutzung zu investieren hat.

Damit steigen zwar die Kosten auf den ersten Blick, allerdings ist die erfolgsorientierte Unternehmung dazu bestrebt diese bestmöglich zu mitigieren. Liegt mehr Verantwortung beim Hersteller hat dieser auch mehr Interesse daran, dass das Produkt den jeweiligen Nutzen und die vom Kunden gewünschten Qualitätsansprüche erfüllt. Damit steigt neben den Kosten auch die Qualität, welches zu einer ähnlichen Wertigkeit führt.

Weiterhin eröffnen sich durch die Mehrverantwortung auch neue Geschäftsmodelle. So können Produkte die vorher der Endkunde konsumiert hat zu einer Dienstleistung werden. Der Waschsalon und die Waschmaschine im eigenen Haushalt spiegeln solch einen Kontrast wieder. Ein Hybridmodell ist die Waschmaschine zwar im eigenen Haushalt zu haben, aber nur der Nutzer zu sein, nicht aber der Besitzer. Anschließend werden die Waschladungen abgerechnet und nicht der Kauf der Maschine.

### **Recyclingaspekte**

Das Recycling von Produkten dient nicht nur der Vermeidung von Abfällen welche deponiert werden. Die bereits im Umlauf befindlichen Materialien sind ebenfalls eine Rohstoffquelle für zukünftige Produkte.

Die Recyclingtechnik ist noch nicht in der Lage für jeden Einzelfall ein entsprechendes Verfahren bereitzustellen. Weiterhin gibt es Fälle, bei denen Recycling möglich ist, allerdings nicht kostendeckend.

Hierbei sind die Kreislaufwirtschaft und die Recyclingtechnik aufeinander angewiesen. Ohne die Kreislaufwirtschaft wird die Recyclingtechnik nur geringfügig weiterentwickelt. Ohne die Technik, wird auch die Wirtschaft nicht weiter ausgebaut. Daher ist eine beidseitige Abstimmung notwendig um den gesamten Wirtschaftszweig zu fordern und zu fördern.

## Konstruktionsansprüche

Der Konstrukteur ist mit der Aufgabe betraut ein Produkt zu erschaffen, welches die vorgesehene Funktion erfüllt. Dem gegenüber stehen die Anforderungen der Recyclinggerechtigkeit. Dabei hat die Hauptfunktion Vorrang; ein recyclinggerechtes Produkt, welches seine Funktion nicht erfüllt, ist nicht marktfähig. Der Konstrukteur muss eine Lösung finden, welche mindestens diese beiden Kriterien erfüllt, um kreislaufgerechte Produkte zu konstruieren.

Recyclinggerechtigkeit ist grundsätzlich ein Mehraufwand in der Konstruktion. Mittels gut auskonstruierter Lösungen führt dieser Mehraufwand später zu Einsparungen in der Aufarbeitung. Dennoch ist die Recyclinggerechtigkeit immer ein weiteres Kriterium auf der Anforderungsliste, welches den Gesamtentwicklungsprozess mit zusätzlicher Komplexität anreichert.

Durch die Anforderung der Recyclinggerechtigkeit werden, je nach Intensität der Einhaltung, einige gewohnte Konstruktionsstrategien unzulässig. Für eine höhere Akzeptanz müssen der gesamten Konstruktionsabteilung, vom Leiter bis zum Detailkonstrukteur, alternative Lösungen als Ersatz für die bekannten Strategien geboten werden. Andernfalls ist die Akzeptanz an den entscheidenden Stellen gering.

## Stand der Forschung am Institut für Maschinenwesen zur Recyclinggerechten Konstruktion

Die TU Clausthal (TUC) hat sich mit dem Forschungsschwerpunkt *Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz* für eine anspruchsvolle aber zukunftssträchtige Aufgabe entschieden. Eine Vielzahl von Instituten der Universität widmet sich der Bearbeitung unterschiedlichster Aspekte zum Thema.

Das Institut für Maschinenwesen (IMW) ist historisch mit der Konstruktion betraut. Die Konstruktionswissenschaft befindet sich stets im Wandel, durch technologischen Fortschritt entstehen neuen Anforderungen. Die Systematiken müssen diese neuen Anforderungen jeweils erfassen und die aktuellen Anforderungen adaptieren.

Die Recyclinggerechte Konstruktion hat hohe Schnittmengen mit andere Disziplinen. Die Recyclingtechnik hat selbstverständlich einen Einfluss auf die Recycelbarkeit der Produkte und damit auch auf deren Konstruktion. Damit haben auch die chemische und mechanische Verfahrenstechnik einen Einfluss auf die Recyclinggerechte Konstruktion. Selbstverständlich haben noch viele weitere Disziplinen einen Einfluss. Der Übersicht halber wird hier allerdings bei der Recyclingtechnik abgegrenzt und die Anschlussdisziplinen nicht einbezogen.

Der technische Bereich hat ebenfalls einen Einfluss auf die Konstruktion. Neue Werkstoffe, Sensoren und Produkthanforderungen, sind beispielhafte Nennungen für die Einflussfaktoren, welche die Recyclinggerechte Konstruktion positiv oder negativ beeinflussen.

Abhängig vom Innovationsgrad der Branche wird auch die Nutzungsdauer beeinflusst, damit steigt die Obsoleszenz von Baugruppen und Bauteilen in diesen innovativen Produkten. Hohe Stückzahlen gleicher Module und Bauteile werden auf spezialisierten Maschinen in hoher Geschwindigkeit gefertigt. Eine Detailänderung im Produkt kann mit einem hohen Änderungsaufwand verbunden sein. Das führt zu Zusatzkosten, die durch die Änderung erst wieder erwirtschaftet werden müssen.

Stückkosten, Materialbedarfe oder Produkttypen sind beispielhafte Einflussfaktoren aus dem Bereich der Wirtschaft. Hiesige Unternehmen haben abhängig von ihrer Größe eine Verantwortung gegenüber den Mitarbeitern oder, weitreichender, gegenüber der Gesellschaft. Die Wirtschaftlichkeit, und damit ein gewinnorientiertes Handeln, stellt wie auch die Konstruktion von nachhaltigen Produkten, eine Verantwortung gegenüber der Gesellschaft dar. Daraus entsteht das Dilemma günstig zu produzieren, aber nicht nachhaltig, oder nachhaltig aber nicht günstig. Durch den zusätzlichen internationalen Wettbewerb muss das Unternehmen die internen Wirtschaftsprozesse fortwährend optimieren um wettbewerbsfähig zu bleiben.

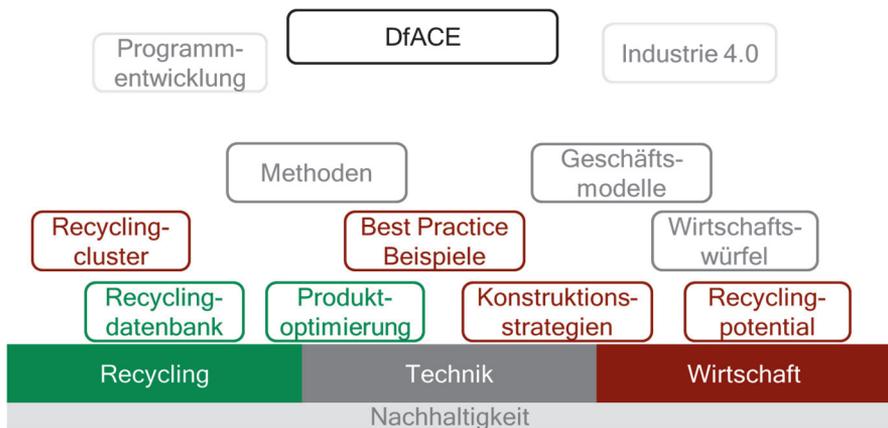


Abbildung 1: Auszug des Forschungsstands am Institut für Maschinenwesen: Recyclinggerechte Konstruktion

In Abbildung 1 ist der derzeitige Forschungsstand zu sehen, die nun folgenden Erläuterungen finden von unten nach oben statt. Auf Basis der Nachhaltigkeit liegen die drei großen Themengebiete: Recycling, Technik und Wirtschaft. All diese werden betrachtet. Die Leitfrage der Forschung ist:

*„Welche Maßnahmen müssen im Konstruktionsprozess für Produkte getroffen werden, um die Rohstoffwiedergewinnung aus den Produkten nach der Nutzung zu maximieren?“*

Anhand dieser Leitfrage werden weitere Fragestellungen für studentische Arbeiten ausgeschrieben. Die grün hinterlegten Felder stehen für bereits bearbeitete

Themenstellungen; die roten Felder sind in der Bearbeitung. Die detaillierten Fragestellungen zu den Feldern werden im Folgenden ausgeführt.

Die grau hinterlegten Felder sind geplante Arbeiten, bei diesen werden die Erkenntnisse der vorherigen Arbeiten aufgegriffen und die Fragestellung dahingehend aufgebaut. Die freien Flächen lassen Platz für Ansatzpunkte, die noch nicht genauer beschrieben werden können. Für die offenen Arbeiten ist geplant, dass diese stets aufeinander aufbauen oder einen Bezug zueinander haben.

Abschließend soll ein Programm entstehen, welches die gesamte Konstruktionsabteilung dabei unterstützt, Produkte für eine erweiterte Kreislaufwirtschaft zu erschaffen; Designed for Advanced Circular Economy – DfACE. Dies ist getreu dem Forschungsschwerpunkt der TU Clausthal eine sinnvolle Ergänzung zur Advanced Circular Economy. Eine digitale Lösung ist auch als Überführungsunterstützung für Industrie 4.0 zielführend.

### ***Produktoptimierung von externen Festplattengehäusen***

Umweltschutz ist ein aktuelles Thema mit zunehmender Bedeutung. Über zwei Drittel der deutschen Bevölkerung halten dieses Thema für sehr wichtig. Ziel der Arbeit ist es, den Recyclingstrom in der Kreislaufwirtschaft zu reduzieren und den Reuse-Strom zu erhöhen. In der Arbeit werden hierzu Produkte mit ihren Füge-techniken und den damit verbundenen Einfluss auf die Recyclingeignung des Produktes untersucht. Aus diesen Erkenntnissen wird eine Rekonstruktion des Produktes entwickelt.

In erster Linie soll eine Optimierung für die Kreislaufwirtschaft durch Nutzung der bekannten Füge-technik erreicht werden. Dafür ist eine nachvollziehbare und strukturierte Betrachtung notwendig. Dabei wird der Produkttyp und Recycling-ansatz für die jeweilige Baugruppe in Abhängigkeit der gewählten Füge-technik gewählt.

Das Überarbeiten von Produkten und anpassen auf eine recyclinggerechtere Konstruktion ist eine der ersten Tätigkeiten um praktische Kenntnisse zu erlangen. Die Analyse des Ist-Zustandes und anschließender Optimierung muss weiterhin unter den Gesichtspunkten der vorherigen Nutzerfreundlichkeit liegen, damit das Produkt auch nach der Optimierung noch die Anforderungen des Kunden erfüllt.

Die in der Konstruktion entwickelte Produktstruktur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Recyclingeignung des Produktes. Dabei ist der Ansatz innerhalb der Kreislaufwirtschaft ebenfalls entscheidend. Weiterhin ist dann die angewandte Füge-technik innerhalb der Produktarchitektur ausschlaggebend.



Abbildung 2: Komponenten von demontierten externen Festplatten /3/

Für die Forschungsfrage wurden sechs externe Festplatten und zwei Stichsäge demontiert und analysiert. In Abbildung 2 sind demontierte Komponenten beispielhaft abgebildet. Diese Erkenntnisse sind mithilfe der METUS-Raute, einem Werkzeug zur Visualisierung der Verknüpfung von Komponenten und ihrer physikalischen Beziehungen, in Abbildung 3 abstrahiert.

Mit bekannten Konstruktionsmethoden und den Erkenntnissen der Demontage wird eine Rekonstruktion entworfen und ein Prototyp auf einem 3D-Drucker hergestellt. Dieser Prototyp wird mit den demontierten Festplatten verglichen und es wird ermittelt, welcher Nutzen sich aus der Rekonstruktion schließen lässt.

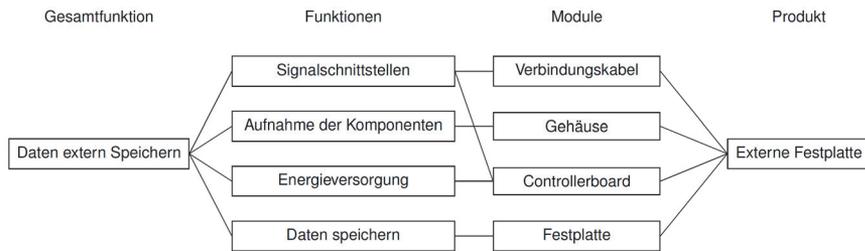


Abbildung 3: METUS-Raute zur Produktstruktur eines externen Festplatte /3/

Abschließend sollten das Vorgehen und die Dokumentation derart nachvollziehbar sein, dass dieses Vorgehen bei weiteren Untersuchungen anderer Produkte als Leitfaden genutzt werden kann.

Die in der Untersuchung erlangten Erkenntnisse werden anschließend auf Ansätze der Kreislaufwirtschaft bezogen, ausgewertet und abschließend auf ihrer Eignung bewertet. Zum Abschluss der Arbeit liegt ein Prototyp vor (Abbildung 4), welcher die theoretischen Ergebnisse praktisch untermauert.

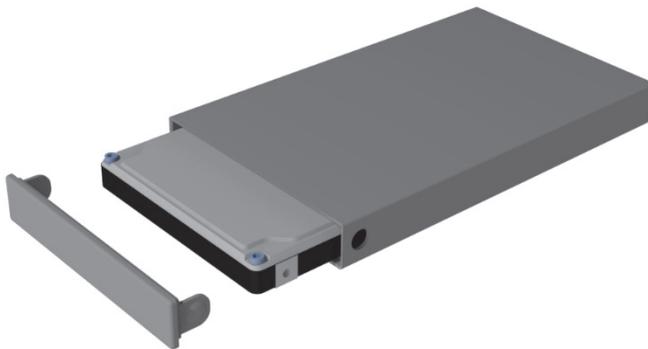


Abbildung 4: CAD Modell eines optimierten externen Festplattengehäuses /3/

Als Erkenntnis lässt sich festhalten, dass recyclingorientierte Produktgestaltung auch in der heutigen Zeit noch großes Potential besitzt und sich damit wertvolle Primärressourcen einsparen lassen. In dieser Arbeit wird dies durch eine passende Materialwahl und durch die optimierte Demontierbarkeit der externen Festplattengehäuse erreicht. Als Gesamtnutzen der Rekonstruktion folgt eine Optimierung des Kreislaufprozesses.

## Recyclingdatenbank

Wissen über bereits existierenden Recyclingverfahren und deren Wirtschaftlichkeit ist nötig um Produkte zu entwickeln, welche diesen Verfahren später zugeführt werden.

Im Konstruktionsprozess ist der Zugang zu Informationen von großer Bedeutung. Ein schneller und zuverlässiger Zugriff auf diese Daten unterstützt bei der Lösungsfindung und spart Zeit. Für eine kreislaufgerechte Produktgestaltung ist eine Vielzahl von Daten nötig, um eine optimale Lösung zu ermöglichen.

Durch die Erstellung einer Datenbank können Informationen, welche die Konstruktion für eine Kreislaufwirtschaft beeinflussen, langfristig abgelegt werden. Weiterhin muss ein einfacher Zugang gewährt werden. Um dies zu erreichen muss eine Onlinefähigkeit berücksichtigt werden.

The screenshot shows a periodic table with a tooltip for Calcium (Ca) at position 20. The tooltip text is: "Bezeichnung: Calcium", "Vorkommen: natürlich", "Recycling: möglich". The interface includes a navigation bar with links: Home, Periodensystem, Werkstoffe, Recyclingmöglichkeiten, Recyclingverfahren, Suche, FAQ, and Log-In.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc						26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y						44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	

Abbildung 5: Screenshot der Onlinemaske mit Auszug der in der Datenbank erfassten Recyclingverfahren /4/

Der Kern der Kreislaufwirtschaft liegt in den chemischen Elementen und der notwendigen Rückgewinnung dieser Elemente. Daher liegt der Datenbank das Periodensystem der Elemente zu Grunde (siehe Abbildung 5). In einer Literaturrecherche werden anschließend bekannte Verfahren zu den jeweiligen Elementen ermittelt. Ziel ist die Hinterlegung der Wiedergewinnbarkeit der Elemente nach heutigem Wissensstand.

Für diese Aufgabenstellung ist eine breite und flache Bearbeitung der Thematik vorgesehen. Demnach werden in der Datenbank (noch) nicht alle Besonderheiten in der tiefe ermittelt und beschreiben. Eine Quellenangabe zu weiteren Informationen der Verfahren ist für eine spätere, weitere Ausarbeitung der Datenbank notwendig.

Die Datenbank soll weiterhin die Möglichkeit bieten, dass Nutzer ihr eigenes Wissen einbringen können. Um die Qualität der Datenbank aufrecht zu erhalten, muss vor der Implementierung eine Kontrolle der eingegebenen Daten erfolgen.

Für die spätere Weiterentwicklung der Datenbank muss die Software und ein zukunftsfähiges Format gewählt werden. Weiterhin ist eine ausführliche Dokumentation notwendig, um den Bearbeitern späterer Aufgabenstellungen den Einstieg zu ermöglichen.

Diese Arbeit stellt die Basis der Datenbank dar. Später werden weitere Funktionen zur Datenverknüpfung implementiert. Die jetzige Verknüpfung der chemischen Elemente mit den bisherigen Aufbereitungsverfahren soll später noch auf Werkstoffe und Produkte erweitert werden. Die nötigen Anbindungen dafür sind bei der Erstellung der Datenbank zu berücksichtigen.

### **Konstruktionsstrategien**

Eine Vielzahl von Konstruktionsrichtlinien werden bereits in der Konstruktion verfolgt. Diese sind den Unternehmen und Konstrukteuren bekannt und die Arbeitsweise nach diesen Richtlinien ist vertraut. Werden die grundlegenden Recyclingansätze – *Reuse, Repair, Remanufacturing, Recycling* – in einen Kontext zu den bisherigen Richtlinien gesetzt erhöht sich die Zugänglichkeit und Akzeptanz dieser Ansätze.

Die Konstruktion stützt sich innerhalb der Produktentwicklung auf Konstruktions-schemata und -strategien. Diese sind strukturiert, nachvollzieh- und belastbar. Abhängig von den zu konstruierenden Produkten werden unterschiedliche Maßnahmen zur Zielerreichung angewandt. Diese sind beispielsweise betriebsintern gewollt oder gesetzlich gefordert.

Für die Linearwirtschaft konstruierte Produkte werden nur innerhalb deren Nutzungsphase betrachtet. Die Kreislaufwirtschaft berücksichtigt, unter anderem, zusätzlich die Nachnutzungsphase, unter den Aspekten wenig aus dem Wirtschaftskreislauf auszubringen und gleichzeitig die Neueinbringen von Rohstoffen zu verringern.

Für die kreislaufgerechte Konstruktion gibt es verschiedene Ansätze. Die grundlegenden, bekannten Ansätze werden erarbeitet und innerhalb des Kreislaufwirtschaftssystems eingeordnet. Die Vor- und Nachteile werden kurz herausgestellt.

Für das Erreichen der Ansätze gibt es unterschiedliche Maßnahmen innerhalb der Konstruktion. Bereits bekannte Maßnahmen werden unabhängig von den Ansätzen gesammelt und deren Hauptmerkmale zusammengefasst, weiterhin werden die positiven und negativen Einflüsse der Maßnahmen untereinander dargestellt.

Für jeden dargestellten Kreislaufansatz werden die gesammelten Maßnahmen betrachtet. Aus den Ergebnissen werden Konstruktionsstrategien erarbeitet. Diese

Konstruktionsstrategien werden anschließend für verschiedenen Produktgruppen oder Produkttypen betrachtet und bewertet.

Die möglichen Einflüsse der neu entwickelten Konstruktionsstrategien werden anhand des realen Marktes für ausgewählte Produktgruppen betrachtet und der zukünftige Einfluss daraus abgeschätzt. Bei dieser Darstellung werden vor allem die frei werdenden Rohstoffe aus den bereits produzierten Produkten der Vergangenheit betrachtet.

### **Recyclingpotentiale**

Zur Prüfung, an welchen Produkten mit kleinen Änderungen viel bewirkt werden kann, wird festgestellt welche Produkte in hoher Stückzahl im Markt vertreten sind. Weiterhin ist von Interesse, wie hoch der Materialeinsatz bei dem entsprechenden Produkt ist. Die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Produktes lässt auf den Zeitpunkt schließen, ab dem das Produkt in die Aufbereitung gegeben werden kann.

