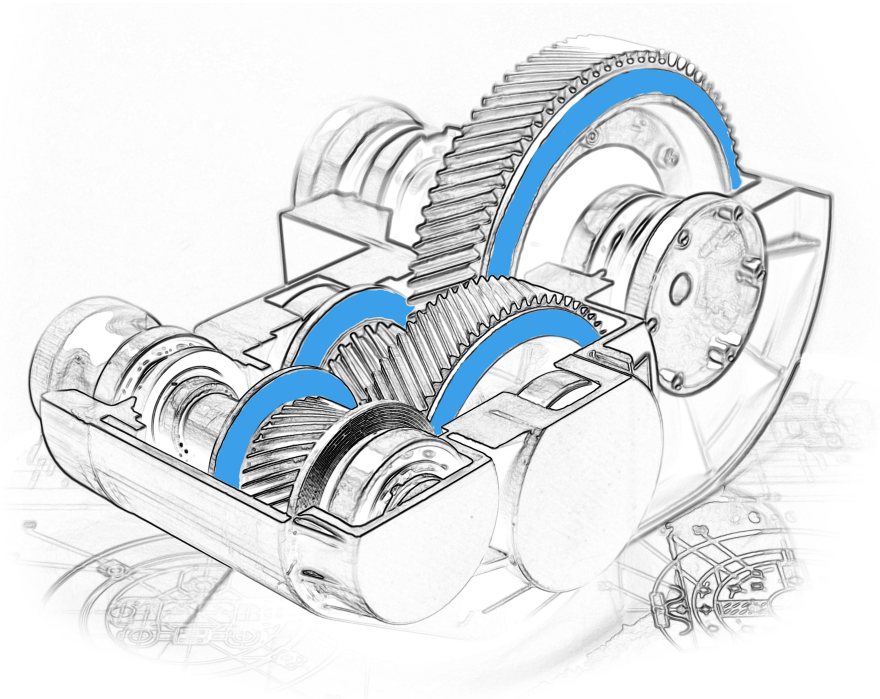




TU Clausthal

## Institutsmitteilung 2015



Mitteilungen aus dem  
**Institut für Maschinenwesen**  
der  
Technischen Universität Clausthal  
Nr. 40  
(Dezember 2015)

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel und Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller

**Redaktion und Layout:**

Dr.-Ing. Günter Schäfer und Dipl.-Ing. Sebastian Hofmann

**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:**

„Blue Bearing Concept“<sup>©IMW</sup> effiziente Lagerung für schrägverzahnte Getriebe

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



## Inhaltsverzeichnis

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

### Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

<i>Martinewski, V.:</i> Berechnung der Lastverteilung in radial belasteten Klemmrollenfreiläufen.....	5
<i>Schulze, M.; Wächter, M.:</i> Innovatives Wickelsystem für Faserseile.....	11
<i>Schäfer, G.:</i> Betrachtung der Zahnfußausrundung von Passverzahnungen.....	23
<i>Schäfer, G.; Wild, J.:</i> Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 .....	29
<i>Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.:</i> Potential moderner Schmierstoff und Beschichtungssysteme am Beispiel axiale bewegter Zahnwellenverbindungen .....	43
<i>Schäfer, G.; Wild, J.:</i> Optimierung der Zahnwellenprofilform.....	53

### Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

<i>Kirchner, J.-S.; Prumbohm, M.:</i> Bewertung der recyclinggerechten Gestaltung von Konstruktionen und Produkten.....	65
<i>Langenbach, J.:</i> Produktgruppen als Hilfe für die Auswahl zutreffender CE-Richtlinien.....	79

### Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Heß, M.:</i> DFG SPP 1551: Der Druckkamm als „Ressourceneffizientes Konstruktionselement“.....	87
---	----

<i>Mörz, F.:</i>	
Erweiterung der institutseigenen Innenhochdruck-Fügeanlage für künftige Forschungsvorhaben .....	97
<i>Schäfer, G.; Wild, J.:</i>	
Verschleißschicht für Zahnwellen-Verbindungen.....	99
<i>Chorzewski, D.; Hofmann, S.:</i>	
Messverfahren zur Ermittlung der Schraubenvorspannung mittels Dehnungsmessstreifen .....	103
<i>Jakob, M.:</i>	
Entwicklung eines optischen Rissvermessungssystems .....	111
<i>Hofmann, S.:</i>	
Untersuchungen zur Übertragungsfähigkeit stirnseitig verschraubter Freilauf-Flansch-Verbindungen – Vorstellung der Prüfmöglichkeiten am IMW .....	117

## Hochschule und Kontakte

<i>Kasüschke, L.; Friedland, J.:</i>	
Erfahrungen aus einem Jahr Techniker2Bachelor – Offene Hochschule .....	123
<i>Langenbach, J.:</i>	
Erweiterung der Virtual und Augmented Reality Ausstattung.....	127
<i>Konetzky, R.:</i>	
Zusammenspiel von Theorie und Praxis .....	129
<i>Ernst, C.; Langenbach, J.:</i>	
Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik erstmalig in Clausthal .....	131
<i>Ernst, C.; Heß, M.; Langenbach, J.:</i>	
Das IMW repräsentiert die TU auf Messen und Ausstellungen.....	133

## Ausstattung etc.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungs- schwerpunkte des Institutes .....	137
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 01.01.2007 .....	143
Erschienenene Institutsmittellungen seit 2007 .....	157
Autoren .....	161
Anfahrt .....	163

## Vorwort

Liebe Geschäftspartner und Freunde des Instituts für Maschinenwesen,

Es ist viel passiert im vergangenen Jahr und so ist die diesjährige Ausgabe der Institutsmitteilung mit Beiträgen wieder prall gefüllt. Zunächst einmal ist zu berichten, dass mehrere neue Prüfeinrichtungen erfolgreich in Betrieb genommen werden konnten. Dazu zählen ein neuer Freilauflebensdauerprüfstand, ein Unwuchtprüfstand und zwei weitere Verspannprüfstände. Der in der letzten Ausgabe bereits erwähnte große Windenprüfstand ist ebenfalls aufgebaut und befindet sich zurzeit noch in der Inbetriebnahme. Details zu den hinzu gekommenen Prüfkapazitäten können Sie den entsprechenden Beiträgen entnehmen.

Doch wozu der hohe Aufwand? Die Antwort liegt in den Aufgabenstellungen neuer Forschungsvorhaben, die im letzten Jahr und im Laufe dieses Jahres bewilligt wurden. Bei einigen dieser Forschungsthemen geht es z. B. um die Prüfung von Maschinenelementen in erweiterten Leistungsbereichen oder die Untersuchung von komplexen mehraxialen Beanspruchungen, die eine phasengenaue Steuerung erfordern, welche nur mit neuer Prüftechnik effizient realisiert werden kann. Auffällig ist, dass bei der Realisierung der Prüftechnik im Bereich komplexer Bauteilgeometrien zunehmend auf additive Fertigungstechnik zurückgegriffen wird, weshalb wir die Kapazitäten in diesem Bereich mit einer neuen Maschine erweitert haben.

Anhand der Berichte zu den angesprochenen neuen Themen Zahnwellenprofiloptimierung, Auslegungssoftware Zahnwellen, Druckkamm als ressourceneffizientes Konstruktionselement und recyclinggerechte Konstruktion bekommen Sie in dieser Ausgabe einen genauen Einblick in die jeweilige Thematik.

Diese regen Forschungs- und Berichtsaktivitäten haben 2015 zu einer besonders hohen Teilnahme an teilweise internationalen Kongressen und Messen in Europa geführt. Eine dieser Veranstaltungen, die Konstruktionstechniktagung KT 2015 wurde in diesem Jahr vom IMW ausgerichtet und fand am 8./9. Oktober in Clausthal statt.

Das Projekt „Techniker2Bachelor“ ist bereits letztes Jahr angelaufen und nach dem erfolgreichen Abschluss der Kooperationsvereinbarungen mit den Technikerschulen Braunschweig und Kempten bereiten wir bundesweit weitere Kooperationen zur Anrechnung beruflich erworbener Kompetenzen vor. Über die ersten Erfahrungen in diesem Projekt können Sie sich in dieser Ausgabe ebenfalls informieren.

Gemeinsam mit der Firma Still, einem bekannten Anbieter für innerbetriebliche Logistiklösungen, haben wir in diesem Jahr den 8. Konstruktionswettbewerb gestaltet. Die Studenten suchten eifrig und fanden Lösungen, um den Fahrkomfort von Gabelstaplern zu erhöhen. Auch Firma Sennheiser, unser Partner aus dem Jahr 2014 sieht in dem gemeinsam gestalteten Wettbewerb große Vorteile und berichtet in dieser Institutsmittteilung über die positiven Erfahrungen im Detail. Im kommenden Jahr wird im Übrigen Firma KEB aus Barntrup die Studierenden mit einer anspruchsvollen Aufgabe herausfordern.

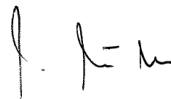
Und noch ein großer Brocken wurde in diesem Jahr gestemmt, nämlich die erfolgreiche Akkreditierung der Studiengänge Maschinenbau und Verfahrenstechnik. Im Bachelorstudiengang Maschinenbau wird es zukünftig mit „Mechatronik“ und „Allgemeinem Maschinenbau“ zwei Studienrichtungen geben. Im Masterstudium wurden die Wahlmöglichkeiten erweitert und die Studenten können sich zwischen vier Studienrichtungen entscheiden: „Allgemeiner Maschinenbau“, „Materialtechnik“, „Mechatronik“ und „Automatisierungstechnik“.

Uns alle etwas überrascht hat die Entscheidung der Niedersächsischen Landesregierung, das NTH-Gesetz auszusetzen. Damit ist die Zusammenarbeit der drei technischen Universitäten Braunschweig, Clausthal und Hannover im Rahmen der Niedersächsischen Technischen Hochschule (NTH) zunächst einmal beendet. Die fachlich orientierte Kooperation zwischen einzelnen Instituten, die es im Übrigen ja auch schon vor der NTH gab, findet selbstverständlich weiterhin statt. Momentan werden an den drei Standorten in Abstimmung mit dem Ministerium Masterpläne erarbeitet.

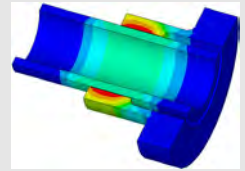
Doch zurück zu positiven Nachrichten! Wie auch in der letzten Ausgabe verkündet, so gibt es auch in diesem Jahr erfreuliche Meldungen bezüglich der Studentenzahlen, denn mit exakt 4963 Studierenden im aktuellen Wintersemester hat die Technische Universität Clausthal wieder einmal einen neuen historischen Rekordwert erreicht. Der Studiengang Maschinenbau befindet sich ebenfalls auf einem sehr stabilen Niveau.

Die Mannschaft des IMW hat sich im vergangenen Jahr auch leicht vergrößert. Tobias Mänz und Gökan Arslan haben das Institut verlassen. Lucy Kasüsckke, Florian Mörz, Dennis Kaczmarek, Michael Sikora sind neu dazugekommen. Die Auszubildenden Lucien Steinbeißer (IT) sowie Niklas Gottschlich (Mechanische Werkstatt) haben ihre Berufsausbildung begonnen.

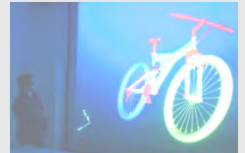
Wir wünschen Ihnen auch im Namen aller Mitarbeiter ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes und erfolgreiches Jahr 2016.



Konstruktion und Berechnung von  
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und  
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik  
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte



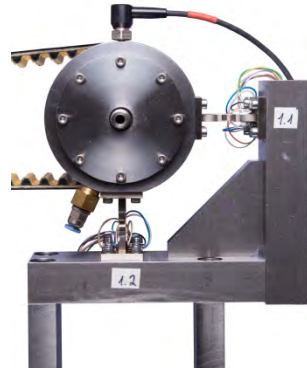




## Berechnung der Lastverteilung in radial belasteten Klemmrollenfreiläufen

Martinewski, V.