Für die ersten Analysen wird festgestellt, welche Produktgruppen ein hohes Marktvolumen haben. Hierbei ist der Betrachtungshorizont der Produkte umfangreich, allerdings beläuft sich dieser für die ersten Untersuchungen auf Deutschland. Weiterhin müssen Produkte betrachtet werden, welche homogen, also sehr ähnliche sind. Diese sind in Ihrer Funktion ähnlich, allerdings unterscheiden sie sich in der Produktarchitektur.

Nachdem eine breite Vielfalt erfasst worden ist, werden die gesammelten Produkte darauf untersucht, welche Rohstoffe sich in diesen befinden und ob diese recycelbar sind. Eine Abschätzung der durchschnittlichen Wertigkeit einer Produktgruppe, in Verbindung mit der Stückzahl, macht eine Vergleichbarkeit der Volumina möglich. Für die vertiefte Betrachtung wird die durchschnittliche Zeit am Markt betrachtet. Damit lässt sich das Sekundärrohstoffpotential über die Zeit abschätzen.

Für die ausgearbeiteten Produkte lassen sich Konstruktionsleitlinie, für den jeweiligen Recyclingansatz erarbeiten, welche auch mit geringen Aufwand einen hohen Nutzen für die Kreislaufwirtschaft erwarten lassen.

### **Recyclingcluster**

Die Logistik hinter dem Recyclingprozess ist ein weiterer Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit von Recyclingvorhaben. Weiterhin sind Informationen über die Route, mit allen Etappen, maßgeblich um Lücken im Kreislauf zu erkennen.

Für eine erste Übersicht wird geprüft wo in Deutschland Recycling stattfindet; um die Frage zu beantworten: Welche Produkte werden mit welchem Verfahren, an welchem Ort, zu welchem Preis, zu welchem Sekundärrohstoff.

Die Auflistung der Recyclingbetriebe muss entsprechend Umfangreich sein. Sowohl lokale Bündelungen von Unternehmen sind interessant, als auch deren Kapazität; um die gesamte Wertschöpfungskette abbilden zu können und den Kreis zu

schließen. Daher ist eine breite Recherche vorzuziehen. Im Gegenzug kann kein Anspruch auf Vollständigkeit für die Erfassung jedes einzelnen kleineren Betriebes erhoben werden.

Abschließend soll durch das Recyclingcluster eine Abbildung von bestehenden Recyclingkreisläufen und das Erkennen von Lücken in noch offenen Kreisen möglich sein.

### **Best Practice Beispiele**

Bei Premiumprodukten liegt das Hauptaugenmerk des Kunden nicht immer auf dem günstigsten Preis. Das verschafft dem Hersteller mehr Freiheit bei der Konstruktion, da nicht immer die kostenminimale Alternative gewählt werden muss um die Kundenansprüche zu erfüllen.

Der Markt der Supersportmotorräder ist solch ein Premiummarkt. Innerhalb der Arbeit werden besondere Merkmale ausgewählter Motorräder mit Standardausführungen verglichen. Im Fokus liegen unter anderem Einarmschwingen und Bremssysteme.

Diese Besonderheiten werden auf Ihre Kreislaufwirtschaftseignung geprüft. Gerade bei langfristigen Investitionsgütern werden viele Komponenten so ausgelegt, dass diese zügig zu demontieren sind (*Design for Repair*). Dadurch kann im Falle eines Ausfalles eines einzelnen Modules das gesamte Produkt wieder zügig in Betrieb genommen werden.

Weiterhin müssen langfristige Investitionsgüter langlebig sein. Daher sind viele Komponenten, die nicht verschleifen, entsprechend robust ausgelegt (*Design for Reuse*). Dies steht gerade in der Fügetechnik nicht immer im Einklang mit dem vorherigen *Repair-Ansatz*. Dieser Konflikt muss innerhalb der Produktstruktur berücksichtigt werden.

Die Arbeit soll abschließend die Erkenntnis bringen, welche Konstruktionsmaßnahmen bereits am Markt vorhanden sind und welchen Einfluss diese auf die Kreislaufwirtschaft haben; für den Fall, dass der Kostendruck im Konstruktionsprozess, durch den Premiummarkt, geringe ist.

### **Ausblick zur weiteren Forschung**

Wie in Abbildung 1 gezeigt setzt sich das Themenfeld aus den Bereichen Recycling, Technik und Wirtschaft zusammen. Bisher liegen die Arbeiten eng an jeweils einem der Themengebiete.

Für die folgenden Forschungsfragen werden die Ergebnisse der Arbeiten als Grundlage genutzt um die Schnittstellen intensiver zu bearbeiten. Die daraus hervorgehenden Ergebnisse werden stets weiter zusammengeführt. Abschließend werden die Ergebnisse in einer abschließenden Arbeit zusammengefasst.

Geplant ist die parallele Entwicklung einer CAD Schnittstelle die den Konstruktionsprozess, mit den erarbeiteten Erkenntnissen, auf allen Ebene der Konstruktionsabteilung unterstützen soll.

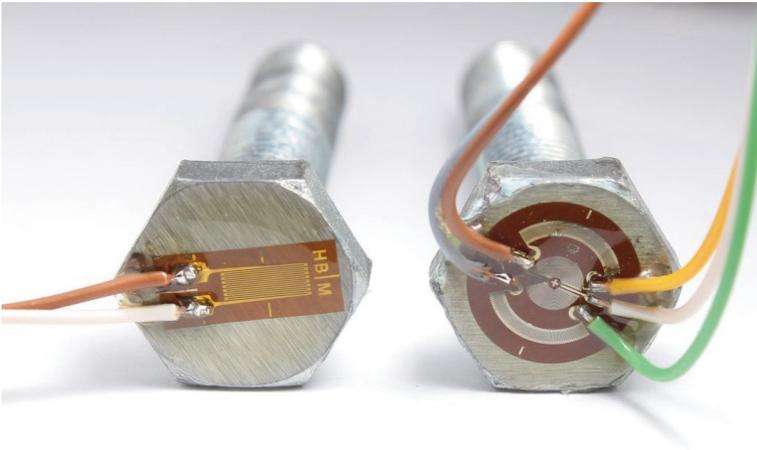
### Zusammenfassung

Die Forschung an der TU Clausthal folgt zeitgemäß den Bedürfnissen der modernen Wirtschaft. Anforderungen aus der Politik, der Ökonomie und der Gesellschaft gewinnen an Gewicht und werden berücksichtigt. Die Forschung ist zunehmend interdisziplinär, dennoch ist die hohes Detailwissen in Fachdisziplinen notwendig, um eine weitere Optimierung möglich zu machen.

Durch die strukturierte Arbeitsweise soll gewährleistet werden, dass möglichst viele Details erfasst und anschließend berücksichtigt werden können. Die Überführung der Linearwirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft ist notwendig um den Lebensstandard und Wohlstand weltweit aufrecht zu erhalten. Durch ein „Design for Advanced Circular Economy“ (DfACE) werden nicht nur die Effekte des immensen Weltkonsums gemildert, maßgeblicher ist, dass die Ursachen abgemildert oder vermieden werden.

### Literatur

- /1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, Druck und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG Frankfurt am Main November 2016
- /2/ Europäisches Parlament, Richtlinie 2008/98/EG, November 2008
- /3/ Grasser, F.: Bachelorarbeit: Praktische Produktanalyse und Kreislaufwirtschaft angepasste Gestaltungsoptimierung, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal 2019
- /4/ Eberle, C.: Masterarbeit: Erstellung einer Datenbank zu Recyclingverfahren für die Elemente des Periodensystems, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal 2019



## Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik





## Systemgrößenmodellierung mit neuronalen Netzen – Ergänzung zur Baugruppenoptimierung

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.

*Dieser Artikel beschreibt eine Möglichkeit, wie die Aussagekraft eines Simulationsmodells gesteigert werden kann, indem Prüfstands Ergebnisse zur Validierung genutzt werden. Dabei wird mit Hilfe von neuronalen Netzen ein Ersatzmodell eines Teilsystems geschaffen. Dieses neuronale Netz dient dann als zusätzliches Teilsystem, welches zur Optimierung einer Baugruppe dienen soll. Dabei wird eine kleine Ausführung zu den neuronalen Netzen als Einleitung zum Themenfeld dienen.*



*This article describes a way to increase the validity of a simulation model by using test bench results for validation. A replacement model of a subsystem is created with the help of neural networks. This neural network then serves as an additional subsystem, which is to serve for the optimization of an assembly. A small version of the neural networks will serve as an introduction to the topic.*

### Hintergrund

Im Rahmen eines Forschungsprojektes soll eine verfahrenstechnische Anlage zur Wassergewinnung aus der Luft entwickelt werden. Für dieses Verfahren wird ein Verdichter benötigt, welcher mit den konventionellen Typen nicht bedient werden kann. Daher ist ein Berechnungsmodell entstanden, um die Eigenschaften des neu entwickelten Verdichters abschätzen zu können. Dieses Berechnungsmodell besteht aus verschiedenen Teilmodulen, welche unterschiedliche physikalische

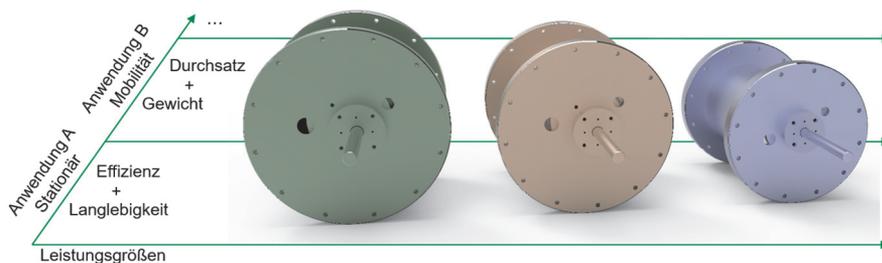


Abbildung 1: Anforderungsspezifische Baureihenentwicklung

Systemgrößen kalkulieren. Gesamtheitlich betrachtet werden so alle Teilsysteme des Verdichters kombiniert, um so die jeweiligen Baugrößen des Verdichters hinsichtlich Baugruppenänderungen simulieren zu können. Das so entwickelte Berechnungsmodell erlaubt mit Hilfe eines Optimierungsvorgangs eine Veränderung der Geometrie des Verdichters hinsichtlich der Maximierung von Anforderungserfüllungen. /1/

Aus der Abbildung 1 kann das derzeitige Grundprinzip abgeleitet werden. Mit Hilfe des Berechnungsansatzes ist es möglich, hinsichtlich spezieller Kundenspezifikationen, eine Baureihe mit bestimmten Leistungsabstufungen zu generieren.

Anhand praktischer Erfahrungen wurde festgestellt, dass das Berechnungsmodell die Systemgröße des Druckes überschätzt. Demnach gilt das modellierte thermodynamische System nicht für den Systemdruck und muss korrigiert werden.

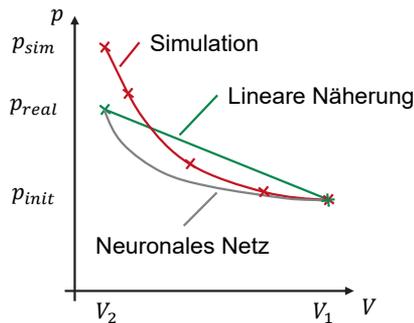


Abbildung 2: Modellierungsfehler

Bekannt aus dem Versuch sind der Anfangsdruck sowie Enddruck des Verdichters. Interessant an dem System ist allerdings das Verhalten des Druckes während des Verdichtungs Vorganges. Mit Hilfe der ausschließlichen Messung des Anfangs und Endzustandes des Gases können demnach keine validen Aussagen über das Verdichtungsverhalten innerhalb einer Kammer getroffen werden (Abbildung 2 – Lineare Näherung). Dafür wird das bisherige Berechnungsmodell herangezogen. Dieses Berechnungsmodell soll für eine Verhaltensnachbildung des Druckes genutzt werden (Abbildung 2 – Simulation). Es soll durch die Multiplikation einer Funktion wie in der Formel 1 gezeigt, eine Nachahmung des implementierten Druckverhaltens erreicht werden.

$$p(V_i) = \frac{p_{sim}}{p_{sim}(V_i)} \cdot p_{real} \quad 1$$

Mit Hilfe dieser Funktion ist es möglich, das Systemverhalten wie in Abbildung 2 als *Neuronales Netz* zu generieren. Der Indizier beschreibt das jeweilige Volumen in dem nummerischen Teilschritt  $i$ . Diese Funktion kann nun in diversen Dimensionen aufgestellt werden. Beispielsweise kann eine Druckveränderung hinsichtlich der

Verdichtungsfrequenz, Umgebungstemperatur oder aber auch von anderen Systemgrößen abhängig sein. Als Voraussetzung zur Einbindung der Systemgröße in das Gesamtverhalten, muss die Systemgröße als Messgröße erfasst werden.

### Neuronale Netze

Neuronale Netze sind eine Entwicklung aus dem Jahr 1948, dort wurden von *Warren McCulloch* und *Walter Pitts* die ersten Entwürfe von neuronalen Netzen vorgestellt. Allerdings waren aus damaliger technischer Sicht die Anwendungsmöglichkeit stark begrenzt, da nicht ausreichend Rechenleistung sowie Daten zum Anlernen von diesen Netzen vorhanden waren. Erst wesentlich viel später, im Jahr 1982, wurde ein Verfahren von *Paul Werbos* an neuronalen Netzen vorgestellt, die mittels *Backpropagation lernen*. Mit dessen Hilfe ist es möglich, mehrschichtige neuronale Netze anlernen zu können.

Ein künstliches Neuron besteht allgemein aus den Eingängen, einer Gewichtung, einer Eingangsfunktion und der Aktivierungsfunktion. In der nachfolgenden Abbildung ist der Grundaufbau eines Neurons *Perceptron* abgebildet.

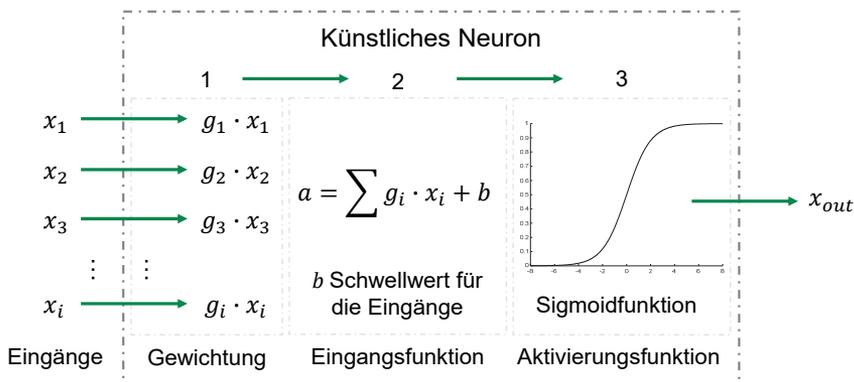


Abbildung 3: Grundaufbau eines einzelnen *Perceptron*

Die Abbildung 3 zeigt die künstliche Nachbildung des natürlichen Vorbildes in der Abstraktion von mathematischen Zusammenhängen. Wie gesehen werden kann, sind die dahinter zu verstehenden Mechanismen reine Matrizenrechnungen. Die *Eingänge* des Neurons entsprechen den Einflussgrößen eines nachzubildenden Systems, diese werden bei der Übergabe mit einer *Gewichtung* versehen. Diesen mathematischen Zusammenhang zwischen den *Eingängen* und der *Gewichtung* wird auch *Schur-Produkt* genannt. Werden diese jeweiligen *Eingänge* mit der *Gewichtung* und einem *Schwellwert* summiert, wird die *Aktivität* des Neurons ermittelt. Nun wird die *Aktivierungsfunktion* mit dem Wert aus der *Eingangsfunktion* ausgewertet, die hier hinterlegte Funktion entscheidet über das „*Feuern*“ des künstlichen Neurons./2/

Eine Verhaltensanpassung des *Perceptron Netzes* kann mit Hilfe der *Schwellwerte* und den jeweiligen *Gewichtungen* durchgeführt werden. Dabei wird zu Beginn ein Gütefunktional erstellt, dieses beschreibt die Genauigkeit der Modellvorhersage mit dem tatsächlichen System. Ein typisches und mögliches Gütefunktional kann die Form 2 haben./2/

$$\varepsilon(x) = Y_{\text{Sensor}}(x) - y_{\text{sim}}(x) \quad 1$$

$$E(\varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(x)^2 \quad 2$$

Die Funktion 2 beschreibt die mittlere Gesamtabweichung des entwickelten Modells zum realen System und sollte idealerweise den Wert von Null annehmen. Diese Problematik ist ein mehrdimensionales Optimierungsproblem und kann beispielsweise über das *Backpropagation Verfahren* und einem Optimierungsalgorithmus gelöst werden. Das *Backpropagation Verfahren* wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Neuronale Netze können in diversen Topologien zusammengestellt werden, um so unterschiedlichste Aufgaben zu erfüllen. Für den praktischen Anwendungsfall in der Systemmodellierung eines Verdichters, bietet sich das von *Frank Rosenblatt* erstmals entwickelte *Perceptron* an. Ein *feedforward Perceptron Netz* besitzt nach dem Anlernen die Fähigkeit, ein Verhaltensmuster wiederzugeben. Dies bedeutet im übertragenden Sinn, dass der Druckverlauf des Verdichters mit Hilfe eines *Perceptron Netzes* nachgeahmt werden kann. Dadurch, dass es sich hierbei um eine Verhaltenswiedergabe handelt, müssen Techniken des *supervised learning*

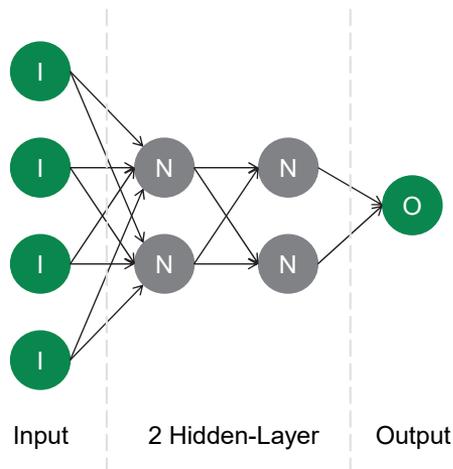


Abbildung 4: Feedforward Perceptron Netz

(überwachtes Lernen) angewandt werden. Die grundlegende Topologie des betrachteten Systems ist in Abbildung 4 dargestellt.

## Backpropagation Verfahren

Das *Backpropagation Verfahren* gehört mit zu den gradientenbasierenden Optimierungsverfahren und soll in diesem Abschnitt nicht in allen rechnerischen Details wiedergegeben werden. Vielmehr dient dieser Abschnitt dazu, ein grundlegendes Verständnis des *Backpropagation Verfahrens* zu vermitteln.

Die grundlegende Idee des Verfahrens ist, das in Formel 2 gezeigte Gütefunktional nach den beschriebenen einflussnehmenden Parametern, den *Gewichtungen* und den *Schwellwerten*, gradientenbasierend zu optimieren. Dabei wird das neuronale Netz gesamtheitlich betrachtet und eine *globale* oder *lokale* Lösung gefunden. Wird in diesem Beispiel ein einzelnes *Perceptron* betrachtet, gilt folgendes Verhalten des Neurons:

$$x_{aus,1,n} = f_{aktiv,1}(\sum_i g_{1,j,n} \cdot x_{ein,1,j} + b_{1,n}) \quad 3$$

$$a_{1,n} = \sum_i g_{1,j,n} \cdot x_{ein,j} + b_{1,j,n} \quad 4$$

Wobei  $x_{in}$  dem *Eingangsvektor*,  $b$  dem *Schwellwert* eines Neurons,  $g$  dem *Gewichtungsvektor*,  $x_{out}$  dem *Ausgabewert* und  $f_{aktiv}$  der Auswertung der *Aktivierungsfunktion* entsprechen. Dabei bedeutet der Index  $i$  die Anzahl an *Eingängen* je Neuron und  $n$  die Nummer des Neurons in einem Layer. So kann ein Ausgabevektor für einen Layer (mehrere parallel angeordnete Neuronen) aufgebaut werden

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} \\ \vdots \\ a_{1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{1,1,1} & \cdots & g_{1,j,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{1,1,n} & \cdots & g_{1,j,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ein,1,1} \\ \vdots \\ x_{ein,1,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{1,1} \\ \vdots \\ b_{1,n} \end{bmatrix} \quad 5$$

$$\begin{bmatrix} x_{aus1,1} \\ \vdots \\ x_{aus1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{aktiv}(a_{1,1}) \\ \vdots \\ f_{aktiv}(a_{1,n}) \end{bmatrix} \quad 6$$

Für den zweiten Layer kann nach dem gleichen Prinzip der Ausgabevektor bestimmt werden, nur ist der Ausgabevektor des ersten Layers, der Eingabevektor des zweiten Layers. So kann zwischen den zwei Layer gesagt werden, dass diese im mathematischen Sinn verkettet sind und entsprechend bei einer Differenzierung die Kettenregel angewendet werden muss.

$$(u \circ v)'(x) = u'(v(x)) \cdot v'(x)$$

Das *Backpropagation Verfahren* nutzt die oben erwähnte Rechenregel aus, um das gesamtheitliche Netz zu betrachten. Die Ausgabe eines neuronalen Netzes kann über die *Gewichtungsmatrix* sowie dem *Schwellwertvektor* beeinflusst werden. Beide dieser Größen fließen in die *Aktivität* des Neurons ein und beeinflussen demnach das Gütefunktional. Wird ein dreischichtiges Netz betrachtet, kann dies wie folgt geschrieben werden

$$\frac{dE(a_3(a_2(a_1)))}{da_1} = \frac{dE(a_3(a_2(a_1)))}{da_3} \cdot \frac{da_3}{da_2} \cdot \frac{da_2}{da_1} \quad 7$$

Im Grunde bedeutet dies lediglich, die *Aktivität* des dritten Neurons besitzt eine direkte Abhängigkeit zu dem ersten Neuron, die über die zwischenliegenden Neuronen mit beeinflusst werden. Im Normalfall müsste noch eine Verkettung der *Aktivitäten* zu der *Aktivierungsfunktion* vorhanden sein, diese wurde allerdings weggelassen. Hier wird eine weitere Eigenschaft des *Backpropagation Verfahren* sichtbar, das Verfahren benötigt eine differenzierbare *Aktivierungsfunktion*. Daher werden zumeist eine Linearfunktion, Sigmoidfunktion oder andere differenzierbare Funktionen als *Aktivierungsfunktion* ausgewählt.

Damit die Einflussnahme der in Gleichung 7 gezeigten Verkettung deutlich wird, hier eine kurze Ausführung der Differenzierung.

$$\frac{da_2}{da_1} = \frac{d(G_2 \cdot x_{\text{ein},2} + b_2)}{da_1} \quad 8$$

Dadurch das der Eingabevektor des zweiten Netzes der Ausgabevektor des ersten Netzes ist, kann diese Formulierung ebenso anders geschrieben werden.

$$\frac{da_2}{da_1} = \frac{d(G_2 \cdot x_{\text{aus},1} + b_2)}{da_1} \quad 9$$

Nun kann beobachtet werden, dass diese Differenzierung zu

$$\frac{da_2}{da_1} = \frac{d(G_2 \cdot x_{\text{aus},1})}{da_1} \quad 10$$

vereinfacht werden kann, da keine Abhängigkeit des *Gewichtungsfaktors* zwischen den *Layer* vorhanden ist. Entsprechend kann diese Formulierung auch für alle weiteren Differenzierungen in Gleichung 7 eingefügt werden und so die Rückführung auf den *Eingabevektor* des ersten *Layers* gezeigt werden. Aus diesem Grund ist der Name des Verfahrens entstanden.

Nummerisch werden letztendlich die Gradienten (Änderung des Gütefunktional in Abhängigkeit zu den Einflussparametern) der einzelnen *Layer* bestimmt. Dabei wird mit dem letzten *Layer* (Ausgabelayer) angefangen und so rückführend alle weiteren Gradienten der nachfolgenden *Layer* gebildet. So können für die *Schwellwerte* sowie *Gewichtungen* eine Abstiegsrichtung festgelegt werden, sodass das Gütefunktional

minimal wird. Das Initialnetz (zufällige *Gewichtungen* sowie *Schwellwerte*) und der Zusammenhang von Messwerten sowie Systemgrößen sind Voraussetzungen für das Verfahren.

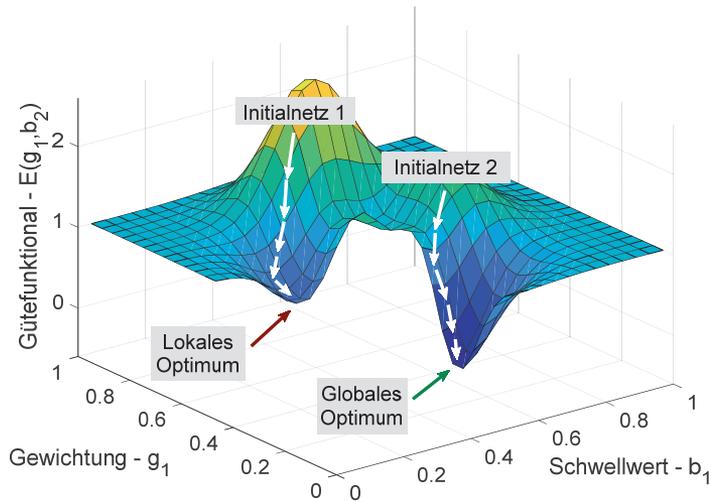


Abbildung 5: Generalisierungsproblematik /1/

Dadurch, dass es sich um einen gradientenbasierten Ansatz handelt, bedeutet dies, dass durch das Initialnetz die Endlösung bereits vorgegeben wird. Es werden demnach startwertabhängige Endnetze generiert, die als Beschreibung des Systemverhaltens dienen. Damit diese Startwertabhängigkeit besser Verstanden wird, eine kleine Visualisierung des Problems in Abbildung 5. Aus der Abbildung wird deutlich, dass je nach festgelegten Initialnetz, induziert durch den Gradienten, eine andere *Gewichtung* und anderer *Schwellwert* als eine mögliche Lösung zu finden sind. Letztendlich kann beispielweise bei dem Verhalten der angelegten Messwerte eine sehr genaue Übereinstimmung bei dem globalen Optimum zwischen Realsystem und Modell erreicht werden. Werden nun Systemparameter betrachtet, welche außerhalb des angelegten Bereichs hinausgehen, entstehen große Abweichungen des Modells. Diese Extrapolationsproblematik kann auch mit der Aufteilung der Messwerte in Trainingsdatensätzen und Validationsdatensätzen untersucht werden. Angeleitet wird das Netz mit den Trainingsdaten, die Güte kann dann mit den Validationsdatensätzen überprüft werden.

## Ausgangsposition

Als kleines Beispiel soll in diesem Abschnitt eine eigens modifizierte Funktion mit Hilfe eines neuronalen Netzes nachmodelliert werden. Der genannte Verdichter arbeitet nach dem Verdrängerprinzip, was bedeutet, dass die Druckerzeugung des Verdichters maßgeblich von der Geometrie des Verdichters abhängig ist und im Idealfall keinen frequenzabhängigen Anteil der Druckdifferenz besitzt. In der Praxis hat sich allerdings ein frequenzabhängiger Anteil ausgebildet, welcher im bisher implementierten Berechnungsmodell /1/ nicht berücksichtigt wird. Diese Berücksichtigung soll mit Hilfe eines neuronalen Netzes erfolgen, um so die Genauigkeit des Modells zu verbessern. Zu Beginn eine kurze Vorstellung des betrachteten fiktiven Messsignals in Abbildung 6.

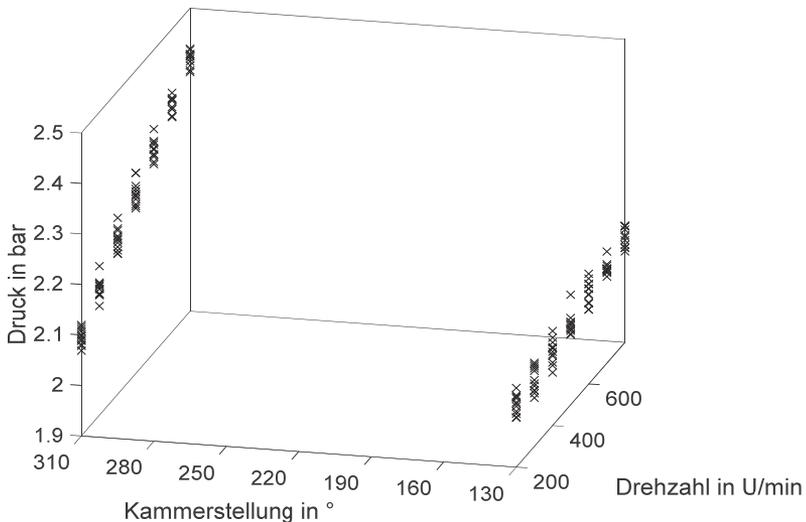


Abbildung 6: Fiktive Messergebnisse des Initial- und Enddruckes in Abhängigkeit der Frequenz

Die Abbildung 6 zeigt die jeweilig gemessenen Initial- sowie Enddrücke in Abhängigkeit der Drehzahl. Dabei wurden die jeweiligen Messpunkte mit einem Kreuz in dem Diagramm abgebildet. Bekannt sind im realen Fall ebenso ausschließlich die Initial- sowie Enddrücke, der Druck innerhalb einer Kammer während des Umlaufs ist letztendlich nicht bekannt. Um diese Druckentwicklung über den Umfang ebenso modellieren zu können, wird, nachdem die Mittelwerte der Messergebnisse gebildet worden sind, nun die Formel 1 angewendet. Das so erzielte Ergebnis ist in der nachfolgenden Abbildung 7 festgehalten.

Es wird nun versucht, mit Hilfe dieses Signales und eines neuronalen Netzes eine Systemnachbildung zu erstellen. Dazu wird die *Toolbox Neural Fitting* von *Matlab*®

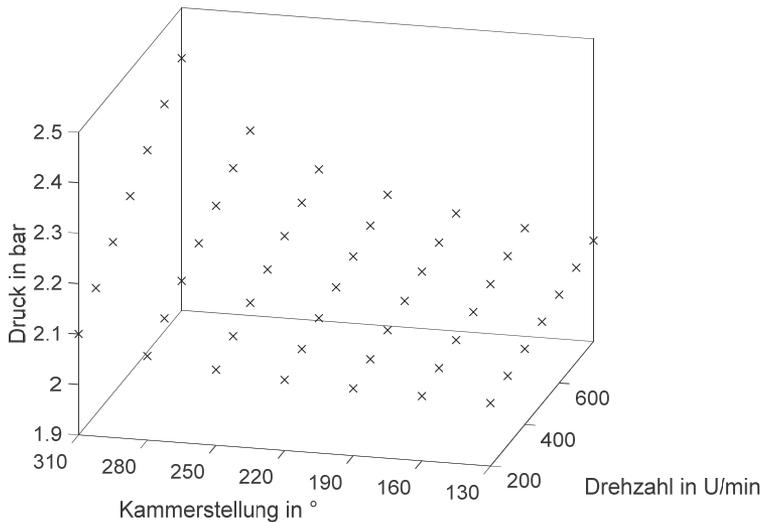


Abbildung 7: Trägerfunktion der Druckerzeugung in Abhängigkeit der Kammerstellung und der Drehzahl

genutzt. Diese Toolbox bietet eine breite Möglichkeit an verschiedenen *Performance* Untersuchungen sowie bereits inkludierte Vorbereitungsmaßnahmen an. Im Anschluss sollen dann verschiedene Varianten des neuronalen Netzes diskutiert werden. /4/

## Ausführung

Die gezeigten Datensätze in dem vorangegangenen Kapitel sind mit Hilfe der *Neural Fitting Toolbox* in einer höheren Messgrößenanzahl als Inputparameter gewählt worden. Der nächste Schritt ist die Aufteilung des Datensatzes in *Trainingsdatensatz*, *Validationsdatensatz* und *Testdatensatz*. Das neuronale Netz wird mit dem *Trainingsdatensatz* angelehrt.

Mit Hilfe des *Validationsdatensatzes* wird dann die Generalisierung des neuronalen Netzes gemessen. Dazu wird mit Hilfe des erstellten Modells die Vorhersage zu dem *Validierungsdatensatz* überprüft und damit das Gütefunktional berechnet sowie als Vergleichsgröße genutzt. Generell kann gesagt werden, dass ein neuronales Netz durch zu intensives Anlernen des Trainingsdatensatzes zu einer Art Verinnerlichung des Datensatzes führen kann. Das bedeutet, dass das neuronale Netz eine exakte Nachbildung der Punktwolke ist, dieses Phänomen wird auch *Overfitting* genannt. So wird das Gütefunktional zwar bei dem Trainingsatz ein Minimum erreichen, jedoch würde eine Überprüfung mit dem Validierungssatz zu einer wesentlich

größeren Abweichung vom eigentlichen Modell führen. Daher werden der *Trainingsdatensatz* und *Validationsdatensatz* gleichzeitig zum Anlernen des Netzes überprüft. Ein gutes Indiz zur Generalisierung des Modells wird dann erreicht, wenn nach Möglichkeit das Gütefunktional von dem *Trainingsdatensatz* sowie dem *Validationsdatensatz* nach den jeweiligen Optimierungsepochen gleichzeitig ein Minimum erreichen.

Der *Testdatensatz* besitzt die Aufgabe, das Modell auf die Performance zu überprüfen, dabei wird dieser Datensatz ausgewertet und so auch geschaut, ob alle nötigen Informationen in dem erstellten Modell vorhanden sind. Es kann beispielsweise sein, dass gewisse Informationen des *Testdatensatzes* nicht in dem *Trainingsdatensatz* enthalten sind und entsprechend ein Modell erstellt worden ist, welches nicht dem gewollten entspricht. Im Grunde kann so ebenfalls das Gütefunktional vom *Testdatensatz* sowie vom *Validierungsdatensatz* überprüft werden. Liegen die jeweiligen Gütefunktionalwerte wesentlich auseinander, ist der Informationsgehalt der Trainingsdaten nicht ausreichend. Entweder kann dann eine neue Zuordnung zu den jeweiligen Datensätzen eine Besserung erreichen, oder es müssen gänzlich bessere Informationsdaten verwendet werden. Die Toolbox *Neural Fitting* bietet eine automatisch zufällige Zuordnung dieser Datensätze an. Hier kann ein Prozentsatz des Datensatzes ausgewählt und entsprechend zum Anlernen sowie zur Performanceüberprüfung genutzt werden.

Die *Neural Fitting Toolbox* erlaubt das Erzeugen von einem zweischichtigen neuronalen Netz, welches ein sehr flaches Netz repräsentiert. Eine Möglichkeit in der genannten Toolbox das Verhalten des neuronalen Netzes anzupassen, falls unbefriedigende Ergebnisse generiert werden, ist unter anderem die Anzahl an Neuronen pro *Layer*. Die Standardwerte liegen hier bei zehn Neuronen, welches nach Belieben abgeändert werden können. Je mehr Neuronen ein Layer besitzt, desto komplexere Funktionen können abgebildet werden. Allerdings existieren keine Regeln für die Anzahl nötiger Neuronen oder Hidden Layers eines neuronalen Netzes. Dieser Prozess ist ein iteratives Herangehen, indem versucht wird, mit einer kleinen Anzahl an Neuronen eine gute Problemmodellierung zu erzeugen. Es wird demnach mit einer kleinen Anzahl an Neuronen angefangen und iterativ die Performance des Netzes bei einer höheren Anzahl von Neuronen bewertet./4/

Es wird ein neuronales Netz mit einem Neuron im Hidden Layer erzeugt und mit Hilfe des konjugierten Gradientenverfahrens die jeweiligen *Gewichte* und *Schwellwerte* angepasst. Dabei wird die Performance des Netzes in der nachfolgenden Abbildung 8 als mittlerer Abweichungsfehler von den drei bereits erwähnten Datensätzen vorgestellt. Dieser Abweichungsfehler beschreibt den in Formel 2 beschriebenen Fehler.

In der dargestellten Abbildung wird gezeigt wie sich der Abweichungsfehler über die einzelnen Optimierungsepochen der *Gewichtungen* und *Schwellwerte* verändert. Der Abbruch folgt in der 43-igsten Epoche, dort wird ein Minimum des Validierungsdatensatzes gefunden. Alle weiteren Epochen führten nicht zu einer Verbesserung des Modells. Wenn der mittlere Abweichungsfehler des

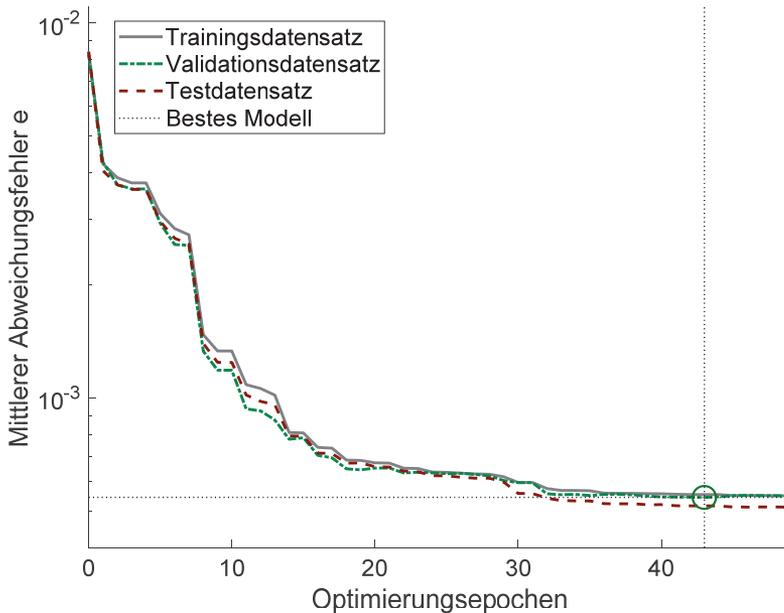


Abbildung 8: Mittlerer Abweichungsfehler ( $\bar{\varepsilon}_{43} = 5,44 \cdot 10^{-4}$ ) über die Optimierungsepochen

Validierungsdatensatzes anfängt zu steigen, ist dies ein Indiz dafür, dass ein *Overfitting* des Trainingsdatensatzes stattfindet. Daher wird der Berechnungsablauf, wie auch bereits erwähnt, bei einem Minimum des mittleren Abweichungsfehlers vom Validierungsdatensatz und Trainingsdatensatz abgebrochen.

Die lineare Regression des neuronalen Netzes zu den gemessenen Ergebnissen verdeutlicht die Verhaltensanalyse des modellierten Systems. Mit Hilfe dieser Bewertung, kann geschaut werden, ob das Modell das gewünschte Verhalten erzeugt. In Abbildung 9 wird die lineare Regression zwischen den fiktiven Messergebnissen und der Ausgabe des neuronalen Netzes dargestellt. Die jeweiligen Punkte (Datenpunkte) bilden immer ein Vektorpaar zwischen der Frequenz und der Kammerstellung ab. Zusätzlich bilden die Werte auf der Ordinate und Abszisse entsprechend die Druckerwartung bei dem modellierten Netz sowie dem Messergebnis in Abhängigkeit dieses Vektorpaars ab. Die eingezeichnete Gerade der Netzausgabe zeigt die Modellausgabe im Verhältnis zu den tatsächlichen Werten. Das bedeutet letztendlich, dass das erzeugte Modell in allen

vier Darstellungen der Regressionen, das tatsächliche Modell im unteren Druckbereich überschätzt und im höheren Druckbereich unterschätzt.

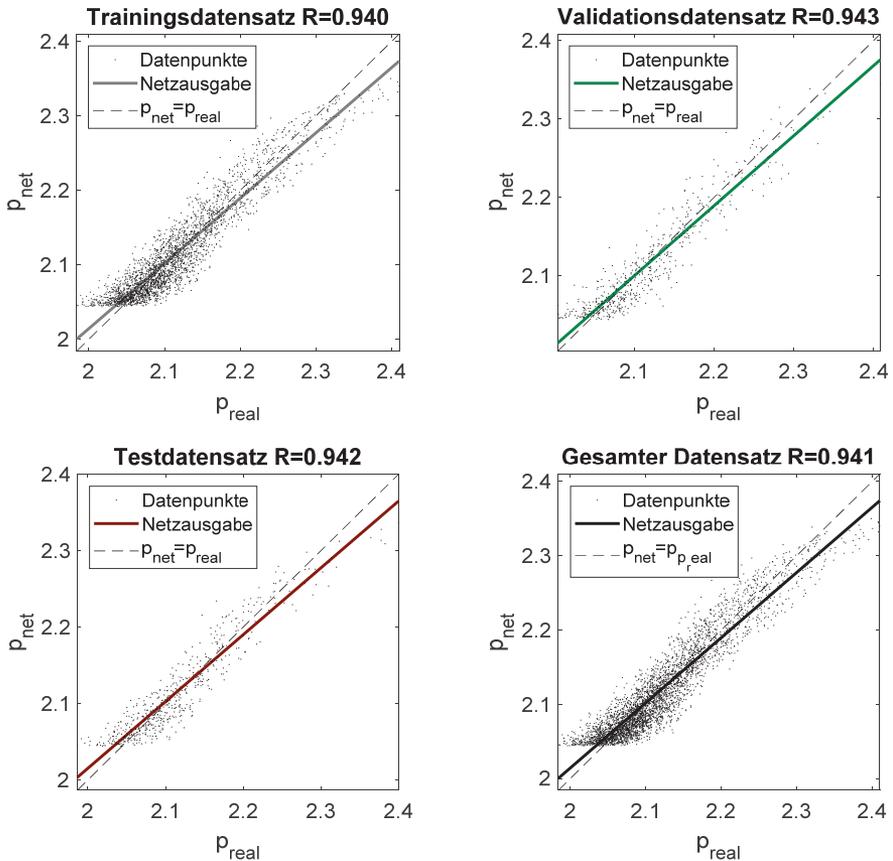


Abbildung 9: Lineare Regression zwischen der Modellausgabe und den fiktiven Messwerten

In diesem Beispiel wurde bereits mit einem Neuron im Layer eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem neuronalen Netz und den fiktiven Ergebnissen erzeugt. Das Endergebnis dieser Modellerzeugung ist nachfolgend in Abbildung 10 gezeigt.