Zur drehrichtungsabhängigen Drehmomentübertragung werden Freiläufe verwendet. Im industriellen Bereich werden vorwiegend reibschlüssige Freiläufe eingesetzt, welche über das Verkeilen des Klemmkörpers bzw. der Klemmrolle zwischen An- und Abtrieb Umfangskräfte erzeugen, welche in einem Drehmoment resultieren. Um die Lebensdauer nicht zu beeinflussen, sollte dieses Maschinenelement frei von Zusatzlasten montiert werden, wodurch jeder Klemmkontakt die gleiche Belastung erfährt. In speziellen Anwendungsfällen lässt sich ein zusatzlastfreier Einbau nicht gewährleisten, sodass es zum Beispiel zu einer radialen Belastung des Freilaufs zusätzlich zur Klemmnormalkraft kommt. Dadurch, dass Klemmrollenfreiläufe in Ihrer Bauform den Zylinderrollenlagern ähneln, werden Formeln aus dem Wälzlagerbereich herangezogen, um auf die Lastverteilung im Freilauf zu schließen.



In the industrial sector, mainly friction freewheels are used for direction-dependent torque transmission. The torque results from the wedging of the roller between the inner and the outer ring. In order not to affect the lifetime, this machine element should be mounted without additional loads, whereby each contact undergoes the same load. In special cases load-free installation cannot be guaranteed, so additional loads such as a radial load lead to an increase of the normal forces. Because roller freewheels are similar to the cylindrical roller bearings, the formulas from the rolling contact bearings are used to calculate the load distribution in freewheels.

## Bestimmung der wirkenden Ausgangsnormalkraft

Bevor mit der Berechnung der Radiallastverteilung im Freilauf begonnen werden kann, ist zunächst die Ausgangsnormalkraft im Klemmkontakt je Rolle zu bestimmen, welche aus folgender Formel resultiert. /1/

$$F_N = \frac{2 \cdot M_T}{z \cdot d_a \cdot \tan(\alpha)} \quad 1$$

Abhängig des Klemmwinkels  $\alpha$  der Rollenanzahl  $z$ , und dem Klemmkontakt-  
außendurchmesser  $d_a$  kann für jedes Drehmoment  $M_T$  die Normalkraft bestimmt  
werden, welche auf eine Rolle wirkt. Die Berechnung dieser Kräfte für den  
exemplarisch verwendeten Freilauf ist in Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Drehmomentabhängige Normalkraft im Klemmkontakt für einen  
Beispielfreilauf ( $\alpha = 3,98$ ,  $d_a = 38$ ,  $z = 21$ ). /2/*

<b>Drehmoment [Nm]</b>	<b>Berechnete Normalkraft [N]</b>	<b>Simulierte Normalkraft [N] (iaf-mt Kassel)</b>
60	2600	2560
80	3020	3069
100	3774	3833
120	4529	4569
140	5284	5332
160	6039	6095
180	6794	6824

Für diesen Freilauf wurden am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik der  
Universität Kassel, Fachbereich Maschinenelemente und Tribologie (iaf-mt), FEM-  
Simulationen durchgeführt, sodass die Normalkräfte für den dargestellten  
Momentbereich vorliegen und zu Vergleichszwecken herangezogen werden  
können. Werden die berechneten und simulierten Werte verglichen, so ist  
ersichtlich, dass lediglich eine Abweichung von ca. 5% besteht. Die Verwendung  
der Formel 1 ist somit für die Bestimmung der Ausgangsnormalkraft geeignet. Um  
auch die auftretenden Normalkräfte bei radialer Zusatzlast vergleichen zu können,  
wird für die analytische Berechnung die gleiche Ausgangsnormalkraft in Höhe von  
2520 N angenommen, wie Sie auch in der Simulation gewählt wurde.

### Durchführung der Lastverteilungsberechnung

Klemmrollenfreiläufe ähneln in ihrer Bauform und Rollenordnung Zylinderrollenlagern. Für diese Lager gibt es bereits Formeln zur Berechnung der Lastverteilung abhängig einer radialen Last. Die Maximalkraft  $Q_{\max}$  des Druckberges kann mit der Radialkraft  $F_R$  und der Rollenanzahl  $z$  mit folgender Formel abgeschätzt werden. /3/

$$Q_{\max} = 4,06 \cdot F_R / z \tag{2}$$

Setzt man diesen Wert der Maximalkraft in die Formel 3 ein, so kann die Kraft eines Kontaktes für jeden beliebigen Winkel  $\psi$  zur Krafteinleitungsrichtung bestimmt werden. /4/

$$Q_{\psi} = Q_{\max} \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} (1 - \cos \psi)\right]^n \tag{3}$$

Der Wert für den Exponenten  $n$  beträgt hierbei für Rollenlager  $10/9$  ( $\approx 1,11$ ). Der Lastverteilungsfaktor  $\varepsilon$  wird nach Formel 4 berechnet.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P_d}{2 \cdot \delta_r}\right) \tag{4}$$

$P_d$  beschreibt hierbei das Radialspiel und  $\delta_r$  die Auslenkung des Innenrings zum Außenring bei Belastung. Da im Fall der Freiläufe von einem Radialspiel von null ausgegangen werden kann, beträgt der Lastverteilungsfaktor damit 0,5. Mit der Formel 3 wird nun die Lastverteilung für einen Freilauf mit 21, 14 und 7 Rollen mit Zusatzlasten von 1250 und 5000 N berechnet. Die wirkende Normalkraft an den Kontaktstellen durch die Drehmomentbelastung wird zu der positionsabhängigen Last addiert. Die Anordnung der Rollen bei der Rollenanzahlvariation ist in Abbildung 1 dargestellt.

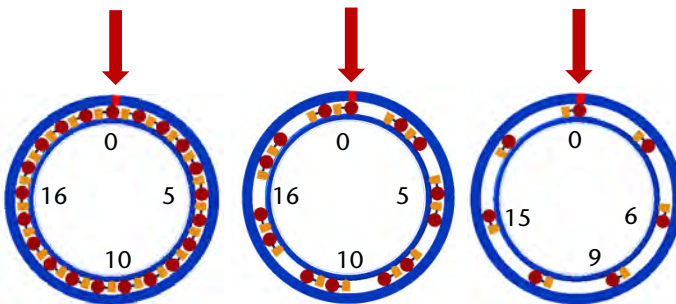


Abbildung 1: Darstellung der verglichenen Rollenanordnungen

Für das Modell mit 21 Rollen entsteht die in Abbildung 2 dargestellte Lastverteilung. Für eine Zusatzlast von 1250 N beträgt die Abweichung der am iaf simulierten Werte zu der hier dargestellten Berechnung weniger als 2,1%; für 5000 N 4,0%. Eine Belastung des 21-Rollen-Freilaufs mit einer Last in Höhe der doppelten Ausgangsnormalkraft führt an der höchstbelasteten Stelle zu einer Lasterhöhung von ca. 38% und einer entsprechenden Entlastung auf der gegenüberliegenden Seite.

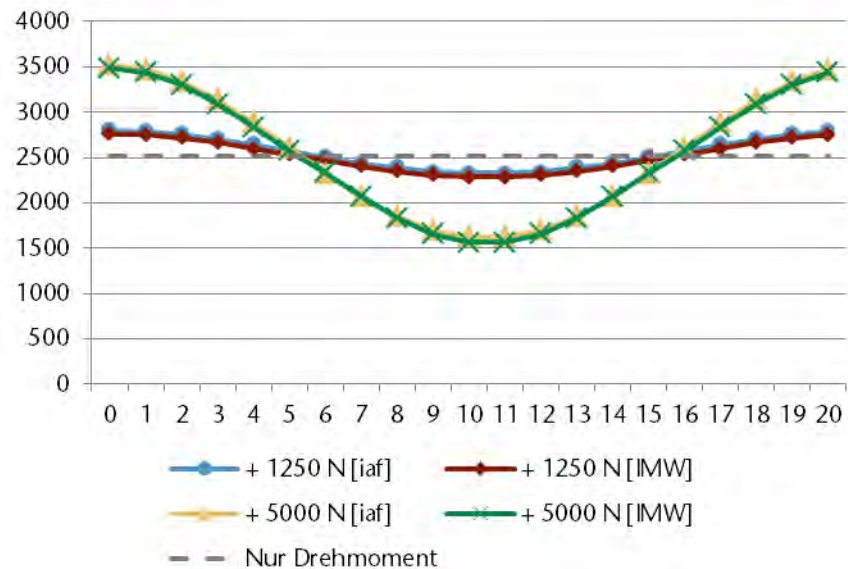


Abbildung 2: Lastverteilung als Normalkraft am Innenring in N für 21 Rollen /2/

Das Berechnungsmodell für den 14-Rollen-Freilauf hat keine symmetrische Rollenordnung, da lediglich aus dem bereits bestehenden Modell Rollen entfernt wurden. Zum Zweck des Abgleichs der Simulation mit der analytischen Berechnung wurde darauf verzichtet, eigens ein neues Modell für 14 Rollen zu erstellen. Um den Verlauf über dem gesamten Freilauf zu verdeutlichen, sind die nicht durch Rollen besetzten Werte aus den benachbarten Werten interpoliert worden. Wie auch dieser Abbildung zu entnehmen ist, ähneln die errechneten Werte den Simulierten. Bei einer Belastung von 5000 N liegt die Zusatzbelastung bzw. Entlastung bei ca. 58%. Die größte Abweichung von Simulation zur Berechnung liegt wie auch beim Modell mit 21 Rollen auf der entlasteten Seite und beträgt für diesen Fall 2,5% bei einer Last von 1250 N bzw. 6,6% bei 5000 N.