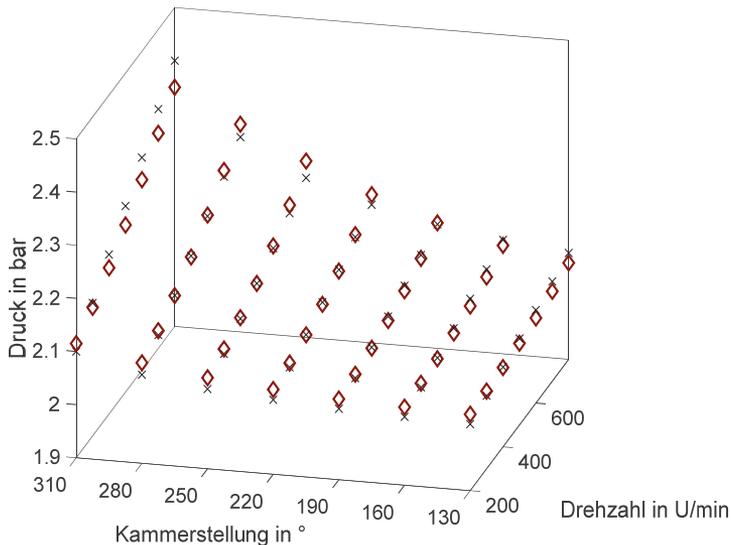


Abbildung 10: Ausgabe des neuronalen Netzes **rot**, fiktive Messdaten **schwarz**

Dieses Ergebnis soll nun mit verbessert werden, indem die Neuronenanzahl des *Hidden Layers* variiert wird. Bei dieser Methode wurde die Anzahl der Neuronen schrittweise erhöht und der mittlere Abweichungsfehler sowie die Regressionsanalyse betrachtet. Zudem wurde das Antrainieren einer Netzkonfiguration nicht nur einmal durchgeführt, sondern mehrere Male hintereinander. Der Grund für dieses Vorgehen ist in der Abbildung 5 gezeigt. Zusätzlich wird bei jedem anlernen des Netzes die drei zufälligen Datensätze neu zusammengestellt, so wird zum einen das multidimensionale Optimierungsproblem mit anderen Startwerten behandelt und der Informationsgehalt der jeweiligen Datensätze verschieden belegt. Das beste Ergebnis dieser Rechenvorgänge wurde dann tabellarisch pro Netzkonfiguration aufgeschrieben und so gesamtheitlich betrachtet. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt folgende Tabelle 1.

Anhand der Tabelle kann gesehen werden, dass noch eine erhebliche Verbesserung der Performance des neuronalen Netzes mit der Erhöhung von einem Neuron auf zwei Neuronen im *Hidden Layer* erreicht werden kann. Bei einer weiteren Erhöhung wird keine wesentliche Verbesserung mehr erreicht. Auch der Regressionskoeffizient wird bei einer Zunahme von mehr als zwei Neuronen nicht weiter verbessert. Bemerkenswert ist die Abnahme der Optimierungsschritte bei Zunahme der Neuronen. Dies ist wohl mit einer Zunahme der jeweiligen Freiheitsgrade zu begründen, welche lokale Extremwertstellen begünstigen. Das Ergebnis des Netzes mit zwei Neuronen ist in der nächsten Abbildung zu finden.

Tabelle 1: Verbesserungsrechnungen mit verschiedenen Anzahlen an Neuronen in dem *Hidden Layer*

Anzahl Neuronen	$\bar{\varepsilon}$ Abweichungsfehler $10^{-4}$	Regressionskoeffizient Gesamtdatensatz $R$	Epoche
1	<b>5,44</b>	<b>0,94</b>	<b>43</b>
2	3,87 (-29%)	0,96 (+2,1%)	12
3	3,55 (-35%)	0,96 (+2,1%)	30
4	3,59 (-34%)	0,96 (+2,1%)	17
10	3,79 (-30%)	0,96 (+2,1%)	8
20	3,78 (-31%)	0,96 (+2,1%)	9

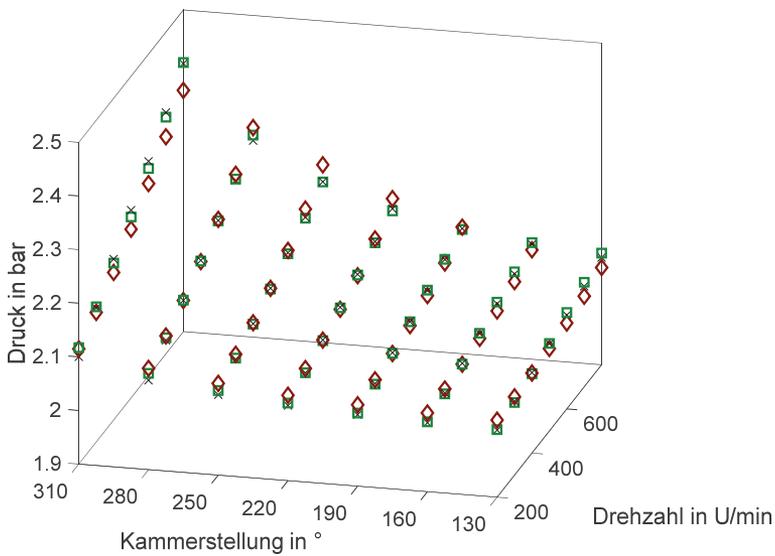


Abbildung 11: Gegenüberstellung der alten **rot** und verbesserten Modellierung **grün** und den fiktiven Messdaten **schwarz**

Geplant ist eine Übernahme einer solchen Funktion, um den Druckverlauf über den Umfang des Verdichters zu modellieren. So soll zum einen der Druck des modellierten Systems korrigiert und zum anderen ebenso das dynamische Verhalten des Verdichters genauer ermittelt werden. Die Anzahl der zu berücksichtigenden

Parameter belaufen sich im direkten Vergleich zu dem Beispiel auf fünf verschiedene Parameter.

### Fazit

Zur Nutzung dieser Vorgehensweise für das genannte Ziel, den Druckverlauf über den Umfang des Verdichters realitätsnäher zu beschreiben, kann ein solches Verfahren grundsätzlich angewendet werden. Es existieren bereits ähnliche und erfolgreiche Anwendungen im Bereich der Kraftfahrzeuge /5/. Der nächste Schritt ist die Weiterentwicklung des genannten Vorgehens. Dabei soll es ermöglicht werden über eine Baureihe, eine Extrapolation des Druckes in realitätsnaher Form zu schaffen. Hierbei sollen mit Hilfe von beispielsweise der Reynoldszahl, im Ansaugtrakt sowie Ausgabebereich und weiteren Messungen an modifizierten Produkten, eine Extrapolation über untersuchte Grenzen hinaus ermöglicht werden.

## Literatur

- /1/ Kaczmarek D., Lohrengel A. : *Automatisierte Baugruppenoptimierung hinsichtlich Produktanforderungen am Beispiel eines Drehschieberverdichters* – 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2019 Aachen
- /2/ Cowan, Jack D.: Discussion: McCulloch-Pitts and related neural nets from 1943 to 1989. In: *Bulletin of Mathematical Biology* Bd. 52 (1990), Nr. 1–2, S. 73–97
- /3/ Rosenblatt, F.: The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. In: *Psychological Review* Bd. 65 (1958), Nr. 6, S. 386–408
- /4/ *Beale, Mark Hudson, Martin T Hagan, und Howard B Demuth: „Neural Network Toolbox™ 7“, 2010*
- /5/ *Hafner, Michael ; Schüler, Matthias ; Isermann, Rolf: Einsatz schneller neuronaler Netze zur modellbasierten Optimierung von Verbrennungsmotoren. In: MTZ - Motortechnische Zeitschrift Bd. 61 (2000), Nr. 11, S. 798–805*

## Zerlegen statt zerkleinern, lohnt sich das?

Prumbohm, M.

*Im Folgenden Artikel geht es um einen qualitativen Vergleich der herkömmlichen sowie idealen Herangehensweise zur Verwertung von Altfahrzeugen. Hintergrund ist die zunehmende Anzahl an elektronischen Bauteilen in Fahrzeugen und die damit verbundene Zunahme an wirtschaftsstrategisch wichtigen Materialien in Fahrzeugen.*



*The following article deals with a qualitative comparison of the conventional and ideal approach to the recovery of end-of-life vehicles. The background is the increasing number of electronic components in vehicles and the associated increase in economically strategically important materials in vehicles.*

### Hintergrund: Woraus bestehen Altfahrzeuge und wie werden diese behandelt?

Altfahrzeuge gehören zu den Produkten, deren stoffliche Wiederverwertung seit langem durch Quoten gesetzlich geregelt sind, siehe /2/. Die Recyclingprozesse sind bewährt und effizient hinsichtlich der Rückgewinnung der im Fahrzeug verbauten Stoffe mit großen Massenanteilen. Komplexe Produkte wie Fahrzeuge bestehen jedoch aus einer großen Vielzahl an Materialien und Stoffen, die im Gesamtprodukt in stark unterschiedlichen Mengen vorhanden sind. Dazu unterscheiden sich die verbauten Materialien stark abhängig vom Fahrzeugtyp und der jeweiligen Ausführung.

Produkte und damit auch Fahrzeuge am Ende des ihres Lebenszyklus lassen sich auf verschiedene Arten behandeln, um die verbauten Stoffe weiter im Wirtschaftskreislauf zu nutzen. Herkömmlich wird eine stoffliche Verwertung durch ein Zerkleinern der Produkte / Fahrzeuge bzw. deren Reste eingeleitet. Eine Zerkleinerung lässt sich durch verschiedene Schneid-, Prall- und Brechverfahren, ggf. in mehreren Stufen vollständig erreichen. Die austretenden Massenströme lassen sich in Abhängigkeit der Korngrößen klassieren und hinsichtlich der Stoffe sortieren und trennen. Mit diesem Vorgehen lassen sich vor allem die Stoffe effizient gewinnen, die mit einer hohen Konzentration in den Stoffströmen enthalten sind. Je geringer der Anteil eines Stoffes am Gesamtstrom ist, desto aufwändiger und damit teurer ist es, diesen nach der Zerkleinerung für eine Verwertung im Sinne der Kreislaufwirtschaft zurückzugewinnen. Gefährliche Stoffe und Bauteile mit besonders hohem Anteil an teuren Ressourcen wie beispielsweise die Katalysatoren, werden in Kraftfahrzeugen vor der Zerkleinerung entfrachtet, also manuell

demontiert. Gesammelt zerkleinert ist der Gesamtanteil der Zielstoffe in für die entsprechenden Bauteile deutlich höher, als für die übrigen, beispielsweise elektronischen Bauteile. Somit lässt sich eine Aufkonzentration der aktuell schwierig im Kreislauf nutzbaren Rohstoffe, durch Maßnahmen im Vorfeld weiterer Aufbereitungsschritte, erreichen.

### **Was steckt hinter der Idee des Zerlegens?**

Im Zuge der steten Zunahme an elektronischen Bestandteilen in Fahrzeugen, nehmen der Gehalt und damit die Bedeutung der in den entsprechenden Bauteilen verwendeten Stoffe zu. Elemente wie Tantal in Kondensatoren und weitere seltene Erden in elektronischen Bauteilen lassen sich aus dem großen Massenstrom der Zerkleinerung jedoch nach wie vor nicht wirtschaftlich gewinnen. Eine manuelle Demontage, die sie bei den gefährlichen Stoffen zwingend vorgeschrieben und bei den leicht erreichbaren Teilen gewinnbringend durchgeführt wird, ist hinsichtlich Bauteilen wie Steuergeräten und weiteren Elektronikbauteilen in der Tiefe nicht wirtschaftlich darstellbar, siehe /3/. An dieser Stelle setzt der Gedanke der Zerlegung an. Damit gemeint ist entsprechend die Lücke zwischen manueller Demontage und vollständiger Zerkleinerung, siehe Tabelle 1. Ein Zerlegen von Fahrzeugen, das über die Entfrachtung und wirtschaftlich darstellbare Demontage weniger Teile aus dem Fahrzeug hinausgeht, wird bereits heute z.B. mit modifizierten Baumaschinen durchgeführt, siehe Abbildung 1.



*Abbildung 1: Entnahme einer Antriebswelle im Rahmen einer maschinengestützten, manuellen Zerlegung eines Altfahrzeuges /2/*

Die Anforderung an einen Prozess, der eine Verbesserung der Recyclingtiefe bietet, liegt also in dem Zeitaufwand pro Fahrzeug und dem Output an zu entnehmenden, rohstofflich interessanter Bauteile wie beispielsweise Steuergeräte. Zur Präzisierung der zu erfüllenden Anforderungen werden im weiteren Verlauf die Bewertungskriterien für Recyclingverfahren betrachtet und die drei Ausrichtungen „Demontage“, „Zerlegung“ und „Zerkleinerung“ qualitativ miteinander verglichen.

### Wie lassen sich Recyclingverfahren bewerten und vergleichen?

Aus rein rohstofflicher Sicht bzw. dem Gedanken einer Kreislaufwirtschaft in ausgeprägter Form folgend, ist eine manuelle Tiefendemontage aller stofflicher lohnenswerter Bauteile die Ideallösung. Diese benötigt jedoch sehr viel Zeit und ein hohes handwerkliches Geschick der ausführenden Personen, ist damit sehr teuer und durch die hohe Variantenvielfalt der Fahrzeuge am Markt nicht oder nur schwer automatisierbar. Eine partielle Demontage lohnt sich hingegen, wenn nur Bauteile entfernt werden, die einfach und schnell erreichbar sind und zugleich eine gewisse Menge an wirtschaftlich interessanten Stoffen enthalten. Ausschlaggebende Faktoren sind demnach die Zeit pro Vorgang und die gewonnene Menge an Stoffen in Tonnen-Angaben bzw. die damit erzielbaren Erlöse im Vergleich mit den aufzubringenden Kosten pro Zeiteinheit für den Prozess bzw. Anlagenbetrieb. Im Rahmen von Studien wie der OKRAM /3/ wurde die Demontage von Altfahrzeugen hinsichtlich dieser Kriterien überprüft. Im Ergebnis sind lediglich acht von 30 untersuchten, elektronischen Steuerbauteilen /3/ aus Fahrzeugen sicher wirtschaftlich manuell zu entfernen. Hinsichtlich der benötigten Zeit bieten die maschinengestützten Zerlegeverfahren einen Vorteil gegenüber der manuellen Demontage, bei der Separierung der wirtschaftlich sinnvollen Bauteile. Eine Tiefendemontage ist jedoch mit diesen Verfahren ebenfalls sehr zeitintensiv. Die Zerlegung komplexer Strukturen ist recht zügig möglich, benötigt jedoch sehr viel Geschick des Bedieners. So lassen sich binnen acht Minuten sich aus einem Kleinwagen wesentliche Steuergeräte aus dem Motorraum und verschiedene Teile des Kabelstranges entfernen. Die Nachteile beider Vorgehensweisen liegen in der manuellen Durchführung und damit einer Fehleranfälligkeit über die große Zahl an Fahrzeugen gesehen. Bei der maschinengestützten Demontage wird darüber hinaus restliche Fahrzeugstruktur stark beschädigt, die Entnahme weiterer Teile ist durch den Prozess selbst also beeinträchtigt.

*Tabelle 1: Vergleich der herkömmlichen Vorgehensweisen mit dem Konzept einer maschinellen Zerlegung*

<b>Verfahren</b>	<b>Erreichbare elektronischer Bauteile</b>	<b>Nachteile</b>
(Tiefen-) Demontage, manuell	vollständig	Zeit- und personalaufwändig = teuer, wirtschaftlich nur für acht Bauteile
Demontage, maschinengestützt	partiell, < 50 %	Personal aufwändig, wirtschaftlich nur für wenige Bauteile
<i>Maschinelle Zerlegung</i>	<i>partiell, Sollwert &gt; 50 %</i>	<i>SOLL: geringer Zeit- und Personalaufwand, &gt; 8 Teile separierbar nach Zerlegung</i>

Beachtet werden muss die Randbedingung, dass es bei diesem Vergleich um die Extraktion der in den elektronischen Bauteilen befindlichen Stoffe aus Fahrzeugen geht. Eine Zerkleinerung der übrigen Stoffe, wie beispielsweise der Karosserie mit Kunststoffteilen etc. erfolgt bei allen Prozessen als Folgeschritt nach der Entnahme/Separierung. Das Verfahren der Zerkleinerung wird entsprechend zum Vergleich mit dem Verlust der Stoffe im Massenstrom eines Gesamtfahrzeugs gesehen.

## Zusammenfassung

Im Vergleich der herkömmlichen Herangehensweise bei der Verwertung von Altfahrzeugen ergibt sich nach einer qualitativen Analyse der Bedarf für ein automatisches, maschinelles Zerlegeverfahren für Fahrzeuge, um die Entnahme von deutlich mehr elektronischen Steuergeräten als bisher wirtschaftlich möglich zu machen. Die Prüfung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit dieser ersten Konzeptidee bedarf weiterer Arbeit.

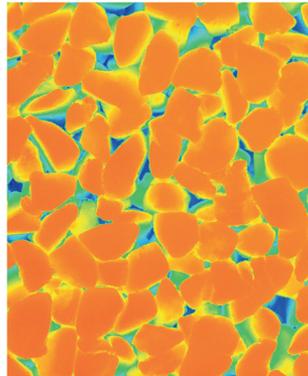
## Literatur

- /1/ Brummer, Christina: Nur die Spitze des Müllberges, Online-Artikel in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung, 19. April 2019, zuletzt abgerufen am 09. Dezember 2019, URL: [ww.faz.net/aktuell/wirtschaft/elektroschrott-das-leben-eines-elektrogeraets-wird-immer-kuerzer-16110902.html](http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/elektroschrott-das-leben-eines-elektrogeraets-wird-immer-kuerzer-16110902.html)
- /2/ Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen – AltfahrzeugV, Version vom 02. Dezember 2016, zuletzt abgerufen am 09. Dezember 2019, URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/altautov/AltfahrzeugV.pdf>
- /3/ <https://www.powerhand.com/products/attachments/scrap-grabs/vrs-200-vehicle-dismantler>
- /4/ Groke, M.; et al: Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM) Endbericht; TEXTE 02/2017, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3713 33 337, UBA-FB 002394
- /5/ Taylor & Braithwaite: VRS Car Dismantler, Videodokument, zuletzt abgerufen am 09. Dezember 2019, URL: [https://www.youtube.com/watch?v=-P7GaiQ\\_L7Y](https://www.youtube.com/watch?v=-P7GaiQ_L7Y)

## Schallabsorber-Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen

Rehmet, R.; Freundt, F.; Weilandt, T.

*Akustisch wirksame Schalldämpfungsmaterialien sind in der Regel aus Materialien hergestellt, deren Ursprung synthetisch ist. Oftmals ist die Synthesierung solcher Stoffe energieaufwändig oder es werden Materialien eingesetzt, die aufgrund der Ressourcenknappheit nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. In diesem Kontext setzt ein Forschungsprojekt an, in dem schalldämpfende Materialien hergestellt aus nachwachsenden Rohstoffen und als Schallabsorber qualifiziert werden.*



*Typically, sound absorbing materials are produced out of synthetic based materials. Often the production of these base materials is highly energy consumptive. In other cases scarce resources are needed to synthesize those base materials. In this context the project shall cover how effectively a new absorber material based on renewable resources can compete with existing absorber materials.*

### Motivation und Vorstellung des Projekts

Wenn ein Raum zum Nachhall voll Schall neigt, wird oft auf schalldämpfende Materialien zurückgegriffen. Weitläufig bekannt ist, dass Teppiche oder auch Gardinen den Nachhall im Raum mindern. Anders herum ist auch bekannt, dass ein Raum mit „nackten Wänden“ den Nachhall in einem Raum begünstigt. Dieses Phänomen ist zum Beispiel aus Kirchen bekannt, in diesen Räumen wird teils sogar Wert auf das Halten des Klanges gelegt.

Die Akustik in einem Raum ist gerade dann von gesteigertem Interesse, wenn der Raum als Arbeitsraum dient. In Großraumbüros wird durch den Einsatz von Sichtschutz mit teils akustisch wirksamer Füllung die Produktivität der Mitarbeiter nachweislich gesteigert. Üblicherweise wird diese Füllung auf petrochemischer Basis hergestellt. Hierzu wird zum Beispiel für gängige Absorber aus Melaminharzschaumstoff Erdgas zur Herstellung genutzt.