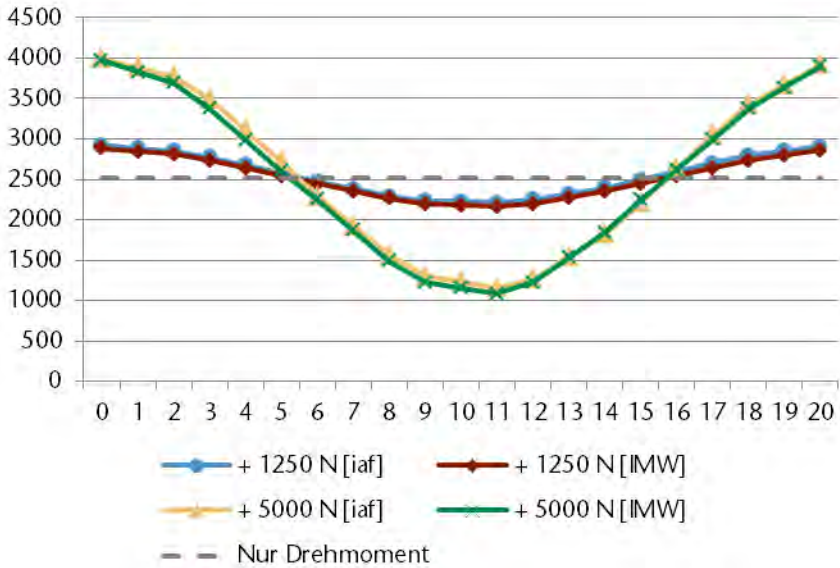


Abbildung 3: Lastvert. als Normalkraft am Innenring in N für 14 Rollen /2/

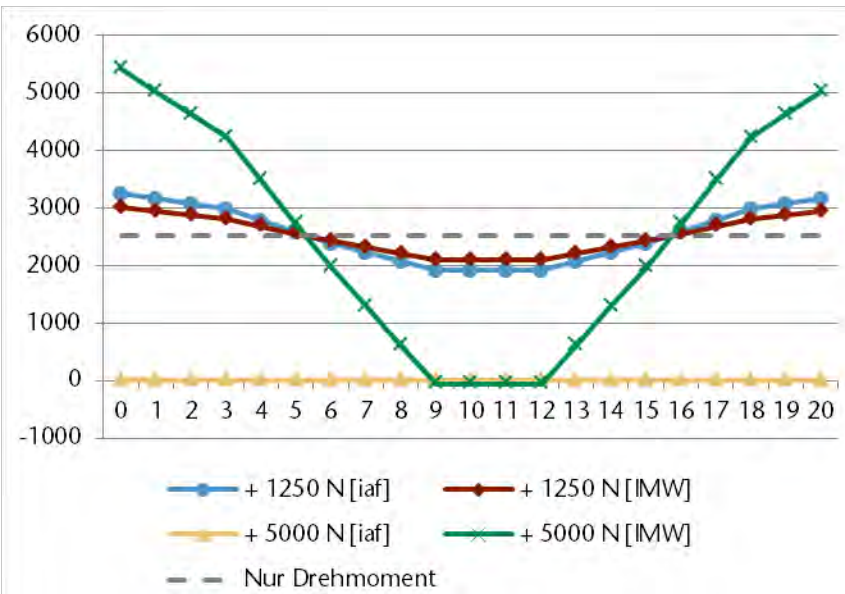


Abbildung 4: Lastvert. als Normalkraft am Innenring in N für 7 Rollen /2/

Abbildung 4 stellt die Lastverteilung für ein Modell mit 7 Rollen dar. Ein Vergleich der Lastverteilung bei einer radialen Zusatzlast von 5000 N ist nicht möglich, da hier die Simulation nicht konvergieren konnte. Grund hierfür ist der Kontaktverlust der entlasteten Rollen. Die vollständige Entlastung ist auch im analytischen Weg an den Rollen 9 bis 12 zu sehen, hier beträgt die errechnete Normalkraft 0 N. Die Abweichung für eine Belastung mit 1250 N beträgt ca. 8,6%. Wird der hier nicht dargestellte Fall einer Belastung von 2500 N betrachtet, so resultiert hier eine Abweichung von nur 4,3%.

## Zusammenfassung

Die dargestellten Berechnungen und Vergleiche mit Simulationen zeigen, dass zur ersten Abschätzung der Lastverteilung eines radial belasteten Klemmrollenfreilaufs die aus der Literatur für Zylinderrollenlager stammenden Formeln gut geeignet sind. Nach Bestimmung der Ausgangsnormalkraft kann abhängig der Rollenanzahl und der Höhe der radialen Zusatzlast, die auf die einzelne Rolle wirkende Normalkraft bestimmt werden. Hier hat sich gezeigt, dass mit steigender Rollenanzahl und damit sinkender Belastung, die Abweichung zwischen analytischer Berechnung und der Simulation geringer wird. Radial belastete Freiläufe sollten für eine gleichmäßigere Verteilung der Zusatzlast eine möglichst hohe Rollenanzahl aufweisen, wodurch die Einzelkontaktbelastung reduziert und damit die Gesamtlebensdauer des Freilaufs erhöht wird.

Der Einfluss der Radiallast und der damit einhergehenden Lastverteilung auf die Lebensdauer eines Freilaufs wird anhand eines eigens konstruierten Doppelprüfstands im Rahmen des Forschungsvorhabens 694 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik analysiert.

## Literatur

- /1/ Stölzle, Hart: Freilaufkupplungen – Berechnung und Konstruktion; 1. Auflage; Springer; 1961.
- /2/ Martinewski, Qian.: Sachstandsbericht zum FVA-Projekt 694 Freilauf kombinierte Lasten; TU Clausthal, Uni Kassel; 2015.
- /3/ Bändlein, Eschmann, Hasbargen, Weigand: Die Wälzlagerpraxis – Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen; 3. Auflage; Vereinigte Fachverlage GmbH; 2002.
- /4/ Harris, T.A.: Essential Concepts of Bearing Technology; 5. Auflage; Taylor & Francis Group; 2007.

## Innovatives Wickelsystem für Faserseile

Schulze, M.; Wächter M.



*Aufgrund von Vorteilen von Faser- gegenüber Drahtseilen wie reduziertes Längengewicht, Korrosionsbeständigkeit und Umweltschonung kommen diese in der Praxis verstärkt zum Einsatz. Ziel des durch die AiF geförderten Projektes /1/ war es, dem Problem des Fehlens von Einsatzrichtlinien und Dimensionierungsgrundlagen zu begegnen. Dazu wurden Versuche zu Seileigenschaften und Eigenschaften im Zusammenspiel Seil – Trommel durchgeführt. Weiterhin gab es Wickelversuche zur Ermittlung der Beanspruchung der Trommel und zur Beurteilung der Wickelqualität. Abschließend wurde auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse eine angepasste Trommelkonstruktion entwickelt.*

*The use of high-strength fibre ropes in practice increases lately, due to their reduced length mass, resistance against corrosion and their environmental compatibility compared to wire ropes. The aim of the project funded by the AiF /1/ was to develop adequate application directives and dimensioning basics. Therefore experiments were carried out to examine rope characteristics and interactions between rope and drum. Furthermore winding tests were performed to evaluate the drum load and the winding pack. Based on these results an optimized drum construction was developed.*

### Einleitung

Das Faserseil bietet aufgrund seiner im Vergleich zum Drahtseil anderen Eigenschaften Potentiale in der Fördertechnik. Dazu zählen das geringere Längengewicht und damit eine einfachere Handhabung. Auf der anderen Seite ergeben sich z.B. durch den weichen Aufbau der Faserseile auch Herausforderungen an die Spulbarkeit.

Ziel des durch die AiF geförderten Verbundprojektes „Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern“ war es, in Zusammenarbeit mit den Partnern Lippmann German Ropes, CL Maschinenbau, tul-tec, Kleinholz-Ruhrort, Hatlapa und der Professur Fördertechnik der TU Chemnitz die Potentiale der Faserseile auch in der Mehrlagenwicklung nutzbar zu machen. Das Institut für Maschinenwesen (IMW) hat dabei das Teilprojekt: „Gestaltung und Dimensionierung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln mit Seilen aus Hochleistungs-Synthesefasern“ bearbeitet. Hier ging es zum einen darum, eine sicherheits-



gerechte Trommelauslegung auf Grundlage von zu ermittelnden Seileigenschaften zu gewährleisten. Zum anderen ging es darum, ein geordnetes Wickelbild sicherzustellen, um eine zufriedenstellende Seillebensdauer zu ermöglichen.

## Durchgeführte Versuche

Im Rahmen des Projektes wurden Versuche zu wichtigen Kennwerten des Seils wie Querelastizität, Haftreibwert und Spulverhalten durchgeführt. Dabei wurde bei allen Versuchen sichergestellt, dass realitätsnahe Verhältnisse im Zusammenspiel zwischen Seil und Trommel gegeben waren. In Bezug auf die Querelastizität wird das Verhältnis von Trommeldurchmesser (D) zu Seildurchmesser (d), das D/d Verhältnis, im Folgenden durch das Spannungsverhältnis  $k_q$  (Formel 1) beschrieben, berücksichtigt. Für den Haftreibwert findet ebenfalls das D/d Verhältnis und damit das Verhältnis aus Längs- und Querkraft bzw. –spannung Berücksichtigung. Zudem werden die unterschiedlichen Kontaktsituationen Seil – Seiltrommel und Seil – Seil in den Reibwertversuchen abgebildet. Die Spulversuche bilden schon durch den Versuchsaufbau an sich das Zusammenspiel Seil – Trommel ab. Zudem wurden in diesem Bereich verschiedene Trommelvarianten eingesetzt, um den Ist-Zustand des mehrlagigen Spulens von Faserseilen abzubilden.

## Untersuchung der Querelastizität

Wie schon erwähnt ist es für die Ermittlung der Querelastizität wichtig, realitätsnahe Versuchsbedingungen in Form einer Längskraft im Seil sicherzustellen /2/. Dies spiegelt sich im Spannungsverhältnis wieder:

$$k_Q = \frac{\sigma_{quer}}{\sigma_{längs}} = 0,04...0,06 \quad [-] \quad 1$$

Da das  $k_Q$  unter Vereinfachungen dem Kehrwert des D/d Verhältnisses entspricht, kann so die Querelastizität entsprechend des Einsatzfalls ermittelt werden.

Am Querelastizitätsprüfstand des IMW wird zuerst eine Längskraft auf das Seil aufgebracht und beibehalten. Die Längskraft wird in Abhängigkeit von der Mindestbruchlast (MBL) des Seiles gewählt. Anschließend wird das Seil mit Hilfe eines Hydraulikzylinders mit der Querkraft beaufschlagt (Abbildung 1 links). Aus der Messung von Querkraft und Verformungsweg kann anschließend die Querelastizität ermittelt werden (Abbildung 1 rechts).

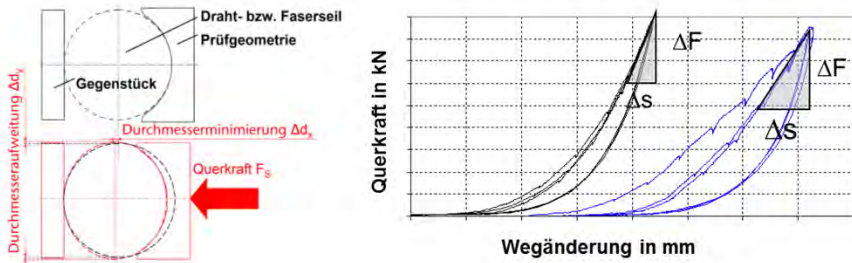


Abbildung 1: Querelastizitätsmessung von Seilen im Querschnitt (links) Ergebnis der Messung (rechts)

Unter anderem wurden vergleichende Versuche mit unterschiedlichen Fasermaterialien durchgeführt. Dazu wurden 12-litzige Rundgeflechte (Kreuzschlag ohne Mantel) aus den Materialien Dyneema® SK75, Vectran® T150 und Technora® T221 mit einem Durchmesser von 12 mm untersucht. In Abbildung 2 sind Ergebnisse für ein konstantes  $D/d$  Verhältnis (konstantes  $k_Q = 0,1$ ) unter Variation des Längskraftfaktors  $k_L$  dargestellt.

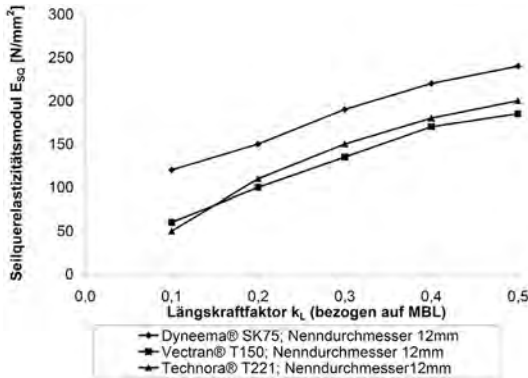


Abbildung 2: Querelastizitäten  $E_{SQ}$  für unterschiedliche Fasermaterialien in Abhängigkeit des Längskraftfaktors  $k_L$  bei konstantem  $k_Q = 0,1$ , Seildurchmesser 12 mm

Es zeigt sich eine in der Regel festzustellende Abhängigkeit der Querelastizität von der Seillängskraft. Bei allen drei Materialvarianten steigt bei zunehmender Seilkraft die Quersteifigkeit des Seils. Im Vergleich der unterschiedlichen Materialien weist das Seil aus Dyneema® SK75 eine höhere Quersteifigkeit zu den beiden anderen Materialien auf. Die Seile aus Vectran® T150 und Technora® T221 zeigen sehr ähnliche Seilquerelastizitäten.

Im Vergleich zu einem Drahtseil mit gleichem Nenndurchmesser zeigen die untersuchten Faserseile eine deutlich geringere Quersteifigkeit ( $E_{SQ-Faserseil} \approx 0,1 \cdot E_{SQ-Drahtseil}$ ). Diese Eigenschaft der Faserseile konnte als ein Grund für die schlechte Spulbarkeit der Faserseile in den Spulversuchen identifiziert werden. Bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen wie z.B. Spulgeschwindigkeit und Seilkraft konnten keine guten Wickelergebnisse beim Einsatz einer Trommel für Stahlseile erzielt werden.

### Ermittlung der Seilreibwerte

Um das System aus Seil und Seiltrommel vollständig abbilden zu können, ist sowohl die Kontaktsituation zwischen den einzelnen Umschlingungen des Seils innerhalb des Wickelpaketes als auch die Kontaktsituation zwischen Seil und Seiltrommel von Interesse (Abbildung 3 und Abbildung 4).

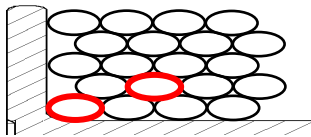


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Kontaktsituation Seil - Bordscheibe bzw. Mantel und der Kontaktsituation Seil - Seil

Mit Hilfe eines ebenen Versuches wurden beide Kontaktfälle nachgebildet (Abbildung 4 Mitte und rechts). Der Prüfstand ist dazu so ausgelegt, dass die Kraftverhältnisse am Seil entsprechend Formel 1 realitätsnah abgebildet werden können.

Bezüglich der Mehrlagenwicklung hat vor allem der Haftreibwert zwischen Trommel und Seil einen wesentlichen Einfluss auf die Belastung der Bordscheiben. Eine Veränderung des Haftreibkoeffizienten im Bereich von 0,1...0,2 kann je nach Trommelgeometrie zu einer Erhöhung der Bordscheibenlasten von 10...20% führen.

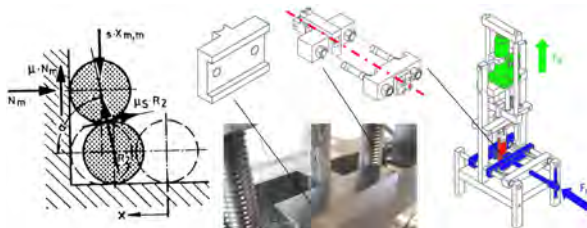


Abbildung 4: Kontaktbereiche nach /2/ (links), ebener Versuch zur Reibwertermittlung (Mitte und rechts)

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Versuche mit verschiedenen Faserwerkstoffen, Seilbeschichtungen, verschiedenen Werkstoffen des Gegenkörpers bzw. unterschiedlichen Beschichtungen und unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wie beispielsweise mit einem feuchten Seil durchgeführt.

Exemplarisch sollen an dieser Stelle die Ergebnisse mit den unterschiedlichen Kontaktsituationen Seil – Seiltrommel und Seil – Seil dargestellt werden (Abbildung 5). Weiterhin sind Unterschiede in den Einsatzbedingungen zu finden. Der Haftreibwert ist in Abhängigkeit der Seilkraft (FL) bezogen auf die Mindestbruchkraft (MBK) und die Querkraft (kq) dargestellt. Es zeigt sich die Tendenz, dass mit einem größeren Wert für  $k_q$  und somit einem kleineren  $D/d$  Verhältnis ein niedrigerer Haftreibwert einhergeht. Ebenfalls stellt sich ein kleinerer Reibwert ein, wenn die Seilkraft erhöht wird. Neben dieser Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen tritt zudem ein kleinerer Haftreibwert im Kontaktfall Seil – Seil im Vergleich zur Berührung zwischen Seil und Seiltrommel ein.

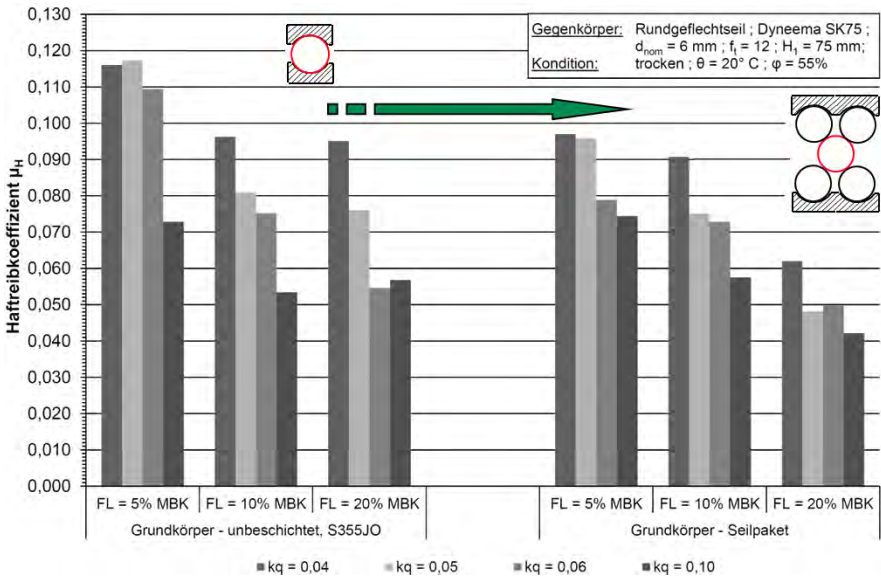


Abbildung 5: Haftreibkoeffizienten Seil – Rille und Seil – Seil

### Spulversuche

Die Spulversuche wurden unter zwei verschiedenen Aspekten durchgeführt. Zum einen stand die Belastung der Trommel im Fokus. Dazu wurden vergleichende Versuche mit unterschiedlichen Trommelvarianten sowie mit Draht- und Faserseil durchgeführt. Zum anderen wurden die Verformung des Faserseils und die daraus

resultierende Veränderung des Lagenaufbaus untersucht. Ausgehend davon wurde die Trommelkonstruktion auf die Seileigenschaften abgestimmt.

Die vergleichenden Spulversuche wurden mit Seilen mit einem Nenndurchmesser von 14 mm und vergleichbaren Mindestbruchkräften durchgeführt. Dazu wurden 5 Lagen mit ca. 14% der Mindestbruchkraft auf die Trommel gespult. Die verschiedenen Versuchsaufbauten sind in Abbildung 6 zu sehen.



Abbildung 6: Trommel mit Lebus® Rillung für Drahtseil mit Faserseilbewicklung (Versuch I a), glatte Trommel mit Faserseil (Versuch I b) und Trommel mit Lebus® Rillung mit Drahtseil (Versuch II)

Im Vergleich der Trommelbelastungen zwischen Draht- und Faserseilbewicklung konnten geringere Belastungen durch das Faserseil feststellte werden. Allerdings war entgegen der Erwartung auf Grundlage des theoretischen Modells in Folge der verminderten Quersteifigkeit die eintretende Verringerung der Belastung weniger stark als erwartet. Es konnte damit eine Abweichung zwischen dem theoretischen Modell und dem Versuch festgestellt werden. Im Bereich der Bordscheiben konnte jedoch die erwartete höhere Belastung gezeigt werden.

Die Abweichung in den Ergebnissen zwischen theoretischem Modell und den Versuchen ist in den im Vergleich zu Drahtseil anderen Eigenschaften des Faserseils zu suchen. Neben den zuvor beschriebenen Eigenschaften Querelastizität und Reibung, konnte ein weiterer wichtiger Parameter mit der Seilverformung identifiziert werden. Bei den untersuchten Seilen zeigte sich diese in einer annähernd ovalen Form. Diese Ovalisierung des Seiles kann durch das Verhältnis der Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Einzeldurchmesser zum größten Durchmesser des Seils beschrieben werden (Formel 2):

$$O_{rel} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{max}} \quad [-] \quad 2$$

Bei den drei genannten Versuchsanordnungen wurde die relative Ovalität der Seile erfasst (Abbildung 7). Beim Drahtseil (Versuch II) zeigte sich dabei eine sehr geringe Ovalität. Das Drahtseil bleibt also nahezu rund. Das Faserseil wird hingegen deutlich oval. Dieser Effekt ist bei der glatten Trommel (Versuch I b) deutlich stärker als bei der Trommel mit Rillung für Drahtseile (Versuch I a) und

zeigt sich besonders ausgeprägt in der 1. Lage. Dies ist durch die unterstützende Wirkung der Rillung zu erklären.

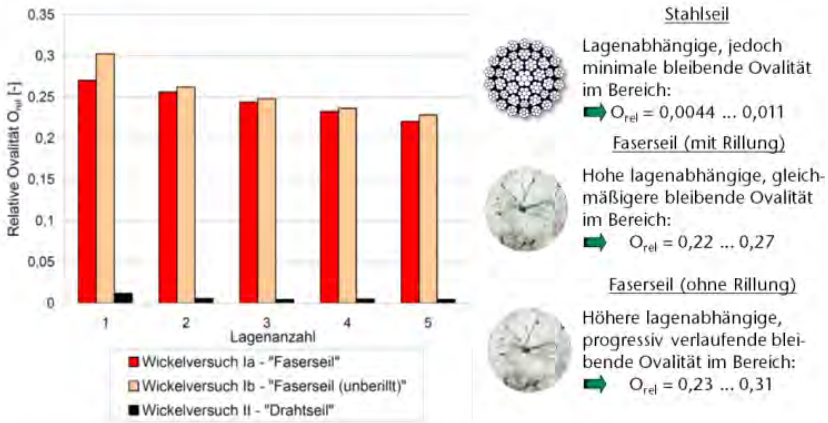


Abbildung 7: Relative Ovalität von Draht- und Faserseil

In direktem Zusammenhang steht die Ovalisierung des Seils mit dem Lagenaufbau. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, hat die Verformung des Faserseils ein deutlich flacheres Wickelpaket im Vergleich zum Drahtseil zur Folge.

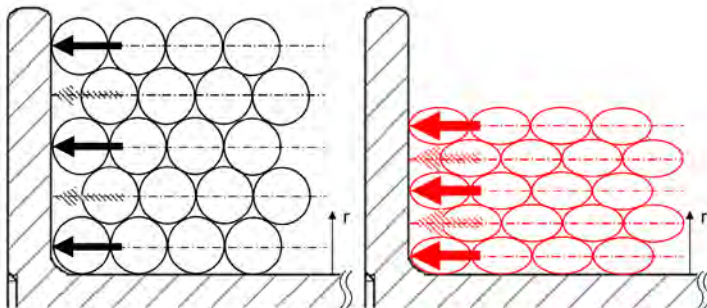


Abbildung 8: Seilpaket Drahtseil (links) und Faserseil (rechts)

Eine wichtige Erkenntnis, die aus den Versuchen zur Ovalität bzw. dem Lagenaufbau gewonnen werden konnte, ist, dass beide Kennwerte nach relativ wenigen Wickelzyklen einem Grenzwert zustreben (Abbildung 9). Während bei der ersten Bewicklung mit einem neuen Faserseil sich noch ein relativ großer Wickelradius (gemessen zur Trommeloberfläche) einstellt, nimmt dieser rasch ab. Ab dem ca. 5. Wickelzyklus kann von einer gleichbleibenden Wickelhöhe gesprochen werden.