In einem laufenden Forschungsprojekt wird gemeinschaftlich mit der Arbeitsgruppe Chemie & Verfahrenstechnik von Verbundwerkstoffen der Georg-August-Universität Göttingen und einem Industriepartner ein stärkebasierter Akustikabsorber sowie ein Modell zur Vorhersage der akustischen Wirksamkeit entwickelt. Der Vorteil an der

Nutzung von Stärke als Porösabsorber liegt in der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, statt zur Produktion von Lärmschutzprodukten auf fossile Energieträger zurückgreifen zu müssen.

Die Methodik im Forschungsprojekt sieht vor, ein umfangreiches Modell zur Vorhersage der akustischen Wirksamkeit zu erstellen. In Abhängigkeit der Fertigungsparameter soll das Verhalten des einzelnen Absorbers vorhergesagt werden. Weiterhin soll das messdatenbasierte Tool in der Lage sein, je nach Aufstellung und Raumgröße eine Abschätzung abzugeben, in wie weit eine Dämpfungswirkung in einem Raum unter Nutzung der Absorber erzeugt werden kann. Dieser „Absorberkonfigurator“ macht es für den Industriepartner möglich, dem Kunden seine Produkte nicht nur in einer optimalen Aufstellung von Absorbern im Raum anzubieten, sondern auch eine Low-Budget-Kombination von Absorbern und Materialtypen, in der geringere Ansprüche an die akustische Wirksamkeit gestellt werden.

Der Einfluss von Fertigungsparametern wie der Schüttdichte des expandierten Granulats, den Verpressungsgrad oder auch die Größe der einzelnen Körner auf das akustisch-dämpfende Verhalten wird durch intensive Kooperation mit der Uni Göttingen ermittelt, die für die Entwicklung des Materials im Projekt verantwortlich ist. Der Zusammenhang zwischen den messbaren Größen und dem Absorptionsverhalten soll nach einer unten beschriebenen Methode gemessen und schließlich in Oktavbändern analysiert werden.

### Messverfahren und Bewertung

Die Qualifizierung der Schalldämpfungswirkung erfolgt im ersten Schritt durch eine Messung der Materialien im Impedanzrohr. Das Messverfahren ist in der Norm DIN EN ISO 10534-1 beschrieben. Durch das Verfahren kann im Rohr bei bekannter Laufzeit des Luftschalls ein Rückschluss auf die Reflektion gezogen werden. Der Messaufbau besteht aus einer Stahlröhre, zwei Mikrofonen, einer Schallquelle und einer Probe auf der gegenüberliegenden Seite. Der Lautsprecher erzeugt ein Rauschsignal, das mit konstanter Amplitude über den Frequenzbereich von 10 Hz bis 20 kHz von einem Signalgenerator erzeugt wird. Der systematische Prüfaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

Der auf das Material einfallende Schalldruck kann mathematisch beschrieben werden durch den Ausdruck in Formel 1:

$$p_{ein} = \hat{p}_{ein} \cdot e^{j \cdot k_o \cdot x} \quad 1$$

- mit:
- $\hat{p}_{ein}$  – Druckamplitude der einfallenden Schallwelle
  - $k_o$  – Wellenzahl in Abhängigkeit der Geometrie und der Schallgeschwindigkeit
  - $x$  – Gemessener Schalldruck an der Stelle  $x$  (vgl. Abb. 1)
  - $j$  – Imaginäre Zahl

Für den ausfallenden Schalldruck gilt analog der in Formel 2 genannte Zusammenhang:

$$p_{aus} = \hat{p}_{aus} \cdot e^{-j \cdot k_0 \cdot x} \tag{2}$$

mit:  $\hat{p}_{aus}$  – Druckamplitude der ausfallenden Schallwelle

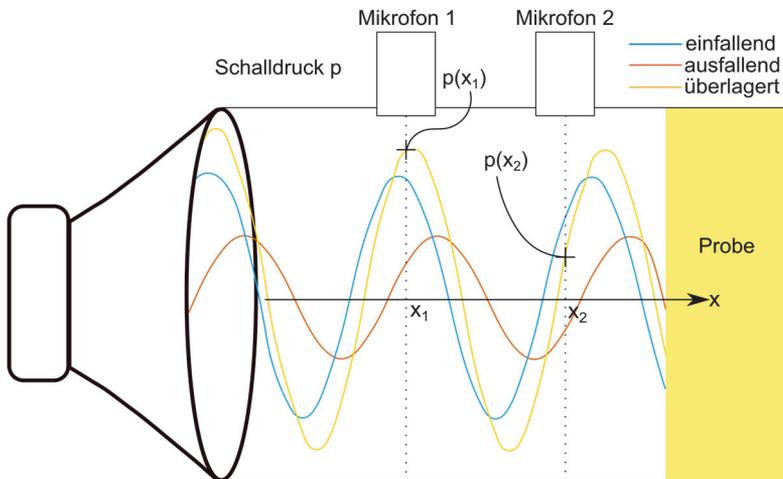


Abbildung 1: gemessene Schalldrücke im Impedanzrohr

An den Mikrofonorten kann aus ersichtlichen Gründen die Überlagerung des ein- und ausfallenden Schalldrucks gemessen werden, die sich für die Mikrofonorte 1 und 2 wie in den folgenden Formeln 3 und 4 darstellen lassen:

$$p_1 = \hat{p}_{ein} \cdot e^{j \cdot k_0 \cdot x_1} + \hat{p}_{aus} \cdot e^{-j \cdot k_0 \cdot x_1} \tag{3}$$

$$p_2 = \hat{p}_{ein} \cdot e^{j \cdot k_0 \cdot x_2} + \hat{p}_{aus} \cdot e^{-j \cdot k_0 \cdot x_2} \tag{4}$$

mit:  $x_1$  – Abstand von der Probe zum ersten Mikrofon  
 $x_2$  – Abstand von der Probe zum zweiten Mikrofon

Mithilfe der komplexwertigen Übertragungsfunktion kann schließlich ein mathematischer Ausdruck für die Schallreflexion bestimmt werden. Dieser ist, unter Definition weiterer, komplexwertigen Größen ein Ausdruck in Abhängigkeit von drei Übertragungsfunktionen, vgl. Formel 5.

$$r = f ( H_{12}, H_I, H_R ) \tag{5}$$

- mit:  $H_{12}$  – Übertragungsfunktion der Schalldrücke  $p_1$  und  $p_2$  am ersten Mikrofon  
 $H_I$  – Übertragungsfunktion der einfallenden Schallwelle  
 $H_R$  – Übertragungsfunktion der reflektierten Schallwelle

Die auf ein Material eintretende Schwingung kann an der Grenzfläche auf drei Wege gewandelt werden: Zum einen durch Reflexion, die eine Schallabstrahlung vom Material zurück in Richtung der Schallquelle darstellt. Zum anderen kann Schwingenergie vom Material dissipiert werden. Im akustischen Bereich wird von Absorption gesprochen. Die dritte mögliche Wandelung stellt die Transmission dar, also die Weiterleitung der Schwingung an die von der Schallquelle abgewandte Seite des Körpers. Dieser Fall kann nur Auftreten, wenn keine nennenswerte Dissipation der Schwingenergie im Körper stattfindet. Die Energiebilanz an der Übergangsfläche lässt sich wie folgt darstellen, vgl. Formel 6-8:

$$P_{ein} = P_{ref} + P_{abs} + P_{trans} \quad 6$$

$$P_{ein} = P_{ein} * (r + \alpha + \tau) \quad 7$$

$$1 = r + \alpha + \tau \quad 8$$

- mit:  $P_{ein}$  – auf die Fläche einfallende Schalleistung  
 $P_{ref}$  – von der Fläche reflektierte Schalleistung  
 $P_{abs}$  – vom Absorbermaterial absorbierte Schalleistung  
 $P_{trans}$  – vom Absorbermaterial transmittierte Schalleistung  
 $r$  – Reflexionsfaktor  
 $\alpha$  – Absorptionsfaktor  
 $\tau$  – Transmissionsfaktor

Da das Material aufgrund seiner Matrix keine ausgeprägte Materialsteifigkeit besitzt, wird der Anteil der Transmission vorerst als vernachlässigbar gegenüber den anderen Anteilen angenommen. In einem späteren Experiment soll der Anteil der Transmisson quantifiziert werden.

Mithilfe von Formel 8 lässt sich aus den erhobenen Messdaten der dimensionslose Schallabsorptionsfaktor  $\alpha$  für den senkrechten Schalleinfall bestimmen. Für  $\alpha = 1$  liegt vollständige Absorption vor, bei  $\alpha = 0$  entsprechend vollständige Reflexion. Der Faktor  $\alpha$  kann mit einer Korrekturfunktion in den Absorptionsfaktor  $\alpha_{st}$  für diffusen Schalleinfall bestimmen. Eine alternative Herangehensweise zur Bestimmung des Absorptionsfaktors  $\alpha_{st}$  ist die direkte Messung in einem Hallraum. In einer späteren Projektphase soll eine solche Messung im Hallraum entsprechend der Norm DIN EN ISO 354 durchgeführt werden.

### Bewertung der Absorption im Hinblick auf die Nutzung als Raumschallabsorber

Um Möbel mit akustischer Wirksamkeit klassifizieren zu können, ist eine objektive Bewertung notwendig. Hierzu existiert die Norm EN ISO 354, anhand derer der Absorptionsfaktor  $\alpha$  bewertet wird. Die Klassifizierung erfolgt anhand von Buchstaben, wobei ein „Klasse A“ – Absorberprodukt einen breitbandig hohen Absorptionswert zwischen 180 Hz und 6000 Hz aufweist, ein Absorberprodukt der „Klasse E“ hat entsprechend geringere Absorptionswerte ( $\alpha$  zwischen 0,15 und

0,25). Hierzu liegen Bewertungsfunktionen zu Grunde, der Verlauf der gemessenen Schallabsorptionen muss, in den einzelnen Oktavbändern gemittelt oberhalb der Bewertungskurve liegen.

### Erste Ergebnisse in Abhängigkeit der Porosität und Dicke

Die ersten, an der TU Clausthal im Impedanzrohr gemessenen Absorberprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen, die von der Uni Göttingen hergestellt wurden, verhalten sich erwartungsgemäß entsprechend folgender Prinzipien:

- Materialdämpfung durch Masse: steigt das Flächengewicht eines Absorbers, verschiebt sich das Schalldämmmaß in Richtung tieferen Frequenzen. Zur Dämpfung von tieferen Frequenzen wird somit Masse benötigt. Die erhöhte Masse sorgt gleichzeitig dafür, dass höhere Frequenzen schlechter absorbiert werden. /1/
- Luftdämpfung durch Reflexion in Hohlräumen: Poröse Strukturen weisen akustische Wirksamkeit auf. Einzelne Untersuchungen zeigen, dass diese Strukturen oberhalb von ca. 500 Hz Wirksamkeit zeigen. /2/

Die Parameter Masse und Porosität wurden in der ersten Versuchsreihe identifiziert und entsprechend der in der Norm genannten Absorberklassen klassifiziert.

In der gegenwärtigen Projektphase werden zunächst Fertigungsparameter auf Ihren Einfluss auf das Absorptionsverhalten untersucht. In einer späteren Projektphase kann bei nicht Erreichen einer zufriedenstellenden Absorberklasse auf weitergehende Schallabsorberkonzepte zurückgegriffen werden.

### Quantifizierung der Porosität

Zur Bewertung der Porosität der Oberfläche wird im Verlauf des Projektes die Oberflächen-Porosität des Werkstoffes bewertet. Hierzu wird mit einem Laserscanning-Mikroskop eine dreidimensionale Punktwolke der Oberfläche angelegt. Durch Festlegung einer Fläche aus Höchstpunkten der Struktur kann dann durch eine virtuelle Fläche der Anteil von Hohlräumen unter einem bestimmten Höhengrenzwert berechnet werden.

In Abbildung 2 ist beispielhaft eine Probe mit verhältnismäßig geringer Rohdichte dargestellt, die erwartungsgemäß eine bereits mit dem bloßen Auge erkennbare Porosität aufweist. Die auf diese Art gemessene Oberflächen-Porosität schwankt zwischen den bisher vermessenen Proben zwischen 0 und 40 Flächenprozent Hohlräumen (blau markierte Fläche). In Grau ist die Oberfläche des Materials im Laserscan dargestellt.

Wie bereits im vorigen Kapitel beschrieben kommt der Porosität des Materials eine entscheidende Rolle zu. Durch dieses Verfahren kann sie zunächst in einem binären Kriterium bewertet werden. Weitergehend erlauben die Daten des Laserscanning-

Mikroskops auch eine Bewertung der tatsächlichen Geometrie der Hohlräume, die auch einen Einfluss auf die akustische Wirksamkeit haben.

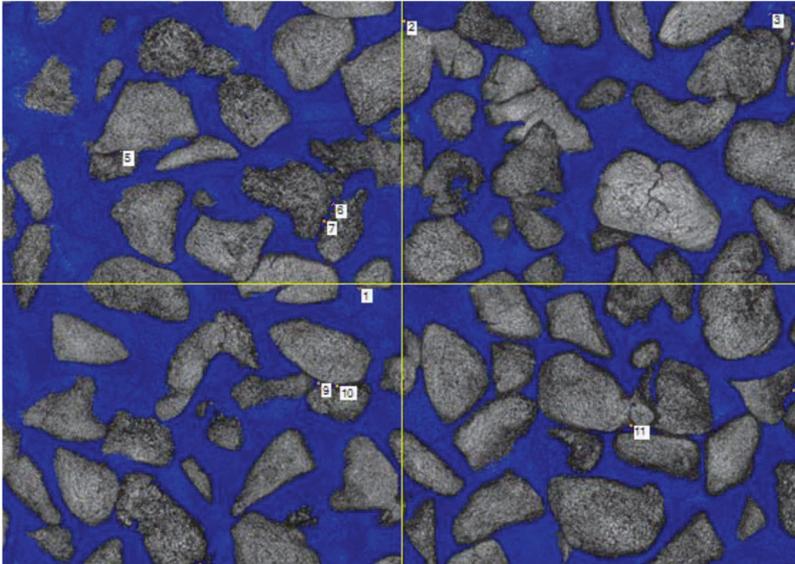


Abbildung 2: Porositätsanalyse des Materials erstellt mittels Laserscanning-Mikroskopie

### Zusammenfassung

Die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen auf Basis von stärkehaltigen Granulats als Schallabsorber hat sich in Vorstudien, sowie auch ersten Versuchen als grundsätzlich machbar herausgestellt. Dabei können durch die Variation der Fertigungsparameter die schalldämpfenden Eigenschaften der Absorberprodukte maßgeblich verändert werden. Da konventionelle Absorberprodukte häufig unter anderem aus fossilen Energieträgern hergestellt werden, kann durch die Nutzung von stärkebasierten Absorbieren eine ökologische Alternative genutzt werden. Erste Messergebnisse, die in einem Impedanzrohr erhoben wurden, zeigen eine gute Eignung des Materials zur Nutzung als akustisch wirksames Absorbermaterial.

### Literatur

- /1/ Moor, H., Zürcher, C.: physikalische Grundlagen: Leitfaden für Planung und Praxis, vdf Hochschulverlag 1993
- /2/ Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik, Vieweg+Teubner 2012



Hochschule und Kontakte

**D**



## Praktikum Biomechanik

Martinewski, V.

*Im Rahmen der neu eingeführten Studienfachrichtung Biomechanik im Fachbereich Maschinenbau wurde im zurückliegenden Jahr ein Praktikum konzipiert und durchgeführt, welches die Themen, die in dieser Studienfachrichtung im Rahmen der Vorlesungen theoretisch betrachtet werden, in einem praktischen Versuch zusammenfasst.*

*Hierzu wurde ein eigenes, elektrisch verstellbares Fahrradergometer entwickelt, mit dem es möglich ist, für verschiedene Sitzpositionen die physiologisch aufgebrachte Leistung des Probanden mit der mechanisch abgegebene Leistung zu vergleichen und unter Berücksichtigung weiterer gemessener Werte eine Aussage bzgl. Der ergonomischen bzw. leistungsoptimalen Sitzposition zu treffen. Neben den physiologischen und mechanischen Leistungsdaten werden Kräfte im Sattel und Lenker, sowie die Herzfrequenz aufgenommen. Als Prüfungsleistung werden die Studierenden Messschriebe verschiedener Positionen in Hinblick auf die biomechanische Übertragungsfähigkeit, sowie die physiologisch und mechanisch abgegebene Leistung aus.*



*During the past year, the practical course biomechanics was developed. This course, which complements the theoretical courses of the newly introduced biomechanics major is choosable by the mechanical engineers or the sports engineers. For this purpose, a specially built, electrically adjustable bicycle ergometer was developed. Measuring the physiological and mechanical output power, the performance of the test person for different seating positions can be evaluated and thus a statement regarding the ergonomics can be made. In addition to the physiological and mechanical power data, the forces in the saddle and handlebar as well as the heartrate of the test person are also recorded. All this data is provided to the participating students for analysis which represents the task to be evaluated. The course will be carried out each summer semester.*

## Einleitung

Im Wintersemester 2018/2019 wurde an der TU Clausthal im Fachbereich Maschinenbau die neue Studienfachrichtung Biomechanik eingeführt. Neben den etablierten Fachrichtungen „allgemeiner Maschinenbau“ Und „Mechatronik“ soll diese Fachrichtung den Studierenden die Möglichkeit bieten, in einem immer wichtiger werdenden Bereich eine Spezialisierung zu erfahren, die für ihre individuelle Berufswahl förderlich sein kann. Der Kontakt mit Industriepartnern hat gezeigt, dass es einen Bedarf an Ingenieuren mit grundlegend maschinenbaulicher Ausbildung und der Affinität zur Funktion des menschlichen Körpers gibt, die sowohl im Bereich der Prothetik, sowie in klassischeren Bereichen für die Entwicklung ergonomischer Mensch-Maschine-Schnittstellen eingesetzt werden können.

In den Vorlesungen *Biomechanik, Anatomie und Physiologie*, sowie *Bewegungswissenschaftliche Grundlagen* werden theoretische Grundlagen vermittelt. Bisher nicht angeboten war die Möglichkeit das erlangte, theoretische Wissen anhand eines praktischen Beispiels zu vertiefen und zu festigen. Diese Angebotslücke war der Anstoß für die Idee das Biomechanik-Praktikum ins Leben zu rufen.

## Das Praktikum

Die Zusammenhänge der theoretischen Grundlagen sollen anhand eines, mit Messtechnik ausgestatteten Prüfaufbaus verdeutlicht werden. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, ein Fahrradergometer zu konstruieren, mit dem es möglich ist, die während der Bewegung aufgebrauchte physiologische Leistung mit der mechanisch abgegebenen Leistung zu vergleichen und gleichzeitig die Bewegung auf dem Ergometer analysieren zu können. Am Beispiel des ergonomischen Fahrradfahrens werden verschiedene, mögliche Sitzpositionen in Hinblick auf oben genannte Effekte untersucht und bewertet.

Während des Fahrradfahrens oder der Nutzung eines Fahrradergometers können folgende Situationen eintreten, die jede für sich Besonderheiten in Bezug auf die übertragbare mechanische Leistung, den Bewegungsablauf sowie die erforderliche physiologische Leistung mit sich bringt und im Rahmen des Praktikums untersucht werden soll:

- Bewusst falsche bzw. unergonomische Sitzposition
- Wohlfühlposition
- Errechnete, optimale Sitzposition
- Einfluss der Trittfrequenz bei konstanter Leistung.
- Verwenden von Schlaufen- bzw. Klickpedalen

Eine falsche, unergonomische Sitzposition entsteht, wenn zum Beispiel ein Fahrrad ausgeliehen wird oder im Fitnessstudio die Einstellungen des Vornutzers nicht verändert werden. Hier kann bei zu kurzen Abständen des Lenkers und Sattels zur Tretkurbel eine suboptimale Kraftübertragung der Beine auf die Tretkurbel resultieren. Gleichzeitig entstehen überproportionale Belastungen auf die Kniegelenke und die Rückenmuskulatur durch eine zusammengekauerte Haltung. Sind die Abstände zu groß gewählt, ist die Kraftübertragung ebenfalls suboptimal und es kommt während der Bewegung zum Wanken und Rutschen auf dem Sattel.

Als Wohlfühlposition wird die Sitzposition definiert, die sich der Nutzer selbst einstellt und mit der er zufrieden ist und das Gefühl hat gut zu sitzen. Kurze Strecken äußern sich dem Nutzer nicht in merklichen Fehlbelastungen.