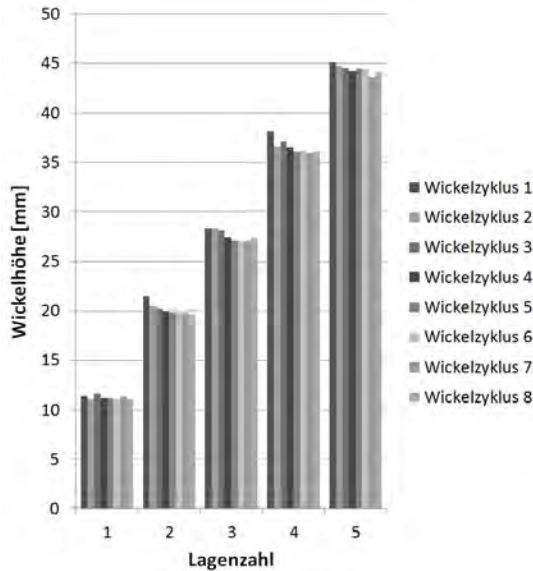


Abbildung 9: Abhängigkeit der Wickelhöhe von der Lage, Veränderung mit der Anzahl der Wickelzyklen

Diese Erkenntnis ist von Bedeutung, da es mit gleichbleibenden Seilquerschnitt und Lagenaufbau möglich wird, die Geometrie der Seiltrommel im Bereich des Trommelmantels (Rillungsquerschnitt) und der Bordscheiben (Auffüllgeometrie) optimal an das Seil anzupassen (vgl. Kapitel *Optimierte Trommelgeometrie*).

### Optimierte Trommelgeometrie

Die Notwendigkeit der Anpassung der Trommelgeometrie zeigt sich durch die Unregelmäßigkeiten im Wickelbild bei der Nutzung der Trommel mit gängiger Rillung (Versuch I a) (Abbildung 10).



Abbildung 10: Unregelmäßigkeiten im Wickelbild des Faserseils auf einer Trommel für Drahtseile

Als erste Anpassung wurde die Rillung auf die Ovalisierung des Seils abgestimmt. Diese stützt das Seil nun und zwingt es nicht in eine weitere Verformung, die der Ovalisierung zum Teil entgegenwirken würde.

Zudem wurden die Bordscheiben um Auffüllkeile im Parallelbereich ergänzt (Abbildung 11 links und Mitte). Diese füllen die Lücke zwischen den einzelnen Umschlingungen und der Bordscheibe, die an bestimmten Stellen unvermeidbar sind (Abbildung 11 rechts). Die Notwendigkeit dieser Auffüllkeile ergibt sich aus der geringeren Formstabilität der Faserseile. Die oberen Umschlingungen würden anderenfalls in die vorhandenen Lücken gleiten und zu Unregelmäßigkeiten im Wickelbild führen.

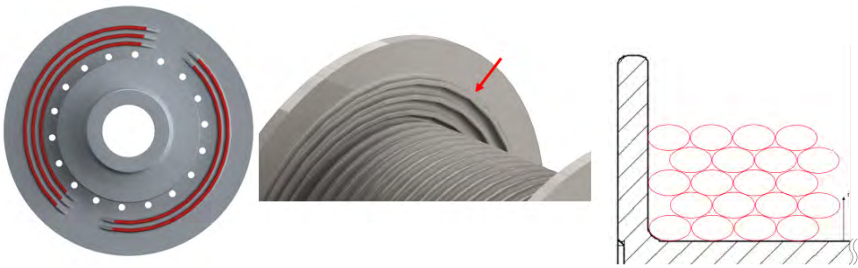


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung von Auffüllkeilen an Bordscheiben zur Unterstützung des Wickelpakets (links und Mitte), Schnitt durch das Wickelpaket im Parallelbereich (rechts),

Da durch die Lebus® Rillung ein definierter Kreuzungsbereich gewährleistet wird, müssen die Auffüllkeile in diesem Bereich ein- bzw. ausgeleitet werden. Dies geschieht durch die Ablenkeile (Abbildung 12). Durch sie wird das Seil gleichmäßig im Kreuzungsbereich geführt.

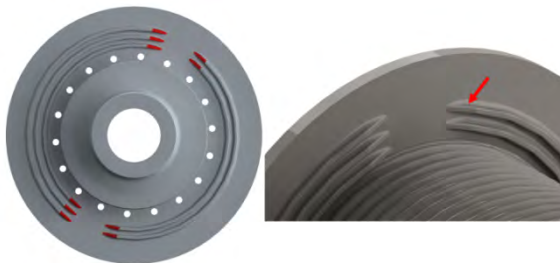


Abbildung 12: Exemplarische Darstellung notwendiger Übergangsgeometrien zwischen Parallel und Kreuzungsbereich



Durch die Stützwirkung, die durch die Veränderungen der Trommeloberfläche erzielt wird, kann ein sauberes Wickelbild gewährleistet werden (Abbildung 13). Die Schwierigkeit besteht allerdings in der Kenntnis bzw. der konstruktiven Umsetzung der genannten Parameter, um das gezeigte Wickelbild zu erzielen.

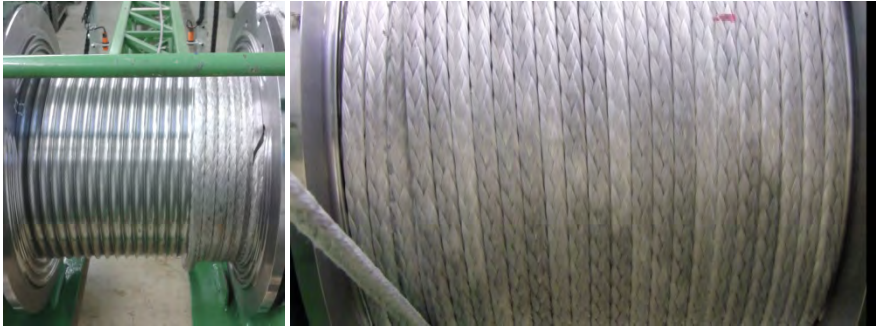


Abbildung 13: Optimierte Trommel (Versuch III), Ergebnis Wickelbild mit speziell für das Faserseil angepasster Oberflächengestaltung (vgl. Abbildung 10)

### Feldversuch Bergwerk Rammelsberg

Ergänzend zu den Versuchen auf dem Wickelprüfstand des IMW wurde im Rammelsberg Goslar (Forschungsbergwerk der TU Clausthal) ein Feldversuch durchgeführt. Dazu wurde an einem Versorgungsschacht mit einer Teufe von ca. 33 m eine bestehende pneumatisch angetriebene Winde (Abbildung 14) um die entwickelten Geometrien ergänzt. Mit Hilfe des Rapid Prototyping Verfahrens Fused Deposition Modelling wurden entsprechende Auflagen erstellt, die auf der Außenseite die Trommelabmessungen aufwiesen und auf der Innenseite die beschriebenen geometrischen Anpassungen (Abbildung 15 links).

Neben den Pumpen mit einer Masse von je ca. 400 kg befindet sich in dem Schacht ein Gewicht von 550 kg zum Zweck der TÜV-Abnahme. Mit diesem wurden die Wickelversuche durchgeführt (Abbildung 15 rechts). Somit wurde an dem bestehenden System ausschließlich die Trommeloberfläche verändert und das vorhandene Drahtseil durch ein 7 mm Faserseil ersetzt. Es ergaben sich folgende Versuchsbedingungen:

- 7 mm Dyneema® Faserseil,
- Seilzugkraft von 5,4 kN (ca. 10,5 % der MBK),
- Seilgeschwindigkeit ca. 19 m/min,
- D/d Verhältnis 26,4 entspricht  $k_q \approx 0,04$ .

Das Wickelbild beim Einsatz der optimierten Trommeloberfläche zeigte im Vergleich zur glatten Trommel ein deutlich besseres Ergebnis. Es konnte in weiten

Bereichen ein geordnetes Wickelergebnis erzielt werden. Da der Seiltrieb jedoch in weiten Bereichen unverändert zum Einsatz kam, stellte sich im Randbereich der einen Bordscheibe ein weniger gutes Wickelergebnis ein. Dies konnte jedoch auf den vorhandenen Schrägzug des Seiltriebs zurückgeführt werden.

Insgesamt konnte die Eignung des Systems Faserseil – Seiltrommel gezeigt werden. Es bleibt jedoch noch Forschungsbedarf im Bereich der Einsatzbedingungen z.B. geänderte Reibwerte infolge Feuchtigkeit oder Schmutz, Ablenkwinkel, etc., unter denen sich ein vollständig zufriedenstellendes Wickelergebnis erzielen lässt.



Abbildung 14: *Wartungsschacht im Rammelsberg Goslar (Forschungsbergwerk der TU Clausthal)*



Abbildung 15: *Seiltrommel mit faserseilspezifischen Anpassungen und Testgewicht im Schacht*

## Zusammenfassung

Im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojektes wurden zum einen wichtige Eingangswerte für die Auslegung von mehrlagig mit Faserseilen bewickelte Seiltrommeln ermittelt. Neben den im Vergleich zum Drahtseil andersartigen Eigenschaften der Querelastizität und der Haftreibung wurde vor allem der weitere Parameter der Ovalisierung untersucht. Er beeinflusst maßgeblich den Lagenaufbau und hat somit wesentlichen Einfluss auf die Trommelbelastung.

Zum anderen wurde eine Trommelgeometrie auf Grundlage der genauen Kenntnis der Seilgeometrie entwickelt. Mit Hilfe des Wickelprüfstandes des IMW und durch einen Feldversuch im Bergwerk konnte die Eignung der angepassten Trommelfeingeometrie gezeigt werden.

## Literatur

- /1/ Innovatives Wickelsystem für Seile aus Synthesefasern, Abschlussbericht zum durch die AiF geförderten Verbundprojekt, 2015, Förderkennzeichen VP2515317US1 \*)
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971

\*) Projektbearbeitung bis Oktober 2013 Dipl.-Ing. Konrad Stahr, Gustav Wolf Seil- und Drahtwerke GmbH

## Betrachtungen der Zahnfußausrundung von Passverzahnungen

Schäfer, G.

Die Norm für Passverzahnungen mit Evolventenflanken, DIN 5480 beschreibt in ihrem ersten Teil die Verzahnungsgeometrie. Dabei sind die Fußausrundungen, abhängig von den Herstellverfahren, mit unterschiedlichen Radien versehen. Für gefräste Wellen wird ein Radius von  $0,16 \cdot m$  genannt. Dies ist der kleinste Radius aller Herstellverfahren, was aber die höchste Kerbschärfe zur Folge hat. Der Artikel gibt Hinweise wie dieses kritische Geometriedetail modifiziert werden sollte.



The German standard for splines DIN 5480 describes the geometry of the spline including the foot root radius. The radius is given regarding the manufacturing technology. For milling, the radius is  $0,16 \cdot m$ , which is the smallest value of all manufacturing technologies which leads to the greatest notch factor. The following paper shows some ideas to improve this area of the spline and the numerical results.

### Einleitung

Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 /1/, die seit ca. 10 Jahren in der Normung „Passverzahnungen“ genannt werden, sind ein weitestgehend standardisiertes und an die Aufgabenstellung skalierbares Maschinenelement, in erster Linie für die Drehmomentübertragung. Die Standardisierung erlaubt in Verbindung mit kostengünstigen Herstellverfahren (Fräsen, Kaltumformen...) wirtschaftliche Lösungen sowohl in der Großserie, als auch im Sondermaschinenbau. Wie jedes Element, hat auch die Passverzahnung Ihre Grenzen, eine häufig durch Wellenbruch offenkundig werdende Stelle ist die Zahnfußausrundung und die darin auftretenden Beanspruchungen, siehe auch das Titelbild oben rechts. Das Bild stellt die genormte Zahnfußausrundung für eine spanend hergestellte Wellenverzahnung nach DIN 5480 dar.

Fußrundungsradius des Bezugsprofils	$\rho_{FP}$
$0,16 \cdot m$ Zerspanen	$0,54 \cdot m$ Kaltwalzen

Abbildung 1: Ausschnitt aus DIN 5480-1 /1/ mit der Definition des Fußrundungsradius in Abhängigkeit vom Herstellverfahren

Auffällig in der Normdefinition der Zahnfußausrundung, Abbildung 1, ist die Unterscheidung nach dem genutzten Herstellverfahren. Vergleichbare Normen, wie z.B. die ISO 4156, nennen ohne Bezug auf ein Herstellverfahren neben dem in DIN 5480 für spanende Herstellung definierten „flachen Fuß“ (flat root) auch die Variante der vollen Fußausrundung (fillet root), siehe Abbildung 2. Die in DIN 5480 für das Kaltwalzen angegebene Ausrundung mit  $0,54 \times \text{Modul}$  kommt der vollen Ausrundung der ISO 4156 schon sehr nah.



Abbildung 2: Die zwei Profile in ISO 4156 /2/, links: flat root, rechts: fillet root

Experimentelle Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten gefräster und kaltgewalzter Verzahnungen nach DIN 5480 weisen signifikante Festigkeitsvorteile der kaltgewalzten Verzahnungen aus. Bei solchen experimentellen Vergleichen muss aber beachtet werden, dass einerseits das Herstellverfahren gewechselt wird, mit dem Effekt der gezielten Erzeugung von Druckeigenspannungen im Zahnfuß beim Kaltwalzen, bei gleichzeitig nur minimal gestörtem Faserverlauf in der Bauteiloberfläche. Andererseits wird aber gemäß Abbildung 1 eine deutlich geänderte Fußgeometrie mit erheblich größerem Fußrundungsradius erzeugt, der grundsätzlich eine geringere Kerbwirkung und damit geringere Spannungsüberhöhung erwarten lässt. Die Frage, die sich an diesem Punkt stellt, ist: Welche Tragfähigkeitssteigerungen sind bei gefrästen Verzahnungen möglich, wenn man sich von der Definition nach DIN 5480 löst und den Fußrundungsradius vergrößert?

### Numerische Untersuchung des Fußausrundungsradius

Ausgehend von der Definition der spanend hergestellten Verzahnung mit  $\rho_{FP} = 0,16 \times \text{Modul}$  wurde der Rundungsradius in fünf Schritten bis zur vollen Fußausrundung mit  $0,6 \times \text{Modul}$  in numerischen Finite-Elemente-Analysen mit teilplastischem Werkstoffverhalten variiert. Der Kontakt zwischen den Wellen- und Naben Zahnflanken wurde dabei ebenfalls im Modell abgebildet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 in normierter Form dargestellt. Gut erkennbar ist der positive Einfluss des vergrößerten Kerbradius, der bis zum Minimum bei ca.  $0,48 \times \text{Modul}$  eine Spannungsreduzierung von 15% erlaubt. Zu beachten ist darüber hinaus aber, dass mit weiter steigendem Ausrundungsradius, hin zur vollen Verrundung,

die Beanspruchungen wieder leicht ansteigen. Dies lässt sich durch den immer tieferen Einstich der Fußausrundung in den Wellenquerschnitt erklären. Der tragende Nettoquerschnitt wird in diesen Fällen stärker reduziert, so dass die zunehmende Kerbentschärfung dies nicht mehr kompensieren kann.

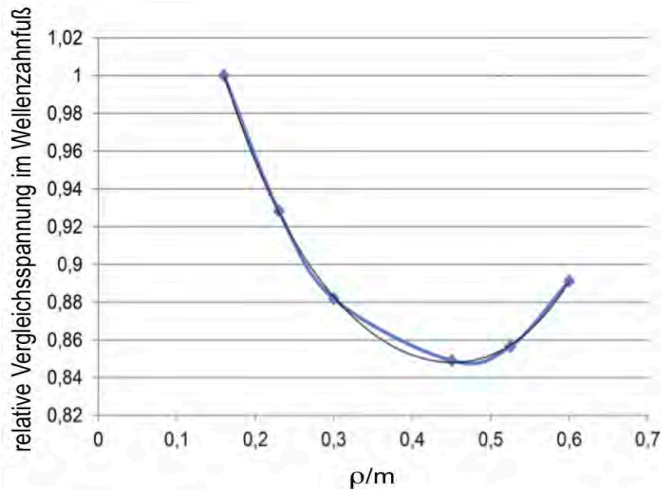


Abbildung 3: Spannungsverlauf im Wellenzahnfuß bei Variation des Rundungsradius  $\rho/P$  im Bereich von  $0,16 \times$  Modul bis zur vollen Fußausrundung mit  $0,6 \times$  Modul, normierte Darstellung mit dem Bezugswert  $\rho/P = 0,16 \times$  Modul

Als Ergebnis dieser ersten Zahnfußvariation, bezüglich des Rundungsradius, kann eine optimale Verrundung im Bereich zwischen  $0,45$  und  $0,5 \times$  Modul erkannt werden. Diese Untersuchungen wurden an Vollwellen durchgeführt. Die parallel dazu variierten Verrundungen im Nabenzahnfuß ergaben bei dickwandigen Naben kein ausgeprägtes Minimum, sondern die grundsätzliche Aussage, dass größere Zahnfußradien günstiger sind.

### Mögliche Variationen der Zahnfußausrundung

Aufbauend auf den ersten Ergebnissen zu den einfach verrundeten Zahnfußgeometrien in Anlehnung an ISO 4156 /2/ wurden von Herre /3/ unter der Anleitung des Autors numerische Untersuchungen mit elliptischen Zahnfußausrundungen durchgeführt. Die Idee dabei ist, die Nachteile der tief einschneidenden Vollausrundung durch den flacheren Verlauf in der Ausrundungsmitte zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurden die beiden Halbachsen der Ellipsen gemäß Abbildung 4 definiert. Es wurden sowohl flach liegende als auch senkrecht stehende Ellipsen in der Parameterstudie betrachtet.

Die Geometrievariation wurde so durchgeführt, dass eine vollständige Austauschbarkeit und Paarbarkeit mit den nach DIN 5480 gefertigten Gegenständen gewährleistet ist. Die Variationen betreffen nur den Bereich unterhalb des Wellen-Fußformkreisdurchmessers  $d_{FF1}$ .

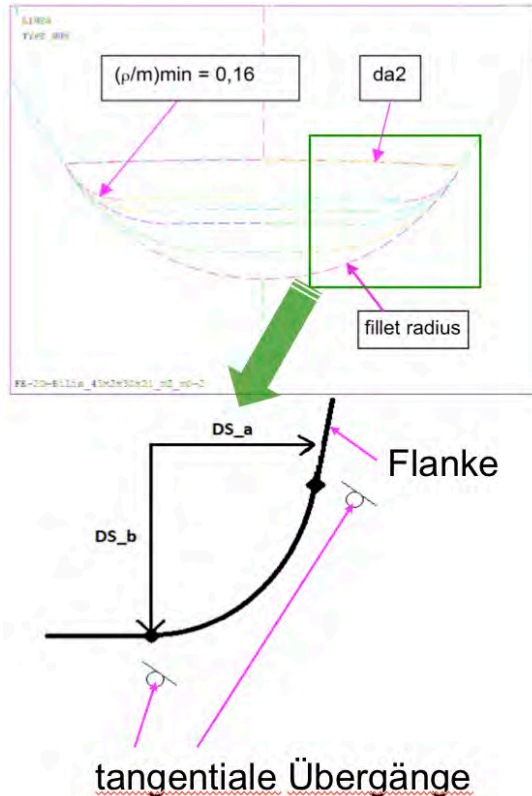


Abbildung 4: Oben: Fußrundungsvariationen mit einfachen Radien in Anlehnung an ISO 4156, unten: elliptische Verrundung des Zahnfuß mit dem tangentialen Übergang in die Flanke am Wellen-Fußformkreisdurchmesser  $d_{FF1}$

### Ergebnis der elliptischen Variationen

Die Ergebnisse der elliptischen Variationen wurden mit linearelastischen Finite-Elemente-Analysen berechnet. Der Kontakt zwischen den Wellen- und Nabenflanken wurde im Modell abgebildet. In Abbildung 5 ist jeweils für eine konstante Halbachse  $a$  die Halbachse  $b$  in fünf Schritten variiert worden, bevor

dann die Halbachse  $a$  eine Stufe vergrößert wurde. Über die blau markierten Punkte sind Fälle einfacher Verrundungen mit  $a = b$  hervorgehoben. Der erste blaue Punkt  $a = b = 0,16$  stellt den Referenzfall der spanend hergestellten Verrundung nach DIN 5480 /1/ dar.

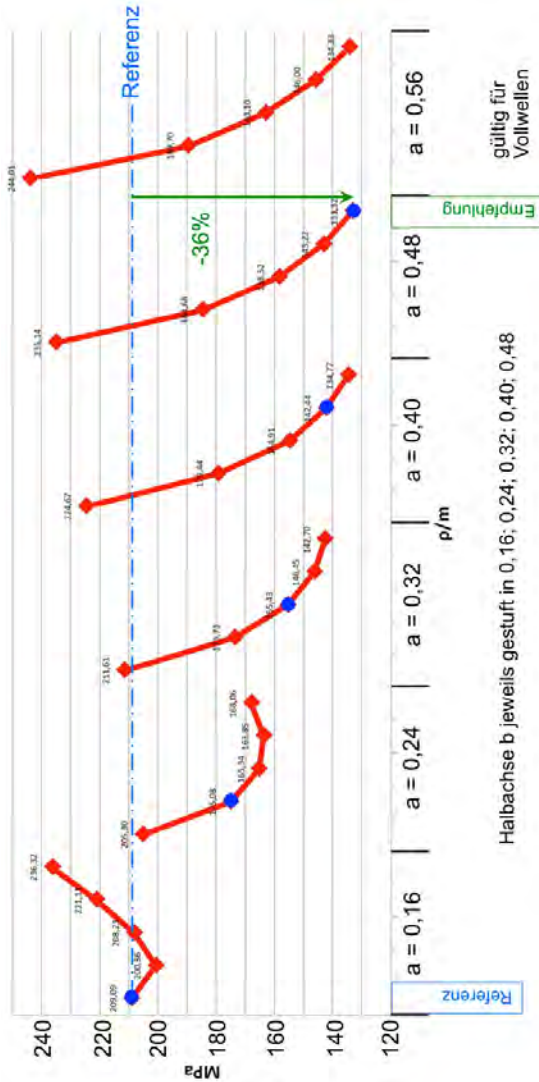


Abbildung 5: Maximal-Spannungen im Wellenzahnfuß bei elliptischer Verrundung



Abbildung 5 lässt oberhalb der Referenzlinie erkennen, dass durch ungeschickte Wahl der Halbachsen auch eine Verschlechterung der Beanspruchungssituation im Zahnfuß möglich ist. Darunter sind aber auch deutliche Beanspruchungsreduzierungen erkennbar, die mit der grün markierten Empfehlung bei  $a = b = 0,48 = \rho/m$  ein Minimum erreicht. Die weitere Vergrößerung liefert eine nahezu konstante Beanspruchungssituation (genau abgelesen steigen die Werte sogar um 1 bis 2 MPa, was aber im Rahmen der numerischen Genauigkeit liegt). Im Vergleich zu Abbildung 3 (15%) liefert das Optimum hier eine Reduzierung von 36%, was auf die unterschiedlichen Werkstoffdefinitionen (teilplastisch/linearelastisch) zurückzuführen ist. Als Ergebnis konnte in diesen ersten Untersuchungen zu elliptischen Ausrundungen noch kein echter Vorteil zur einfachen Verrundung herausgearbeitet werden. Dies liegt womöglich an den verwendeten Vollwellen. Aktuell laufende Untersuchungen behandeln daher das Verhalten von Hohlwellen mit den vorgenannten Verrundungs-Parametern.