Bei weiteren Strecken sind aber auch hier die Feinheiten zu erkennen. Eine vorzeitige Muskelermüdung oder Schmerzen beteiligter Körpergelenke können die Folge sein. Auf Basis dreier, grundlegender Randbedingungen kann mit einem, im Rahmen einer Masterarbeit /1/ entstandenen Berechnungsprogramm, durch Eingabe geometrischer Körperdaten eine theoretisch optimale Sitzposition definiert werden, welche im Rahmen des Praktikums ebenfalls auf Richtigkeit durch Analyse der Messdaten überprüft werden soll.

Neben der reinen Sitzposition kann die Art des Bewegungsablaufs ebenfalls einen enormen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers haben. Mit der Trittfrequenz als Beispiel soll überprüft werden, ob bei gleicher abgegebener Leistung ein Einfluss auf den physiologischen Leistungsbedarf zu erkennen ist. Speziell in diesem Bereich ist die Erfassung der Reaktionskräfte am Sattel und Lenker interessant, um zu analysieren, ob erhöhte Kräfteinleitungen im Lenker beim langsamen Treten und gleichzeitig hohen Drehmomenten zu verzeichnen sind, oder ob bei hohen Trittfrequenzen erhöhte Ausschläge im Sattelpbereich entstehen.

Im letzten Schritt werden verstärkt die biomechanischen Kenntnisse abgefragt. Normale Pedale haben den Nachteil, dass die Leistung nur durch das Treten nach vorn bzw. nach unten erzeugt werden kann. Hierzu wird nur ein Teil der verfügbaren Beinmuskulatur. Mit der Verwendung von Schlaufen- bzw. Klickpedalen können Agonisten und Antagonisten durch Treten und Ziehen des Pedals genutzt werden, wodurch die mechanisch übertragbare Leistung steigt, gleichzeitig aber auch die physiologische Leistung durch einen erhöhten Versorgungsbedarf der Muskulatur. In diesem letzten Schritt ist es interessant, zu analysieren, ob der Mehrgewinn der mechanischen Leistungsübertragung den Bedarf an physiologischer Leistung übersteigt und damit ein besserer Wirkungsgrad resultiert.

Die Messergebnisse der einzelnen Punkte wurden im Vorfeld des Praktikums aufgezeichnet und den Studierenden zur Auswertung zur Verfügung gestellt.

Das Praktikum findet in Kooperation mit dem Sportinstitut der TU Clausthal statt.

## Mechanischer Aufbau

Um eine möglichst breite Anpassbarkeit an die Probanden des Versuchsaufbaus und die Einstellmöglichkeiten für die durchzuführenden Untersuchungen zu gewährleisten, wurde ein eigenes Fahrrad-Ergometer entwickelt und aufgebaut (vgl. Abbildung 1).

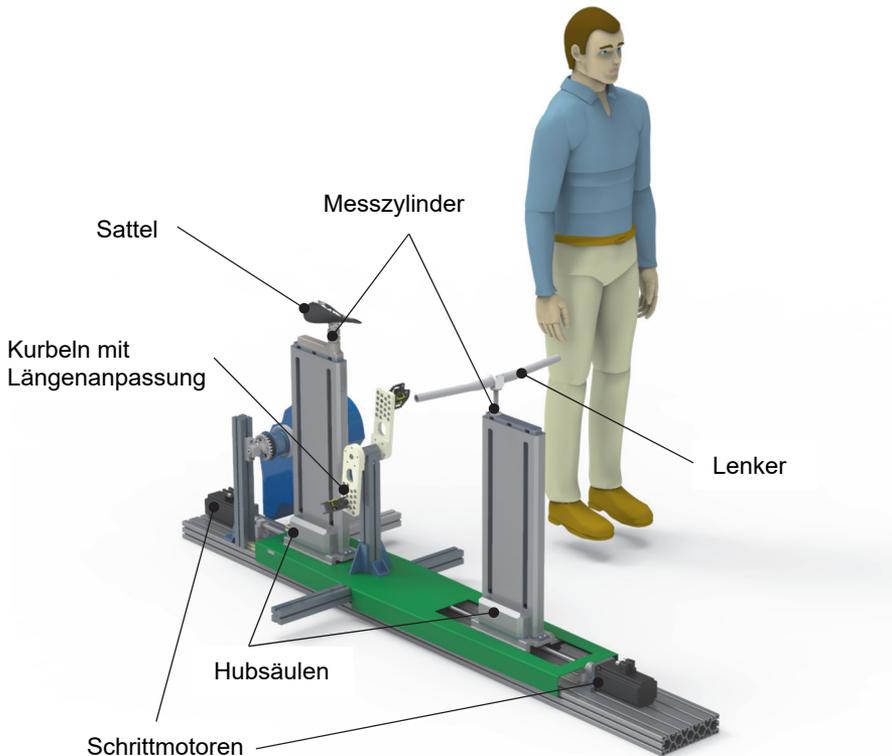


Abbildung 1: Prüfstands Aufbau Biomechanik-Fahrrad-Ergometer

Die Kurbel ist als zentraler Punkt mittig am Versuchsaufbau positioniert. Über einen Riementrieb erfolgt die mechanische Verbindung der Tretkurbel zum Abtrieb. Als Abtrieb wurde sich für einen gängigen Fahrradtrainer entschieden, welcher die Möglichkeit bietet, den Leistungswiderstand zu definieren und damit verschiedene Fahrsituationen zu ermöglichen.

Von der mittigen Position der Tretkurbel aus werden in X-Y-Koordinaten die Positionen von Lenker und Sattel vorgegeben. Sattel und Lenker sind für die vertikale Verstellung jeweils auf einer Hubsäule montiert. Zwischen Sattel/Lenker und Hubsäule befindet sich eine selbstgefertigte Mehrkomponenten-Messein-

richtung zur Erfassung und Visualisierung der Reaktionskräfte der Bewegung während eines Tretumlafs. Für die horizontale Definition der Position werden zwei Schrittmotoren in Kombination mit einer Kugelumlauf-Linearführung verwendet. Alle Komponenten sind elektrisch verfahrbar, sodass eine Steuerung über den Messcomputer möglich ist.

Das grundlegende Konzept wurde im Rahmen einer Masterarbeit im Fachbereich Maschinenbau erstellt /2/. Die Dimensionierung, Feinkonstruktion, Beschaffung und Montage, inklusive elektrischer Einrichtung und Applikation der Messtechnik erfolgte in einem nachträglichen Schritt durch das IMW.

Die Auswahl der Systeme erfolgte auf der Basis, dass alle Komponenten in einem noch zu entwickelnden Steuerprogramm zusammengefasst werden können und damit die Bedienung vereinfacht wird. Auch ist hier die Realisierung von automatisiert ablaufenden Prüfprogrammen möglich.

Die weitere Bearbeitung erfolgt im engen Kontakt mit den Studierenden der Schwerpunkt-Studienfachrichtung Biomechanik durch Ausschreibung von Studien- und Abschlussarbeiten, sowie Möglichkeiten der Betätigung als wissenschaftliche Hilfskraft.

### Messtechnische Ausstattung

Die messtechnische Ausstattung des Biomechanik-Praktikums besteht aus:

- Bluetooth Elektro-Kardiogramm (EKG) zur Herzfrequenzmessung
- Ergospirometrie-Einheit für die Atemgasanalyse
- Mehrkomponenten-Messsystem mit Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Kraftmessung an Sattel und Lenker

### Ergospirometrie und EKG

Ziel des Praktikums ist der Vergleich der physiologischen Leistung zur mechanischen Leistung unter verschiedensten Belastungssituationen. Die Bestimmung der mechanischen Leistung erfolgt über Drehzahl- und Drehmomentmessung in der Antriebseinheit und ist damit bereits über die Kauflösung abgedeckt.

Zur Bestimmung der vom Probanden aufgebrachten physiologischen Leistung wurde ein Bluetooth-EKG, sowie eine Ergospirometrie-Einheit beschafft. Mit diesen Systemen ist es möglich, lastspezifische Kenndaten zu generieren, die auf den physiologischen Belastungszustand schließen lassen. Mit dem EKG werden die Herzfrequenz bzw. Herzfrequenz-Anstiegskurven ausgelesen und in den Vergleich mit einbezogen. Die Atemgasanalyse Ergospirometrie-Einheit misst aufgenommene und abgegebene Sauerstoff- und Kohlendioxidmengen und gibt die Menge verbrauchten Sauerstoffs als Kenngröße aus. Weiterhin ist es hiermit möglich anhand einer Eingangsmessung für einen Belastungszustand zu überprüfen, wie

viel Lungenvolumen bzw. Atemfrequenz noch zur Verfügung steht, um damit einen prozentualen Beanspruchungszustand zu definieren. Anhand von Anstiegskurven und den Zeitpunkten des Beginns einer Sättigung lassen sich verschiedene Belastungszustände auf die Höhe der Beanspruchung des Körpers vergleichen.

### Dehnungsmessstreifen (DMS)

Zur Aufnahme der Kräfte die am Sattel bzw. Lenker in Folge der Bewegung während des Pedalierens auftreten werden DMS verwendet. Diese sind auf einem rohrförmigen Mess-Hohlzylinder zwischen Sattel/Lenker und den Hubsäulen angebracht und lassen über entsprechende Verschaltung das Messen von Kräften in allen sechs Freiheitsgraden zu (vgl. Abbildung 2).

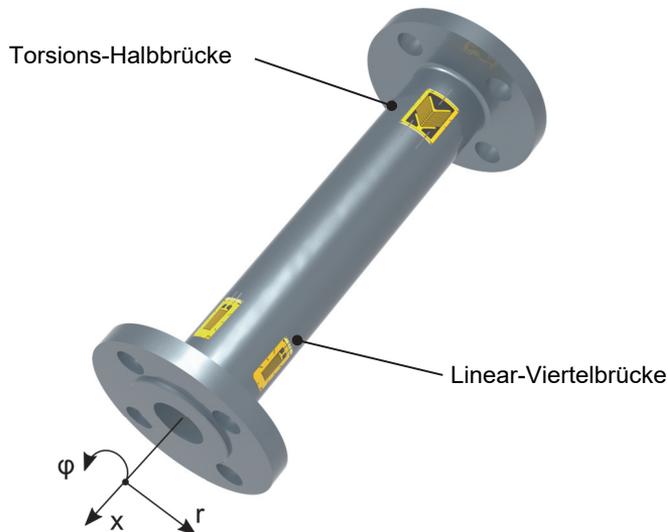


Abbildung 2: Applikationsschema der DMS für Mehrkomponenten-Messzylinder

Pro Messzylinder werden insgesamt sechs DMS appliziert: 4 Linear-Viertelbrücken um jeweils  $90^\circ$  versetzt angebracht und 2 Torsions-Halbbrücken um  $180^\circ$  versetzt.

Die Torsionshalbbrücken werden zu einer Vollbrücke zusammengeschaltet und messen die am Lenker und Sattel angebrachten Torsionsmomente in der  $x$ -Achse. Die Kenntnis dieser Messgröße lässt in dem Fall eines zu hoch eingestellten Sattels z.B. auf eine zu starke Hüftrotation schließen. Über Hebelbeziehungen können weiterhin die Absolutwerte der am Lenker einwirkenden Kräfte zurückgerechnet werden. Diese sind ein Indiz dafür, dass das abverlangte Drehmoment ggf. zu hoch ist und sich der Proband am Lenker ziehend abstützt.

Die vier Linear-Viertelbrücken werden einzeln am Messverstärker angeschlossen und im Messprogramm verrechnet, sodass zwei Biege-Halbbrücken und eine quasi-Zug-Druck-Vollbrücke resultieren.

Würden die vier Linear-DMS bereits elektrisch zu einer Vollbrücke verschaltet werden, würde die Funktion der Wheatstone-Brückenschaltung (vgl. Formel 1) dazu führen, dass sich die zu erwartenden, identischen Dehnungsanteile eliminieren, die Messbrücke wäre demnach Axialkraftkompensiert.

$$\frac{U_{\text{Mess}}}{U_{\text{Speise}}} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad 1$$

Eine reine Addition der Dehnungswerte im nachgeschalteten Verrechnungsschritt führt jedoch dazu, dass die Axialkraft - kompensiert um die Biegeanteile - um den Faktor vier verstärkt gemessen werden kann.

Zur Realisierung der Biege-Halbbrücken werden je zwei gegenüberliegende DMS so verrechnet, dass die während des Bewegungsablaufs resultierenden Biegemomente in beiden Raumrichtungen gemessen werden können. Werden auch hier entsprechende Hebelwirkungen berücksichtigt und die Ergebnisse der Torsionsmessung mit einbezogen, kann ein Raumvektor errechnet werden, der zu jedem Zeitpunkt die resultierende Belastung auf den Lenker bzw. den Sattel ausgibt.

Dieses so entstandene Mehrkörper-Messsystem wird hinzugezogen um Unterschiede der Bewegung auf Sattel und Lenker bei verschiedenen Lasten oder Ermüdungszuständen zu ermitteln. Hiermit sollen unter anderem Fragestellungen wie „Wann ist die Sattellast am größten“ oder „Ab welchem Abstand des Sattels zur Kurbel fängt der Proband das Wanken an“ beantwortet werden.

## Zusammenfassung

Am Institut für Maschinenwesen wird ein, seit dem Sommersemester 2019 jährlich stattfindendes Praktikum angeboten. Dieses bietet eine Ergänzung zu der derzeit theoriebasierten Studienfachrichtung Biomechanik des Fachbereichs Maschinenbau, sowie den neu eingeführten Studiengang Sportingenieurwesen.

Mit Hilfe eines eigens konstruierten, elektrisch adaptiven Fahrradergometers ist die Definition verschiedener ergonomischer und nicht ergonomischer Sitzpositionen möglich. Unter Nutzung der umfangreichen messtechnischen Ausstattung können die Studierenden ihr theoretisch erlangtes Wissen anhand des praktischen Versuchs zum Bewegungsablauf beim Fahrradfahren festigen und weiter ausbauen.

## Literatur

- /1/ Traufetter, T.: Bewegungsanalyse und Parameterstudie zur Fahrradergonomie mittels CAD; Masterarbeit, Clausthal-Zellerfeld, 2019
  
- /2/ Kuckella, S.: Konstruktion eines individuell einstellbaren Ergometers; Masterarbeit, Clausthal-Zellerfeld, 2019

## Maschinentechnische Exkursion

Martinewski, V.; Rehmet, R.; Wallat, P.

*Vom 02.09. bis zum 06.09.2019 wurde vom Institut für Maschinenwesen eine Maschinentechnische Exkursion durchgeführt. Ziel der Reise war der Süden Deutschlands. Insgesamt haben 14 Studierende dieses Angebot wahrgenommen, um einen breiten Einblick in das zukünftige Tätigkeitsfeld eines Maschinenbauingenieurs zu bekommen.*



*This year, from the 2th to the 6th of september, an excursion was carried out by the Institute of Mechanical Engineering. Entitled with the common name „Maschinentechnische Exkursion“, this trip headed to the south of Germany including cities such as Friedrichshafen and Munich. A total of 14 students took advantage of this offer to get an overview of the job opportunities of mechanical engineers.*

## Hintergrund der Exkursion

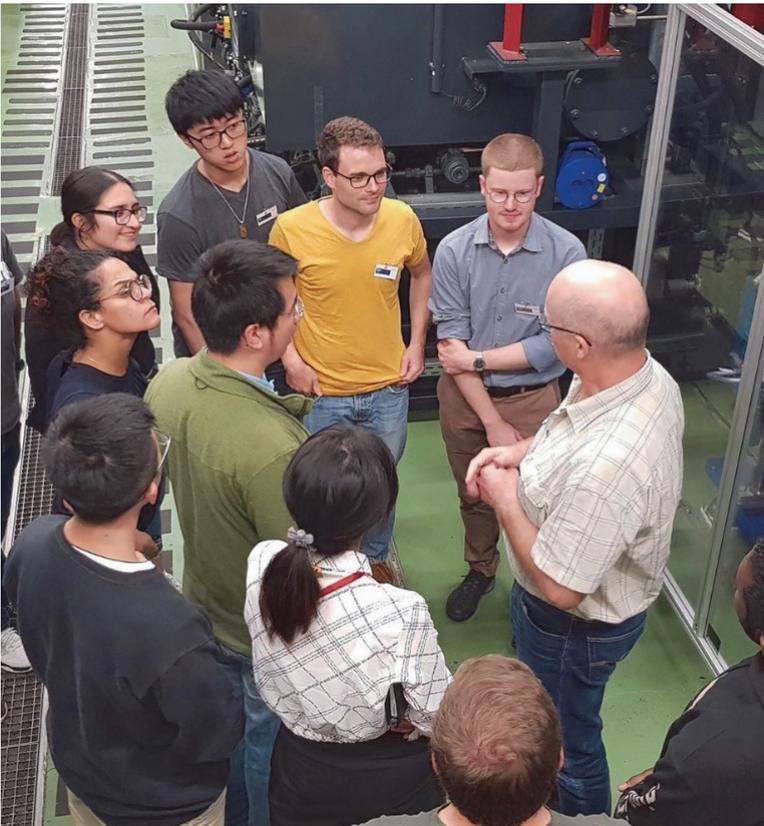
Das Institut für Maschinenwesen führt in regelmäßigen Abständen eine einwöchige Exkursion mit Studierenden durch. Die zuletzt 2016 durchgeführte Exkursion verlief in den Norden Deutschlands, wobei unter anderem ein Stahl-Werk, die Rotorfertigung von Windkraftanlagen und die automatisierte Logistik eines Hafenebetreibers besichtigt worden sind. Mit der diesjährigen Exkursion in den Süden Deutschlands wurde wieder ein breiter Bogen quer über viele Branchen geschlagen und ein Kontrast zu den örtlichen und branchenspezifischen Gegebenheiten im Vergleich zum Norden gegeben. Das Ziel der Exkursion ist, den Studierenden, die sich in der Regel im fortgeschrittenen Stadium ihres Studiums befinden, einen möglichst breiten Einblick in mögliche zukünftige Tätigkeitsfelder eines Ingenieurs zu bieten.

## Rexroth – kraftvoller Antrieb der Industrie

Nach einer 4-stündigen Autofahrt mit zwei Kleinbussen erreichten die Exkursionsteilnehmer die erste Station der Exkursion, Rexroth in Lohr am Main. Das Unternehmen, welches 32.300 Mitarbeiter beschäftigt, ist vollständige Tochter der Robert Bosch GmbH und beschäftigt sich grundlegend mit Problemstellungen der Bereiche Hydraulik, Automatisierungstechnik, elektrischen Antrieben und Steuerungen. Am Standort Lohr am Main befinden sich, neben dem Verwaltungssitz, auch Fertigungs-

und Entwicklungsstandorte. Letzteren durften die Studierenden während des Besuchs besichtigen.

Nach einer Einführung in das Unternehmen durch Dr. Backhaus, Frau Schmitt, und Frau Ohme, zwei Mitarbeiterinnen der HR-Abteilung, fand eine Führung durch Stationen des Center of Competence (CoC) statt. Neben der Einführung in derzeitige Problemstellungen und Testmethoden im Bereich der hydraulischen Antriebe, wurde die Relevanz der Untersuchung akustischer Eigenschaften schwingungserregter Komponenten verdeutlicht. Den Abschluss fand die Führung im Vorführbereich der Entwicklung, in dem die Vorteile und das Potential dezentral angetriebener Hydraulikzylinder erläutert wurden.



*Abbildung 1: Exkursionsgruppe während der Führung durch das Center of Competence (Foto: Rexroth Lohr am Main)*

Die Atmosphäre während des dreistündigen Besuchs war seitens des Unternehmens sehr zuvorkommend, sodass den Studierenden ein optimaler Start in die

Exkursionswoche geboten wurde. Besonders hervorzuheben ist der offene, interessante und ehrliche Austausch in Hinblick auf Einstellungsverfahren und Schwierigkeiten denen sich die Studierenden auf der einen Seite und die HR-Mitarbeiter auf der anderen Seite stellen müssen.

Die ersten Eindrücke verarbeitend machte sich die Exkursionsgruppe auf den Weg nach Stuttgart, wo am darauffolgenden Morgen um 09:00 Uhr bereits die nächste Unternehmensbesichtigung eingeplant war. Der Großteil der Teilnehmer beendete den Abend bei einem leckeren Abendessen mit typisch schwäbischen Speisen im Stuttgarter Norden.

### Herzlich willkommen bei der Stihl AG

Das Familienunternehmen Stihl, mit Hauptsitz in Waiblingen-Neustadt und derzeit über 17.000 Mitarbeitern weltweit, stellt motorbetriebene Geräte für die Forstwirtschaft, Bauwirtschaft sowie den Landschafts- und Gartenbau her. Das vermutlich bekannteste Produkt ist die STIHL Motorsäge, die mit ihrem in der Unternehmensfarbe Orange gehaltenen Design nicht nur in Deutschland das Maß für Qualität und Leistung in diesem Bereich darstellt.

Nach einer kurzen Begrüßung durch Frau Tatjana Moll und Einführung in das Unternehmen, wurden den Exkursionsteilnehmern drei Entwicklungsbereiche gezeigt: das Chemische Labor, die Sägekettenentwicklung und die akkubetriebenen Geräte.