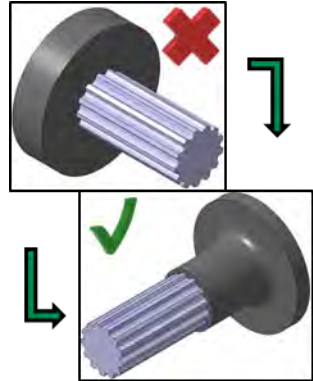
## Zusammenfassung

Die Untersuchungen zu möglichen Zahnfußverrundungen, bei vollständiger Kompatibilität zu Gegenstücken nach DIN 5480, haben ein sehr sinnvoll erscheinendes Ergebnis hervorgebracht. Die in der DIN 5480 herstellverfahren spezifische Definition der Fußrundung sollte unbedingt positiv kritisch betrachtet werden. Mit einer Vergrößerung der Fußausrundung, z.B.  $\rho_{fp} = 0,48 \times \text{Modul}$ , kann eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung erreicht werden. In diesem Sinne kann nur an die Werkzeughersteller appelliert werden solche Fräser in das Standardsortiment aufzunehmen, um auch mit gefrästen Wellen eine optimierte Tragfähigkeit zu erreichen.

## Literatur

- /1/ DIN 5480-1: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser, Teil 1: Grundlagen, Hrsg. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, März 2006
- /2/ ISO 4156: Straight cylindrical involute splines – Metric modul, side fit – Generalities, dimensions and inspection. International Standards Organization (ISO), 1989
- /3/ Herre, M.: Welle-Nabe-Verbindung mit optimierter Zahnfußgeometrie, Projektarbeit, IMW, TU Clausthal 2015, unveröffentlicht
- /4/ Herre, M.; Schäfer, G.; Wild, J.: Splined Shaft-Hub Connection with optimized Foot Geometry, Proceedings IN-TECH; Page 260 - 263, Dubrovnik 2015, ISSN 1849-0662

## Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480



Schäfer, G.; Wild, J.

Häufiges Ziel in der Praxis ist die Steigerung des zu übertragenden Torsionsmomentes bei gleichzeitig unverändert zu belassenden Bauraum. Hier werden bei den gegenwärtig oft verwendeten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] zur Verbindung von Wellen und Naben immer häufiger kerbwirkungsbedingt die Tragfähigkeitsgrenzen erreicht. Durch eine konstruktiv günstige Ausgestaltung ist die Kerbwirkung signifikant reduzierbar. Im Rahmen dieses Artikels werden numerische Ergebnisse dargelegt, die mit dem Ziel der Einflussbestimmung von Nabenwandstärke, Lastart sowie Nabenlänge auf die Tragfähigkeit der Verbindung durchgeführt wurden.

Very often the goal to increase the torque to be transferred without changing the space has to be met in practice. As a result the commonly used splined tooth shaft connection according to the [DIN 5480] to connect shafts and hubs more and more frequently reach the limit of the load capacity in due to the stress concentration. With an advantageous design the notch effect can be decreased significant. In this essay numerical results are given, which were done to determine the influence of the wall thickness of the hub, the kind of load and the length of the hub on the capability of the connection to carry load.

### 1 Einleitung

Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] war die Analyse von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] unter typischen Einsatzbedingungen. Hier galt es die in den Berechnungsrichtlinien wie beispielsweise der [DIN 743] und der [DIN 5466] gegebenen Möglichkeiten zur Abschätzung von Form- und Kerbwirkungszahlen zu überprüfen, zu präzisieren und insbesondere um weitere Einflussgrößen zu ergänzen. Das Forschungsvorhaben wurde in Kooperation von dem IMM der TU Dresden und dem IMW der TU Clausthal bearbeitet. Während in Dresden eine Vielzahl von numerischen Analysen durchgeführt wurde, erfolgten in Clausthal umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Die Ergebnisse der Experimente dienten dabei nicht nur zur Validierung der numerischen Resultate, sondern ebenfalls zur eigenständigen Einflussbestimmung von Parametern wie

beispielsweise Lastart, Verbindungsgröße, Sicherungsringnut, Auslauform, Nabenlage, Werkstoffzustand etc.

Wesentlicher Bestandteil der experimentellen Untersuchungen waren Versuche bei statischer Torsion sowie dynamischer Biegung in Kombination als praxisnahes Szenario. Ausgehend von einer Standardkonfiguration wurden Parameter zur Einflussbestimmung variiert. Unter anderem wurde der Einfluss der Nabenwandstärke in Stichversuchen experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass die Modifikation des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  bei unverändertem Bezugsdurchmesser  $d_b$  der Zahnwellenverbindung zu einem signifikanten Tragfähigkeitsanstieg führt, vgl. Abbildung 1.

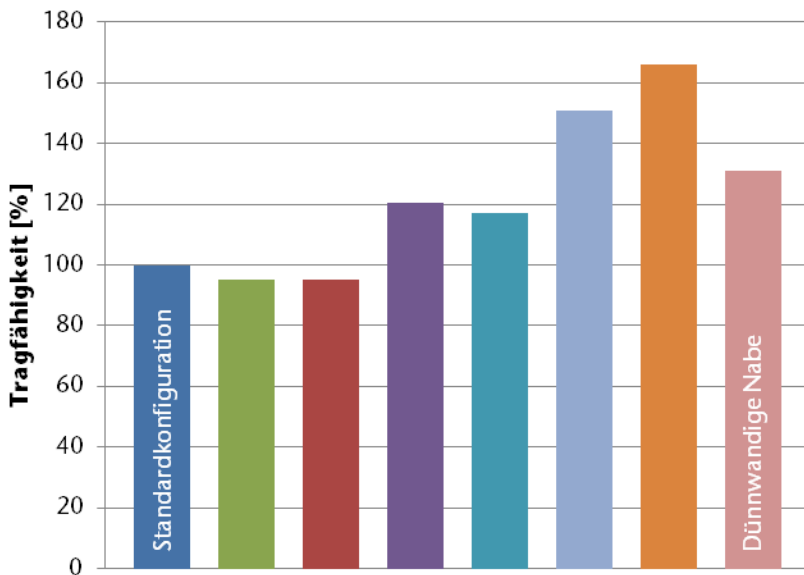


Abbildung 1: Experimentelle Einflussabschätzung (Dynamische Biegung sowie statische Torsion in Kombination ( $M_b / M_t = 0,2$ ), ZWV nach DIN 5480 - 25 x 1,75 x 13,  $R_b = -1$ )

Die Motivation zur Erarbeitung der im Rahmen dieses Artikels beschriebenen Arbeitsergebnisse lag darin, den experimentell bestimmten Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen numerisch nachzuweisen sowie die Kenntnisse zu diesem Sachverhalt durch eine Parameterstudie zu erweitern. Die Untersuchungen wurden durch [MONT 15-1] am IMW der TU Clausthal im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführt.

## 2 Numerische Untersuchungen zur Einflussbestimmung der Nabengeometrie

### 2.1 Definition der untersuchten Geometrie

Die nachfolgend dargestellten numerischen Ergebnisse wurden in Anlehnung an die in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] untersuchte Standardgeometrie einer Zahnwellenverbindungen mit der Bezeichnung DIN 5480 - 25 x 1,75 x 13 erarbeitet. Die in der Zahnwellenverbindungsbezeichnung enthaltenen Informationen (Eingriffswinkel  $\alpha = 30^\circ$ , Bezugsdurchmesser  $d_b = 25$  mm, Modul  $m = 1,75$  mm bzw. Zähnezahl  $z = 13$ ) blieben dabei unverändert. Die Art der Fertigung wurde ebenfalls beibehalten. Nach [DIN 5480] ist hierdurch die Zahnfußrundung des Bezugsprofils definiert, die in der Zahnfußrundung der Zahnwelle abgebildet wird. Als Fertigungsart wurde das Zerspanen zugrunde gelegt. Nach der [DIN 5480] berechnet sich die Zahnfußrundung folglich zu  $\rho_{fp} = 0,16 \cdot m = 0,28$  mm.

Durch die Wahl der gleichen Randbedingungen, die auch bei den experimentellen Untersuchungen der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] vorlagen, wurde erreicht, dass experimentelle Ergebnisse zur Validierung genutzt werden konnten. Des Weiteren war die Ergänzung der im Rahmen der zuvor genannten Forschungsprojekte gewonnenen Erkenntnisse, ohne weitere potentielle Einflüsse bei etwaigen Vergleichen beachten zu müssen, problemlos möglich.

Wesentlicher Inhalt der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] war die Analyse des Einflusses der Auslauform auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480]. Dieser Einfluss wurde bei den numerischen Untersuchungen, deren Ergebnisse im Rahmen dieses Artikels dargelegt sind, nicht betrachtet. Es wurde lediglich der verzahnte Bereich der Welle im Zusammenspiel mit der Nabe analysiert.

Bei den von [Mont15-1] am Institut für Maschinenwesen durchgeführten numerischen Untersuchungen zur Einflussbestimmung der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach der [DIN 5480] wurde der Abstand zwischen dem Lastangriffspunkt und der Nabenkante konstant gehalten. Er betrug das Zweifache des Bezugsdurchmessers  $d_b$ . Variiert wurden die Parameter

- Nabenaußendurchmesser  $d_{e2}$ ,
- Lastart sowie
- Nabenlänge  $l$

zur entsprechenden Einflussbestimmung, vgl. Abbildung 2.

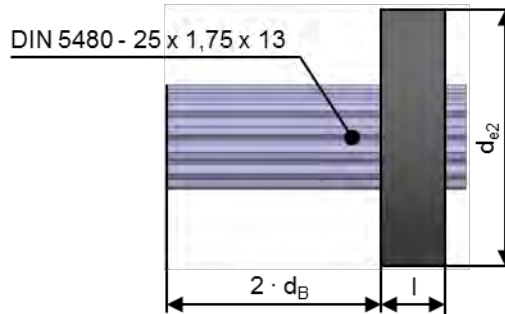


Abbildung 2: Geometriedefinition

## 2.2 Numerische Randbedingungen

Alle numerischen Untersuchungen wurden im linearelastischen Bereich, bei linearer Interpolation unter Anwendung eines APDL-Skripts mit AnsysClassic (Version 14.5) durchgeführt. Den Auswertungen wurde die nodale Lösung zugrunde gelegt. Die Kontaktsteifigkeit blieb von der Standardvorgabe unverändert. Vorversuche ergaben eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Experiment und Numerik.

## 2.3 Ort der Auswertung

Den Einfluss des Auslaufs nicht berücksichtigend erfolgt der Anriss bei Torsion wie auch bei Torsion in Kombination mit Biegung mit entsprechender Dominanz des Torsionsmomentes ( $M_b / M_t \leq 0,3$ ) erfahrungsgemäß im Zahnfußbereich der Welle an der Nabenkante. Die hier vorherrschenden Kerbeinflüsse Zahnfußrundung sowie Steifigkeitssprung am Übergang von der Zahnwelle zur Nabe überlagern sich zu einem Gesamtkerbeinfluss. Es kommt also zur sogenannten Kerbüberlagerung. Die Höhe des nabenkantenbedingten Anteils der Kerbwirkung ist hierbei eine Funktion der Nabensteifigkeit. Diese ist abhängig von der Nabenwandstärke sowie der Nabenlänge.

Resultierend aus oben beschriebenem Sachverhalt erfolgte die Auswertung der numerischen Untersuchungen in der Zahnfußrundung an der Nabenkante an der Stelle der höchsten Beanspruchung.

## 2.4 Praxisrelevanz kombinierter Lasten

Primärer Verwendungszweck einer Zahnwellenverbindung nach der [DIN 5480] ist die Übertragung eines Torsionsmomentes. In der praktischen Anwendung kommt es jedoch häufig vor, dass der Torsion eine Querkraft oder ein Biegemoment überlagert ist. Diese zusätzlichen Lasten können beispielsweise aus Achs- bzw. Winkelversatz ohne Ausgleichselement (statische Unbestimmtheit), bei einer fliegenden Lagerung durch Radialkräfte oder aber bei Kreuzgelenkwellen aus dem leistungslosen Biegemoment herrühren.