Dass Stihl einen eigenen Kraftstoff für die motorbetriebenen Geräte auf dem Markt hat könnte vielen Eigentümern bewusst sein, dass dieser jedoch von Stihl in den eigenen vier Wänden entwickelt und stetig auf die Bedürfnisse der Geräte optimiert wurde, ist eine Information die viele nicht kennen. Im chemischen Labor werden neben Kraft- und Schmierstoffen auch Bauteiluntersuchungen durchgeführt, um z.B. die Lebensdauer von Kraftstoffleitungen oder witterungsgefährdeten Komponenten chemisch zu untersuchen und für Lösungsansätze für die Weiter- und Neuentwicklung zu liefern.

Von dick-und-schwer bis leicht-und-filigran gibt es im Repertoire der Sägeketten der Stihl-AG alles und für jeden Anwendungsfall optimiert. So gibt es für den Hobbybereich eigens entwickelte Sägeketten, die durchaus den ein oder anderen Schnitt in den Erdboden vertragen, jedoch in Bezug auf die Schnittleistung gewisse Abstriche treffen müssen, während im Profibereich Hochleistungsketten Anwendung finden, die jedoch bei der kleinsten Fehlbedienung ihre Schärfe verlieren. Eine Eigenschaft bleibt in beiden Fällen: Wird aus Holzspänen Holzpulver, ist die Kette hinüber.

Natürlich macht die Elektrifizierung auch keinen Umweg um Hochleistungs-Arbeitsgeräte, sodass die Produktpalette akkubetriebener Motorsägen, Laubbläser, Pflückhilfen, Rasenmäher etc. vielfältig ist und auch hier für jeden Leistungs- und Ambitionsbereich etwas Passendes in petto hat. Ein Nachteil, wie im Mobilitätssektor auch, ist auch hier zu verzeichnen: Wer im Akkord Bäume fällen möchte, braucht entweder viele Akkus oder greift zur konventionellen Motorsäge.

Das Interesse seitens der Studierenden zeigte sich gerade dadurch, dass durch die vielen Fragen die eingeplante Zeit je Station von 20 Minuten stets überschritten wurde und auch die Fachexperten Freude am Beantworten gezeigt haben. Nach den Führungen standen diese, sowie weitere Führungspersönlichkeiten des Entwicklungsbereichs den Exkursionsteilnehmern Rede und Antwort und haben auch hier offen über Entwicklungspotentiale, Ziele und Anforderungen an den Beruf eines Ingenieurs bei Stihl beantwortet.

Insgesamt haben sich die Exkursionsteilnehmer bei der Stihl AG sehr herzlich aufgenommen gefühlt. Die Anzahl der für die Betreuung und Beantwortung der Fragen zur Verfügung gestellte Personal zeugte auch davon, dass seitens der Stihl AG Interesse an Nachwuchsingenieuren besteht und den Exkursionsteilnehmern dadurch ein hoher Stellenwert zugetragen wurde.

Nach einem gemeinsamen Mittagessen verabschiedeten sich die Exkursionsteilnehmer von der Stihl AG und machten sich auf den Weg nach Friedrichshafen. Die am malerischen Bodensee gelegene Stadt zeigte sich bei Sonnenschein von ihrer schönsten Seite.

### Alles stets im Eingriff im ZF-Getriebe

Die ZF Friedrichshafen AG zählt mit circa 150.000 Mitarbeitern zu den größten Automobilzulieferern weltweit. Wenn sich in Deutschlands Städten die Blechlawinen des Pendlerverkehrs durch die Straßen schieben, sorgen Komponenten von ZF, dass die in der Verbrennungsmaschine erzeugte Kraft auch auf die Straße übertragen wird.

Das Getriebe, bzw. vielmehr verschiedenste Variationen davon, ist vermutlich das bekannteste Produkt ZFs. Am Vormittag haben sich die Exkursionsteilnehmer mit Dr. Burgtorf, dem Organisator und Gastgeber des Besuchs, im ZF-Foyer getroffen. Hier gab es zur Einführung in die ZF-Welt eine Führung durch die Geschichte und Entwicklungen von ZF. Interessant zu sehen war, wann welche Entwicklungen, die heute zum Stand der Technik gehören, eingeführt worden sind und welchen Einfluss sie auf die Mobilität der damaligen Zeit mit sich gebracht haben. Die Effizienz und Wirkungsgradsteigerung der Komponenten steht stets im Vordergrund, was sich unter anderem in der Entwicklung des gängigen Synchrongetriebes bzw. im aktuellen Anwendungsfall dem ersten 9-Gang-Automatikgetriebes widerspiegelt.

Nach der geschichtlichen Einführung hatten die Exkursionsteilnehmer Zeit, in gemütlicher und familiärer Atmosphäre auf Details von Entwicklungen einzugehen, sowie Informationen zu Entwicklungsmöglichkeiten bei ZF sowie dem „Leben am Bodensee“ zu erhaschen.

Bereits am Vorabend hat sich Herr Burgtorf die Mühe gemacht, den Exkursionsteilnehmern möglichst viel vom Flair der Region zu vermitteln. So kam es, dass sich die Exkursionsgruppe geschlossen in einem regionalen Winzerlokal mit Herrn Burgtorf traf und bei typisch regionalen Gerichten und lokalen Weinen ein Bild von den Annehmlichkeiten der Bodenseeregion machen konnte. Der kulinarisch entspannte

Abend endete mit einer Privatführung durch die heiligen Hallen des Lokals sowie mit der Besichtigung einer der größten Weinpressen der Welt.

### Wirksam verpackt - Uhlmann Pac-Systeme

Unter den besuchten, bereits am Markt etablierten Unternehmen ist die Uhlmann Pac-Systeme GmbH wohl das kleinste Unternehmen. Mit circa 2400 Mitarbeitern stellt das Unternehmen, mit Sitz in Laupheim in Baden-Württemberg, Blister-Verpackungsmaschinen für die Pharmaindustrie her. Medizinische Wirkstoffe, die sowohl in fester Form als Tablette, als auch in flüssiger Form in einer Ampulle vorliegen können, müssen bevor sie zum Verbraucher gelangen, entsprechend verpackt werde. Blisterverpackungen sorgen für eine gute Sichtbarkeit der Produkte und/oder für den Schutz der Wirkstoffe vor der Umwelt bevor sie verbraucht werden.

Die Exkursionsgruppe traf am Nachmittag am Standort Laupheim ein. Nach einer kurzen Besucherkontrolle wurde bei Brezeln und Naschereien das Unternehmen und das Tätigkeitsfeld vorgestellt. Nach dieser Einführung und Stärkung wurden die Teilnehmer, aufgeteilt in zwei Gruppen, durch die Montage- und Vorbereitungshallen geführt. Während dieser Führung wurde deutlich, dass für einen ordnungsgemäßen Verpackungsprozess eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zusammenspielen müssen. Die Tabletten oder Ampullen müssen auf ihre eigene Art und Weise portioniert, ausgerichtet, eingefüllt, verschlossen, geprüft und kartoniert werden. Jede Teilaufgabe muss dabei präzise auf die anderen Arbeitsschritte abgestimmt sein, da ansonsten die hohen Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 600 Verpackungen pro Minute nicht erreicht werden könnten. Um diese Sicherheit zu gewährleisten arbeiten die Ingenieure bei Uhlmann stets an neuen Methoden die Einzelprozesse zu optimieren und die Fehlerquote zu minimieren.

Das wohl beeindruckendste war für die Exkursionsteilnehmer vermutlich, so eine Maschine bei voller Geschwindigkeit einmal live zu sehen. Im Produktionsbetrieb sind die Packungen mit dem bloßen Auge nicht mehr verfolgbar, sondern verschwimmen aufgrund der hohen Durchlaufgeschwindigkeit.

Nach der Führung bestand für die Exkursionsteilnehmer wieder die Möglichkeit Fragen zu stellen, die – wie bei allen besuchten Unternehmen – wieder offen und wohlwollend verlief.

Besonders hervorzuheben ist die Präsentation eines typischen Wochenablaufs eines Ingenieurs bei Uhlmann durch Dr. Langenbach. Hier haben die Exkursionsteilnehmer verdeutlicht bekommen, welche Positionen mit welchen Anforderungen an den Mitarbeiter verbunden sind und welchen täglichen Herausforderungen man sich zu stellen hat. Dies zeigte vor allem noch einmal die breiten Einsatzmöglichkeiten eines Ingenieurs.

Am Abend fanden sich die Teilnehmer zu einem gemeinsamen Essen in der Ulmer Innenstadt wieder und beendeten den Abend mit einer Nachtwächterführung mit interessanten Einblicken in die Geschichte und das Leben der Zweiländstadt.

## MAN Energy Solutions – „leichte“ Antriebe für den Schiffsverkehr

Als nächstes Übernachtungsziel stand am vierten Tag München auf der Liste. Als Zwischenstopp auf dem Weg nach München wurde MAN Energy Solutions in Augsburg angesteuert. Hier fertigt das Unternehmen mittelschnell laufende Dieselmotoren für den maritimen Einsatz. Dass mittelschnell laufende Motoren bis zu 120 Tonnen schwer werden können war den meisten Teilnehmern im Vorfeld wohl nicht bekannt, sodass das Erstaunen beim ersten Anblick groß war.

Ein ehemaliger Angestellter im Ruhestand hat den Exkursionsteilnehmer eine sehr interessante und detailreiche Führung durch die Fertigung und Montage der Motoren gegeben. Nebenbei wurde das aktuelle Thema der Abgasverordnungen thematisiert bei dem sich herausgestellt hat, dass die technischen Voraussetzungen für eine emissionsreduziertere Schifffahrt bereits vorhanden sind, aufgrund von international nicht definierten Regeln, die Reeder den finanziellen Aufwand der Umsetzung noch nicht eingehen möchten und auf internationalen Gewässern noch konventionell angetrieben bleiben. Zum Standort Augsburg ist noch zu erwähnen, dass die alten und großen Hallen des Geländes einen Kontrast zu den Reinraum-ähnlichen Produktionsstätten anderer besichtigter Unternehmen bieten, jedoch einen gewissen Charme der Großindustrie mit sich bringen.

Abgeschlossen wurde die Führung mit einem Gespräch mit der HR Abteilung und der Vorstellung der Virtual-Reality-Abteilung, welche die Möglichkeiten VR-Technik für den Service und den Support und Schulungszwecke darstellte.

Nach Verabschiedung und kurzem Mittagssnack an einem Autobahnimbiss wurde der nächste Tagesordnungspunkt in das Navigationsgerät getippt: Das Startup Cevotec im Süden Münchens.

## Innovativ mit Kohlefaserschnipseln – Cevotec

Statt in einem großen Konferenzraum fanden sich die Teilnehmer der Exkursion beim Startup Cevotec auf provisorisch aufgebauten Bierbänken in einem kleinen Labor auf dem Ludwig Bölkow Campus in Taufkirchen wieder.

Die insgesamt circa 15 Mitarbeiter entwickeln in diesen Räumen Technologien für ihre sogenannten Fiber Patch Placement Anlagen. Diese Anlagen entnehmen Kohlefaserbänder aus einer Rolle, schneiden diese zu, überprüfen die Qualität des entstandenen „Schnipsels“ bzw. Patches und bringen diesen mit Hilfe eines Roboters auf einer vorgefertigten Matrix auf – vollautomatisiert.

So einfach wie der Prozess erklärt ist, ist er bei Weitem nicht. Um die filigranen Kohlefaser-Patches ordentlich zu platzieren und auch Rundungen realisieren zu können, hat das junge Unternehmen einen speziellen Greifer entwickelt, mit dem es möglich ist, die Patches flächig aufzunehmen und auf einer Bauteilmatrix mit beliebiger Kontur aufzubringen.

Nach einer kurzen Einführung in das Unternehmen und die Möglichkeiten und Ziele der Anlagen durch den Geschäftsführer Thorsten Gröne, wurde den Exkursionsteilnehmern in verschiedenen Präsentationen der verantwortlichen Mitarbeiter verdeutlicht, welcher informationstechnische Aufwand hinter der Realisierung einer solchen Anlage steckt. Die Auswahl der Komponenten sowie die Steuerung der Antriebe auf der einen Seite, ist die Kenntnis bzgl. des richtigen Platzierens der Patches auf der anderen Seite ein viel wichtigeres Kriterium für ein langlebiges Kohlefaser-Bauteil. Die Software zur Simulation der optimalen Position der Patches wird ebenfalls von den jungen Mitarbeitern in Eigenregie vor Ort programmiert.

Dass Software und Hardware auch in Realität zusammenspielen, wurde durch eine abschließende Demonstration der bisherigen Anlagen und eines Versuchsaufbaus einer zukünftigen Anlage verdeutlicht.

Insgesamt haben die Exkursionsteilnehmer mit dem Besuch bei Cevotec gesehen, dass nicht nur Konzerne und etablierte Unternehmen einen passenden Arbeitgeber darstellen, sondern dass auch kleine, frisch gegründete Unternehmen mit einem interessanten Tätigkeitsfeld glänzen können, welches jedoch auf der anderen Seite der Medaille viel eigenverantwortliches Arbeiten mit sich führt.

Am Abend fanden sich die Exkursionsteilnehmer in einem typischen Münchener Lokal zusammen. Herr Alexander von der Cevotec gesellte sich dazu und stand für weitere Fragen zum Leben in und um München, sowie zum Arbeiten in einem jungen, dynamischen Unternehmen zur Verfügung.

### Es rappelt in der Kiste - Audi AG

Am letzten Tag standen 600 zu fahrende Kilometer für die Rückreise auf dem Tagesplan. Dieser sollte jedoch nicht nur auf der Autobahn verbracht werden, sodass noch ein Besuch bei der Audi AG in Ingolstadt organisiert wurde.

Nach einem frühmorgendlichen Aufbruch in München traf die Exkursionsgruppe etwa gegen halb 10 in Ingolstadt ein. Allein die Größe des Audi-Hauptwerks zu sehen war für die meisten Teilnehmer schon beeindruckend. Nach Bewältigung der Personenkontrolle und persönlicher Abholung durch Herrn Dr. Dörnhöfer gab es mit Unterstützung seines Kollegen Herrn Dr. David zunächst eine kurze Einführung in das Unternehmen. Anschließend wurde direkt fachlich in das Thema des Besuchs eingestiegen, Betriebsfestigkeit von Fahrzeugen mit all ihren Facetten.

Zunächst lernten die Exkursionsteilnehmer kennen, dass nicht alle möglichen Lasten, die auftreten können auch aus betriebsfestigkeitstechnischer Sicht berücksichtigt werden können. Es muss sich hierbei immer die Frage gestellt werden: Ist das ein während der vorgesehenen Nutzung zu erwartender Lastfall? Dass ein sportliches Fahrzeug gewisse Kurvenkräfte ertragen muss, ist ersichtlich, dass das selbe Fahrzeug im Offroadbereich verwendet wird eher weniger. Es ist also für jedes Fahrzeug und für jede Komponente separat zu entscheiden welche Lasten tatsächlich auftreten können bzw. welche Kräfte schon zum "Miss-Use" zählen und damit für die Auslegung nicht berücksichtigt werden. Das Auslegen "gegen alles" ist

in Bezug auf das Fahrzeuggewicht und der damit verbundenen höheren Verbräuche des Fahrzeugs suboptimal.

Welche Vielzahl an Untersuchungen durchgeführt werden, um die gewünschte Lebensdauer der Fahrzeugkomponenten zu gewährleisten durften die Exkursionsteilnehmer in den Prüfhallen von Audi selber sehen. So werden z.B. Lenkräder auf Lasten untersucht, die während des Richtens des vom Fahrer getragenen Mantels auftreten können. Neben den Prüfständen für die Untersuchung von Einzelkomponenten wurden diverse Gesamtfahrzeugprüfstände besichtigt. Hier gab es zum einen Prüfstände, welche über vier Hydraulikzylinder Schlechtwegsimulationen durchführen können und zum anderen Prüfstände in denen das Fahrzeug an allen vier Rädern aufgehängt in 25 Richtungen belastet werden kann (6 Freiheitsgrade pro Rad und Lenkradstellung). Diese Prüfstände dienen z.B. der Untersuchung von Kurvenverhalten, sowie Anfahr- und Bremssituationen.

Nach der Besichtigung haben sich Dr. Dörnhöfer und Dr. David noch die Zeit genommen, auf detaillierte Fragen einzugehen. Besonders spannend war hierbei die offene Beantwortung der Fragen bzgl. des Arbeitsalltags eines Ingenieurs bei Audi, mögliche Werdegänge, zu bewältigende Anforderungen und die Identifikation mit dem Arbeitgeber. Insgesamt haben sich die Exkursionsteilnehmer in dieser sehr persönlichen Atmosphäre sehr gut aufgenommen gefühlt, welches sich in der Überschreitung der vorgesehenen Zeit um circa 1,5 Stunden bemerkbar machte.

### Erfolgreiche Exkursion

Die Resonanz der Studierenden sowie der teilnehmenden wissenschaftlichen Mitarbeiter war durchgehend positiv. Zum einen konnte nicht nur das fachliche Wissen aller Teilnehmer erweitert werden, sondern auch die Bindung der studentischen Teilnehmer an das Institut verbessert werden. Darüber hinaus steigerte die Exkursion die Bekanntheit der Technischen Universität Clausthal und ermöglicht somit den Studenten einen leichteren beruflichen Einstieg.

### Danksagung

Ein Dank geht an alle beteiligten Firmen, die sich für die Exkursion die Zeit genommen haben und so eine lehrreiche Woche ermöglichten. Die durchweg familiäre Atmosphäre machte es den Teilnehmenden einfach Fragen zu stellen, die man gegebenenfalls in einer anderen Situation nicht hätte Stellen können, was grundlegend zum Erfolg der Exkursion beigetragen hat.

Besonderer Dank geht ebenfalls an die finanziellen Unterstützer dieser Exkursion. Hierzu zählen der Verein der Freunde der Technischen Universität Clausthal, der Verein Deutscher Ingenieure, die Fakultät 3 der TU Clausthal und der Ehemaligenverein des Instituts für Maschinenwesen.

## Techniker2Bachelor, Hürden bei der Basisanrechnung

Wallat, P; Wächter, M; Lohrengel, A

Das Projekt „Techniker2Bachelor“ ermöglicht es Absolventen, im Bereich Maschinenbautechnik, ein verkürztest Studium, im Bereich Maschinenbau, an der TU Claustahl (TUC) zu beginnen. Für Absolventen von Technikerschulen mit einem Kooperationsvertrag ist die Lage besonders komfortabel. Um diesen Komfort allen Maschinenbautechniker anzubieten wurde eine Basisanrechnung geprüft. Die dabei erkannten Hürden werden in diesem Artikel diskutiert.



*The project “Techniker2Bachelor” provides graduates with the German “Techniker” the possibility to start shortened mechanical engineering studies at the University of Technology Clausthal (TUC). Graduates from cooperating school are in a very comfortable situation due to the cooperation contract. To provide this comfort to other graduates, a base recognition was examined. The upcoming hurdles will be discussed in this article.*

### Das Projekt Techniker 2 Bachelor

Das Projekt befindet sich seit 2018 in der zweiten Förderphase. In der ersten Förderphase sind Studienpläne von einzelnen Technikerschulen geprüft worden. Darauf aufbauen sind mögliche Anrechnungen entstanden. Diese haben den Umfang von ca. 60 Creditpoints (CP) und damit etwa 2 Semester, die ein Techniker bei Beginn eines Maschinenbaustudiums an der TU Clausthal angerechnet werden.

Die pauschalen Anrechnungen erfolgt bisher nur für Studenten, welche von Kooperationssschulen kommen. Nur die Urkunde und das Zeugnis werden benötigt; anschließend werden die Leistungen gemäß Kooperationsvertrag anerkannt und das Studium kann mit dem Wissen aufgenommen werden, dass die Anrechnung der entsprechenden Fächer erfolgt.

Eine Anrechnungschance besteht grundsätzlich für jeden Techniker. Allerdings müssen dafür die Unterlagen beim Prüfungsamt eingereicht werden. Dort werden diese weitergeleitet und, für jeden Einzelfall, geprüft. Dabei ist eine Anrechnung nicht garantiert. Dadurch ist der mögliche Umfang begrenzt und die Wartezeit der Anrechnung nicht immer absehbar.

Dieser Kontrast zwischen den Anrechnungen der Kooperationssschulen und den regulären Anrechnungen für einen Techniker kann dafür sorgen, dass ein Studium,

trotz Studienwunsch, nicht aufgenommen wird. Um dem entgegen zu wirken wurde eine Basisanrechnung geprüft.

### Rahmenlehrpläne

Bildung ist Ländersache, dafür hat jedes Bundesland seine eigenen Rahmenlehrpläne für deren Schulen. Innerhalb der Lehrpläne ist verankert, welche Inhalte in dem Bundesland gelehrt werden müssen, um den jeweiligen Abschluss zu erreichen. Jede Schule wiederum kann den eigenen Lehrplan um weitere Fächer ergänzen. Daher ist der Lehrplan einer jeden Schule einzigartig. Die in der Nähe befindliche Industrie hat indirekt einen Einfluss auf die Schwerpunkte der Schulen. Dadurch sollen die Absolventen Ideal für die ansässigen Unternehmen vorbereitet werden.

Die Rahmenlehrpläne sind öffentlich, manches Mal allerdings schwer im Internet zu finden. Für einige Pläne ist es notwendig die Ministerien und / oder Schulen direkt anzusprechen. Dann bekommt man, stets freundlich, eine Antwort wo diese zu finden sind oder direkt per Mail zugesandt.

Innerhalb der Rahmenlehrpläne ist die Benennung der Fächer nicht einheitlich, was eine genaue Zuordnung zu einem Fach des Bachelorstudiums Maschinenbau, an der TU Clausthal, erschwert. Daher ist eine Detailprüfung der Inhalte in der Modulbeschreibung notwendig. Nur so können Art und Umfang der Lehrgebiete zuverlässig geprüft werden.

Temporär sind die Lehrpläne der Schulen und die Module der TU Clausthal abgeglichen. Allerdings ist es nur nachvollziehbar, dass sich die Pläne über die Jahre ändern. Dies findet nicht zum selben Zeitpunkt statt. Eine fortlaufende Prüfung ist daher notwendig, um die Basisanrechnung aktuell zu halten.

### Die mögliche Basisanrechnung

Die Prüfung hat ergeben, dass die Fächer in Tabelle 1 für eine Basisanrechnung mit einem Gesamtumfang von 36 CP möglich ist.

Diese anrechenbaren Fächer sind die Schnittmenge die aus den Rahmenstudienplänen hervorgeht. Für die Bundesländer gibt es potential für weitere Anrechnungen, diese sind durch die unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen der Schulen nicht einheitlich.

Wie auch bei vorherigen Kooperationen handelt es sich bei den Anrechnungen nicht um Grundlagenfächer, diese muss der Techniker an der Universität absolvieren, auch wenn bereits Fächer mit ähnlichem Inhalt an der Schule absolviert worden sind.

Die Basisanrechnung als Grundlage kann für weitere Kooperationsverträge genutzt werden. Der einzelne Prüfaufwand verringert sich und eine Gesprächsbasis ist

gelegt. Weitere Einzelheiten zu den zusätzlich anrechenbaren Fächern können somit schneller und intensiver abgestimmt werden.

*Tabelle 1: Module und CP der Basisanrechnung*

<b>Fach</b>	<b>CP</b>
Fertigungstechnik	3
Industriepraktikum	12
Ingenieuranwendung	3
Projekt Maschinenelemente	6
Seminar Maschinentechnik	2
Technisches Zeichnen / CAD	4
Wirtschaftswissenschaften	6
<b>Summe</b>	<b>36</b>

Aus den bisherigen Erfahrungen, der abgeschlossenen Kooperationsverträge, liegt ein Potential für insgesamt ca. 60 CP nahe. Die Prüfung der Rahmenlehrpläne stellt bei einigen Bundesländern bis zu 63 CP in Aussicht. Durch Ergänzung der schulspezifischen Lehrinhalte können unter Umständen noch weitere Leistungen anerkannt werden.

### Bisherige Erfolg im Projekt

Innerhalb des Projektes werden weiterhin Erfolge verzeichnet. Die Kooperationen mit den Technikerschulen:

- *Technikerakademie der Stadt Braunschweig*
- *Technikerschule Allgäu*
- *Technikerschule Augsburg*
- *Fachschule für Wirtschaft und Technik Clausthal Zellerfeld (FWT)*

Bestehen weiterhin und wurden sogar erneuert. Durch die Erneuerung der Kooperationsverträge wurde zeitgleich geprüft, ob es möglich ist das Angebot zu erweitern. Dabei kam es mit der Technikerschule Augsburg (TA) zu interessanten Möglichkeiten für den Bereich *Umweltschutztechnik* der TA und dem Studiengang *Verfahrenstechnik*, Schwerpunkt *Umweltschutztechnologien* an der TUC. Ein genaues Ergebnis steht allerdings noch aus.

Für den Studiengang *Energie und Rohstoffe* an der TUC gibt es seit dem Wintersemester 19 / 20 die Möglichkeit der Anrechnung von 57 CP für Techniker der FWT mit der Abschluss *Bergbautechnik*, Schwerpunkt *Bergtechnik*. Der erste Techniker

hat dieses Angebot bereits wahrgenommen und startet mit dem Studium im gleichen Semester.

### Rückweg, von der Uni an die Schule

Auch für den Rückweg von Studienabbrechern gibt es Möglichkeiten sich an den Technikerschulen einzuschreiben. Für diejenigen, die zwar Interesse und Freude an Technik haben, dies aber eher praktisch ausüben möchten als theoretisch, bietet dies die Möglichkeit zur Umorientierung mit wenig zeitlichen Verlusten, wenn die Voraussetzungen stimmen.

Die FWT liegt als Technikerschule in Clausthal-Zellerfeld besonders nahe. So haben sich bereits zwei Studierende, einer aus dem Bereich Bergbau, einer aus dem Bereich Maschinenbau, für diesen Weg entschieden. Dies lief zwar nicht über die Projektbetreuung ab, zeigt aber, dass es einen Bedarf und ebenso einen Weg dafür gibt. Zusätzlich wirbt die Technikerschule Augsburg ebenfalls um Studienabbrecher, welche sich umorientieren möchten.

Die Modalitäten zur Aufnahme an der Technikerschule und einer Anrechnung sind abermals bundeslandspezifisch. Dabei ist der Studienfortschritt und die Vorbildung der Probanden maßgeblich. Demnach ist jedes mal eine Einzelfallentscheidung notwendig. Dies ist zwar aufwendig, stellt aber eine gerechte Behandlung aller dar.

### Zusammenfassung

Das Projekt Techniker2Bachelor sorgt weiterhin dafür, die Durchlässigkeit der Hochschule zu erhöhen. Die bisherigen Abschlüsse der Techniker sind überdurchschnittlich gut. Dies zeigt, dass die Zulassung inklusive der Anrechnungen gerechtfertigt ist.

Das Interesse der Technikerschulen an dem Programm ist hoch. Dabei wird oft betont, dass es den Absolventen ermöglicht ihren eigenen Lebensweg noch besser zu gestalten und zu verfolgen. Die Basisanrechnung kann einen wichtigen Betrag dazu leisten, das System weiter zu etablieren und die Durchlässigkeit zu erhöhen.

*Hinweis: Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16OH21040 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor/bei der Autorin.*

## Wege ins Studium

Losch, M.

*Ziel des Projektes ist es, Personen mit Migrationshintergrund, die Interesse an einem Studium haben, bei einer bewussten Entscheidung für ein Studium im MINT Bereich zu helfen. Weiterhin werden die angehenden Studierenden beim Einstieg in das Studium an der TU Clausthal unterstützt um so den Weg für einen erfolgreichen Abschluss zu gestalten.*



*The aim of the project is to help people with a migration background who are interested in studying to make a conscious decision to study in the MINT field. Furthermore, the prospective students are supported in their entry into the studies at the TU Clausthal in order to shape the way for a successful graduation.*

### Aufbau des Projektes

Im Vordergrund dieses Projektes stehen Personen mit Migrationshintergrund, die Interesse an einem Studium im MINT Bereich (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) haben. Dazu zählen die Studiengänge:

- Chemie
- Elektrotechnik
- Energie und Materialphysik
- Energie und Rohstoffe
- Energietechnologien
- Geoenvironmental Engineering
- Informatik
- Maschinenbau
- Materialwissenschaft und Werkstofftechnik
- Rohstoff-Geowissenschaften
- Sportingenieurwesen
- Technische Informatik
- Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen
- Wirtschaftsinformatik
- Wirtschaftsingenieurwesen

Das Projekt soll Studieninteressenten bei einer bewussten Entscheidung für ein solches Studium unterstützen. Haben sich die angehenden Studierenden für ein Studium an der TU Clausthal entschieden, so werden sie ab dem Einstieg ins Studium unterstützt um ihnen einen erfolgreichen Abschluss zu ermöglichen.

Das Projekt „Wege ins Studium“ ist eins von neun Projekten, die von dem niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur im Rahmen des Förderprogramms „Wege ins Studium öffnen“ gefördert werden /1/. Das Projekt befindet sich gerade in der Aufbauphase an der TU Clausthal.

### Mentor\*innen-Programm

Im Vergleich zu Einheimischen haben geflüchtete Personen einen höheren Informationsbedarf was zum Beispiel Studienprogramme, Bewerbung, Finanzierung und die Lebenssituation angeht. Jedoch haben sie auch sehr limitierte Möglichkeiten diesen zu decken, etwa durch eingeschränkte Mobilität aufgrund ihrer finanziellen und rechtlichen Situation (Residenzpflicht). Daher ist es erforderlich, im Rahmen der Studienberatung neue Wege zu beschreiten, wie durch den Einsatz von online unterstützten Beratungsangeboten und Mentor\*innen-Programme.

Im online Angebot werden entsprechende Informationen und Entscheidungshilfen bereitgestellt. Durch ein persönliches online Beratungsangebot können die Studieninteressierten direkt mit Online-Peer-Mentor\*innen in Kontakt treten umso gezielt Fragen beantwortet zu bekommen. Peer-Mentor\*innen sind erfahrene Student\*innen, die den Studienanfänger\*innen mit ihren Erfahrungen und dem Wissen aus dem Studienablauf zur Seite stehen.

Im weiterführenden Präsenzangebot betreuen ausgebildete Peer-Mentor\*innen die neuen Studierenden in fachlichen sowie fachübergreifenden Themen direkt vor Ort in Clausthal.

### Übergang ins Studium

Während im Mentor\*innen-Programm der Schwerpunkt auf Beratung und Orientierung liegt, werden in dem Projektbereich „Übergang ins Studium“ konkrete Angebote zur Unterstützung des Studienbeginns bereitgestellt.

Dieses Angebot richtet sich vor allem an Personen, die ein Studium an der TU Clausthal beginnen möchten, aber aus diversen Gründen noch kein Präsenzstudium beginnen können. Dies kann unter anderem eintreten, wenn die Studienzulassung noch nicht ausgesprochen werden konnte und somit die Reismöglichkeiten beschränkt sind (Residenzpflicht).

Das Online-Lehrangebot dient dazu, dass einzelne Module des Studiengangs bereits vor dem offiziellen Studienbeginn gelehrt werden können. Die angehenden Studierenden können sich somit vorab in dem entsprechenden Modul prüfen lassen und dies im späteren Studium an der TU Clausthal angerechnet bekommen. Zur Verfügung gestellt werden die Lehrveranstaltungen „Experimentalphysik I“ und „Technisches Zeichnen“.

Hierbei werden den angehenden Studierenden alle nötigen Unterlagen bereitgestellt. Mit Hilfe der Vorlesungsaufzeichnung der TU Clausthal stehen für das Modul der Experimentalphysik I alle Vorlesungen online zur Verfügung. Ebenfalls

profitieren die angehenden Studierenden von online gestellten Lehrvideos zu den einzelnen Übungseinheiten des technischen Zeichnens. Diese Lehrvideos können weltweit über den Video-Server der TU Clausthal abgerufen werden und benötigen keine separate Zugangsberechtigung.

Um den künftig Studierenden neben den Vorlesungen auch einen Übungsteil bereit stellen zu können, werden die Skripte und Übungseinheiten auf der sogenannten Moodle-Plattform bereitgestellt. Moodle ist ein Lernplattform, in der Übungsaufgaben erstellt werden können. Hierbei können die Studierenden die Übungsaufgaben eigenständig von ihrem derzeitigen Standort aus bearbeiten und ihre Ergebnisse abgleichen, in dem sie entweder ihre erarbeitete Lösung direkt in Moodle eingeben oder eine der entsprechenden Antwortmöglichkeiten auswählen. Moodle bietet hierfür eine große Auswahl an Fragetypen, wie zum Beispiel Multiple Choice Fragen, Zuordnungen, Wahr/Falsch Fragen oder Freitexte.

Durch gezielte Fragen zu dem Lehrinhalt soll die Moodle-Plattform zum einen behilflich sein das Thema durch Aufgaben zu vertiefen, indem die Studierenden eigenständig die Aufgaben lösen und zum anderen soll es als Selbstkontrolle dienen.

### Welche der angegebenen Maßstäbe stellt das Original kleiner dar?

Wählen Sie eine oder mehrere Antworten:

- a. 2:1
- b. 10:1
- c. 5:1
- d. 1:2 ✓ Die Antwort ist richtig.
- e. 1:5 ✓ Die Antwort ist richtig.

Die Antwort ist richtig.

*Abbildung 1: Beispielaufgabe aus dem Moodlekurs technisches Zeichnen*

Durch das Zusammenspiel aus Lehrvideos und den Übungseinheiten mittels Moodle sollen die angehenden Studierenden optimal auf die entsprechenden Prüfungsleistungen vorbereiten.

Das Erbringen der Prüfungsleistung selber soll nicht online, sondern in Clausthal zu den vorgegebenen Prüfungsterminen erfolgen.

## Zusammenfassung

Mit Hilfe dieses Projektes soll es Personen mit Migrationshintergrund erleichtert werden an der TU Clausthal zu studieren.

Zur Verfügung stehen hierbei ein sogenanntes Mentor\*innen-Programm und ein Online-Lehrangebot, das den Studieninteressenten unterstützend zur Seite stehen soll.

Mittels des Mentor\*innen-Programms können erste persönliche Kontakte zwischen den Studieninteressierten und der TU Clausthal geknüpft werden. Auch Studieninteressierte, die aufgrund von Residenzpflichten noch nicht in Clausthal studieren können, profitieren von dem „Wege ins Studium“ Projekt. Durch das Online-Lehrangebot haben sie die Möglichkeit schon vor dem eigentlichen Studium die Inhalte der Lehrveranstaltungen „Experimentalphysik I“ und „Technisches Zeichnen“ zu erarbeiten und zu den regulären Prüfungszeiten die Prüfungsleistung in Clausthal abzulegen. Sodass sie sich diese Leistungen im späteren Studium anrechnen lassen können.

## Literatur

- /1/ Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur: „Wege ins Studium öffnen“ – neun weitere Projekte erhalten Landesförderung, Presseinformation vom 26.01.2018, <https://www.mwk.niedersachsen.de/startseite/service/presseinformationen/-wege-ins-studium-oeffnen--neun-weitere-projekte-erhalten-landesfoerderung-161389.html>





## Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

### Institut

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen und Maschinenteilen, speziell Welle-Nabe-Verbindungen, Freiläufe und Seiltrommeln
- Finite-Elemente-Berechnung
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung
- Maschinenakustik und Schwingungsdiagnostik
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling / Additive Manufacturing

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus 14 wissenschaftlichen Mitarbeitern /-innen. Weitere 8 Mitarbeiter/-innen und 4 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, 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 Seilquerverformungsmessungen 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. Ein Schleuderprüfstand bis

40.000 U/min für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abseileradwindsichter) und ein Prüfstand zur mechanischen Zerkleinerung und einer zur Verinselung ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen. Für Untersuchungen an den genannten Maschinenteilen unter thermischen Bedingungen steht ein 100 l-Temperierschrank für den Temperaturbereich von -70 °C bis 180 °C zur Verfügung. Für Oberflächenanalysen wird ein 3D-Laserscanning-Mikroskop (KEYENCE VK-X 100K) mit zusätzlichem Koordinatentisch für die Untersuchung größerer Bauteile, sowie ein Rauigkeitsmessgerät MAHR MarSurf XR20 eingesetzt.

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

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

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

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

Das fertigungstechnische Labor besteht aus drei Fräsmaschinen, drei Drehmaschinen, einer Senkerodiermaschine (CHARMILLES ROBOFORM 505), einer Drahterodiermaschine (Mitsubishi MV2400S) und einer Startlochbohrmaschine (Mitsubishi START43Z). Als CAD/CAM-System wird CATIA V5 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 50 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 Rapid Tooling Anlage der Firma EOS, 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 TUCreato 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 usw.) sowie Arbeitsplätze zur manuellen Nachbearbeitung der Rapid Tooling Erzeugnisse. Eine Thermografiekamera TESTO 890 mit hoher Auflösung steht für die Überwachung des Bauprozesses in den RP-Anlagen sowie zur Detektion von Verschleißvorgängen an Maschinenelementen zur Verfügung.

Für die virtuelle stereoskopische Produktentwicklung stehen sechs Arbeitsplätze zur Verfügung sowie für die Demonstration ein 65“ Monitor mit Shutterbrille. Mit Hilfe von EON Studio können auf diesen Geräten Virtual-Reality Szenen mit Gestensteuerung betrachtet werden.

## **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
- Torsionssteife Kupplungen mit Ausgleichsfunktion in radialer und axialer Richtung
- 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 dem 01.01.2012

### 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 kerbbarme Welle-Nabe-Verbindung. In: Tagungsband zum 16. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, 11./12.10.2018, Seite 306 – 317, ISBN 978-3-00-059609-4

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

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

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

## Veröffentlichungen 2017

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Veröffentlichungen 2016

Schäfer, G.: Passverzahnungen nach DIN 5480 kompatibel optimiert. In: Tagungsband zur 7. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2016), 09./10./11.2016, Seite 153 – 164, VDI-Berichte 2287, ISBN 978-3-18-092287-4

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Langenbach, J.; Deiters, A.; Hortop, A.; Lachmayer, R.; Lohrengel, A.; Vietor, T.: Improving Engineering Education Through Distributed Development Projects; The 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 Profilwellen (Zahnwellen-Verbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen, Zwischenbericht, Forschungsreport 2013, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2013

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

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

Schmelter, R.; Lohrengel, A.: Effects of locale property changing of hardable sheetmetals to transmission of sound; In: AIA-DAGA 2013: Proceedings of the

International Conference on Acoustics; 18. – 21. März 2013 in Meran, S. 1545 - 1549; ISBN: 978-3-939296-05-8, Berlin 2013

## 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 Institutsmittellungen seit 2007



Institutsmittellung 2007



Institutsmittellung 2008



Institutsmittellung 2009



Institutsmittellung 2010



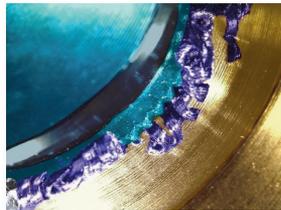
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2011



 TU Clausthal

Institutsmittellung 2012



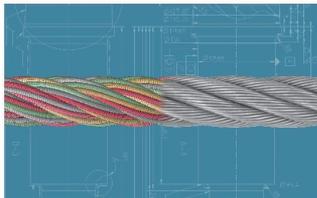
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2013



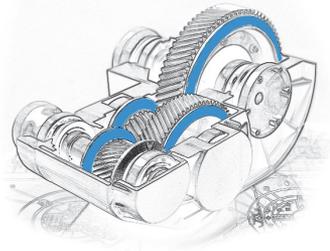
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2014





Institutsmittellung 2015



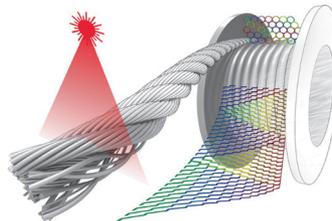
Institutsmittellung 2016



Institutsmittellung 2017



Institutsmittellung 2018



Die jeweiligen Institutsmittellungen finden Sie ebenso auf unserer Webseite



## Autoren

**Heinrich, Christian:** Jahrgang 1995, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 15.10.2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
heinrich@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

**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

**Martiniwski, Viktor:** Jahrgang 1989, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.04.2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
martiniwski@imw.tu-clausthal.de

**Mörz, Florian:** Jahrgang 1990, studierte Maschinenbau an der EAH Jena, seit 01.07.2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
moerz@imw.tu-clausthal.de

**Prumbohm, Max:** Jahrgang 1986, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 15.04.2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
prumbohm@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

**Scherf, Sören C.:** Jahrgang 1989, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg und TU Clausthal, seit 01.10.2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.  
scherf@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

## Externe Autoren

**Erck, Marvin:** Jahrgang 1993, studiert Maschinenbau an der TU Clausthal  
marvin.erck@tu-clausthal.de

**Freundt, Florian:** Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Georg-August-Univ. Göttingen, Abteilung Forstbotanik & Baumphysiologie

**Weilandt, Thomas:** Vorstand der ergopanel AG, Hattorf am Harz

## So finden Sie das IMW

### Anschrift

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



### Aus Richtung Hannover / Hamburg:

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

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

B242 □ Richtung Ortsteil Zellerfeld abbiegen

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

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

### Aus Richtung Göttingen/Kassel:

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

In Katlenburg auf die B241 Richtung Osterode abbiegen.

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

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

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

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