## 2.5 Einfluss der Lastart

### 2.5.1 Torsion

Die Ursache für den im Forschungsvorhaben [FVA 467 II] bestimmten Effekt der Abnahme der Formzahl bei Verwendung einer dünnwandigen Nabe wird auf die geringere Gesamtsteifigkeit der Zahnwellenverbindung zurückgeführt. Aus Gründen der Einfachheit sollte dieser Effekt zunächst bei reiner Torsion numerisch untersucht werden. Die Randbedingungen wurden diesbezüglich gemäß Abbildung 3 definiert.

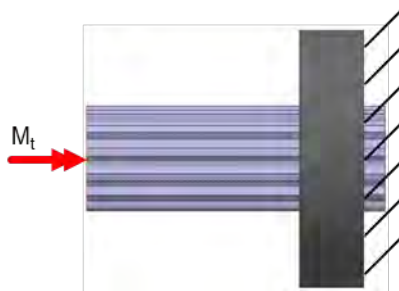


Abbildung 3: Definition der Randbedingungen

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen.

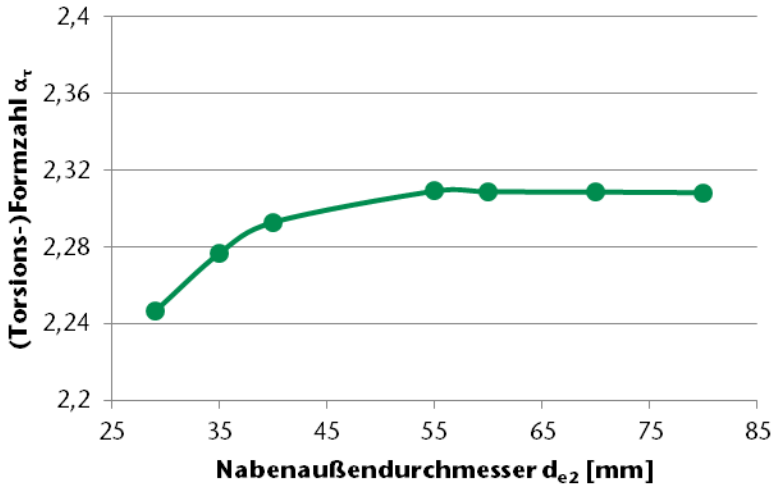


Abbildung 4: Torsionsformzahl  $\alpha_\tau$  als Funktion des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  (DIN 5480 – 25 x 1,75 x 13, Nabenlänge  $l = 15$  mm)<sup>1</sup>

Betrachtet man den Verlauf der Formzahl über dem Nabenaußendurchmesser  $d_{e2}$  wird ersichtlich, dass erwartungsgemäß mit kleiner werdendem Durchmesser die (Torsions-)Formzahl  $\alpha_\tau$  abnimmt. Allerdings ist die Verringerung der Formzahl von circa 2,3 auf ungefähr 2,25 sehr klein. Folglich ist der experimentell bestimmte Effekt der signifikanten Tragfähigkeitssteigerung bei dünnwandiger Ausgestaltung der Nabe nicht beziehungsweise nur bedingt nachweisbar.

### 2.5.2 Biegung

Da der Effekt der signifikanten Tragfähigkeitssteigerung unter Verwendung einer dünnwandigen Nabe bei reiner Torsion nur zu einem geringen Teil nachweisbar war, vgl. Kapitel 2.5.1, soll nun die aus einem Biegemoment resultierende numerisch bestimmte Zahnfußspannung bzw. die (Biege-)Formzahl  $\alpha_\sigma$  in Abhängigkeit der Nabenwandstärke betrachtet werden.

Abbildung 5 zeigt die bei den numerischen Analysen definierten Randbedingungen. Diese entsprechen jenen der experimentellen Untersuchungen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II].

<sup>1</sup> Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 54

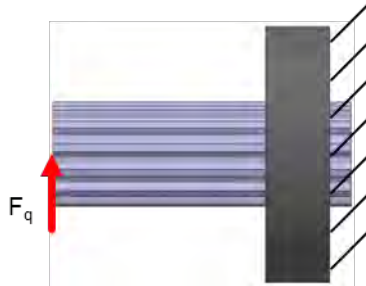


Abbildung 5: Definition der Randbedingungen

Die numerischen Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

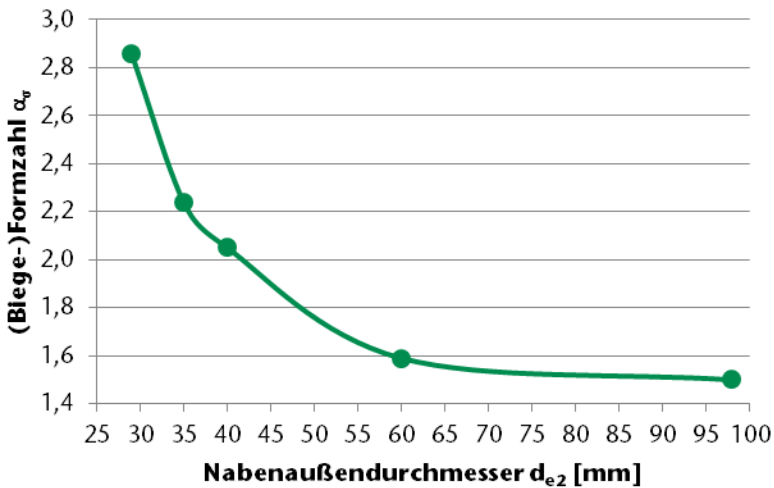


Abbildung 6: Biegeformzahl  $\alpha_\sigma$  als Funktion des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  (DIN 5480 – 25 x 1,75 x 13, Nabenlänge  $l = 15 \text{ mm}$ )<sup>2</sup>

Bei Betrachtung der (Biege-)Formzahl  $\alpha_\sigma$  in Abhängigkeit des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  zeigt sich, dass, in Gegenüberstellung zu dem experimentell bestimmten Effekt, eine inverse Abhängigkeit des Tragverhaltens vorliegt. Je dünner die Nabe ist, desto höher ist die biegemomentbedingte maximale Zahnfußspannung. Aus den numerischen Ergebnissen geht zudem hervor, dass sich die Spannungsverteilung von der Dick- hin zur Dünnwandigkeit signifikant verändert, vgl. Abbildung 7.

<sup>2</sup> Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 61



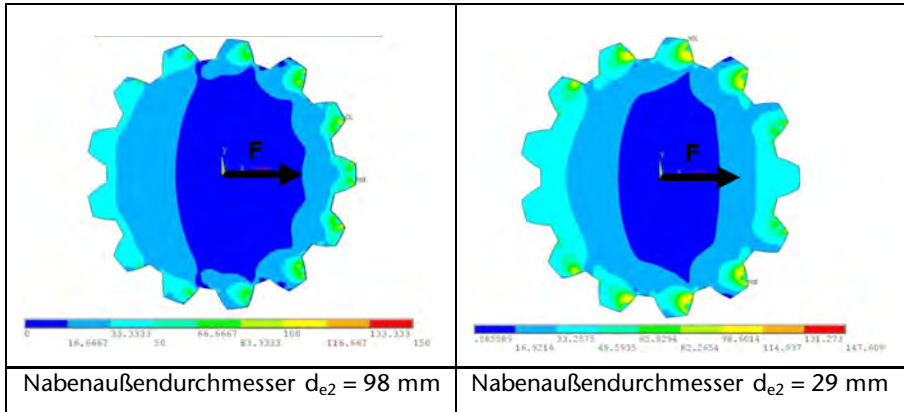


Abbildung 7: Änderung der Spannungsverteilung bei unterschiedlichem Nabenaußendurchmesser  $d_{e2}$  - Grenzwertbetrachtung<sup>3</sup>

Bei der dickwandigen Nabe (Abbildung 7, links) ist die maximale Spannung in dem Zahnfuß jenes Zahnes (druckseitig) zu erwarten, der den maximalen Abstand zur neutralen Faser aufweist. Reduziert man die Nabenwandstärke, so wandert das Zahnfußspannungsmaximum zu jenen Zähnen, die nahe bzw. in der neutralen Faser liegen. Dieses Verhalten lässt sich über die gestiegene Nabennachgiebigkeit begründen. Mit steigender Verformung steigt der Traganteil jener Zähne, die sich nicht in Richtung der Querkraft befinden. Die sich ergebenden auf den zahnflanken stehenden Reaktionskräfte biegen die Zähne. Der Zahnfuß als für die Zahnbiegung kritische Kerbe führt zur Spannungsspitze.

### 2.5.3 Torsion und Biegung in Kombination bei $M_b / M_t = 0,2$ (Nabellänge $l = 15$ mm)

Mit den in den Kapiteln 2.5.1 und 2.5.2 beschriebenen numerischen Untersuchungen konnte das im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] experimentell bestimmte Verhalten von Zahnwellenverbindungen nach der [DIN 5480] der signifikanten Tragfähigkeitssteigerung bei dünnwandiger Ausbildung der Nabe nicht nachgewiesen werden. Hieraus schlussfolgernd ist der Effekt nur gegeben, wenn analog zu den Experimenten die Lastarten Biegung und Torsion in Kombination vorherrschen. Für die numerischen Untersuchungen bei kombinierter Last wurde das gleiche  $M_b / M_t$ -Verhältnis von 0,2 zugrunde gelegt. Die Randbedingungen wurden dabei gemäß Abbildung 8 definiert.

<sup>3</sup> Entnommen aus: Montero, M. (2015), Anhang

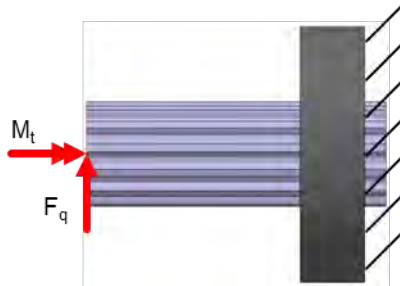


Abbildung 8: Definition der Randbedingungen

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen. Es gilt zu beachten, dass im Gegensatz zu den in den Kapiteln 2.5.1 sowie 2.5.2 dargestellten Ergebnissen, nicht die Formzahlen, sondern die Vergleichsspannungen  $\sigma_{v,Mises}$  der maximal beanspruchten Zahnfußrundungen zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Dies begründet sich dadurch, dass die Vergleichsspannung nicht auf die Lastarten Biegung und Torsion aufteilbar ist. Folglich können auch keine Formzahlen berechnet werden.

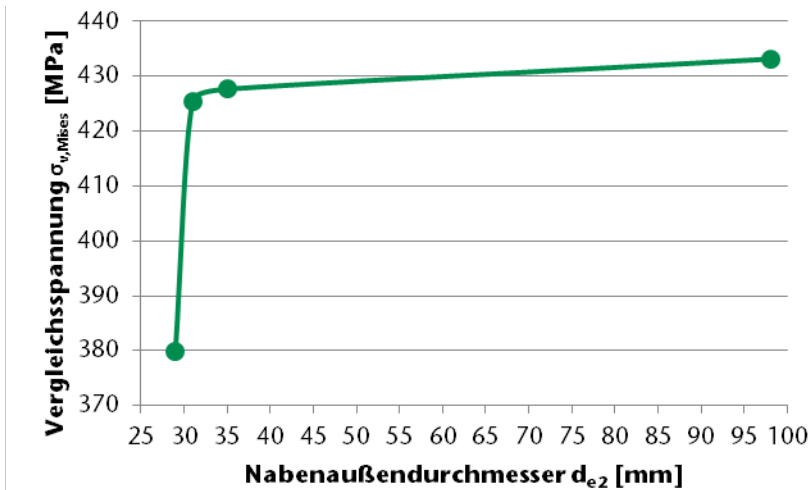


Abbildung 9: Vergleichsspannung  $\sigma_{v,Mises}$  als Funktion des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  (DIN 5480 – 25 x 1,75 x 13, Nabenlänge  $l = 15$  mm,  $M_b / M_t = 0,2$ )<sup>4</sup>

Bei Betrachtung der Vergleichsspannung  $\sigma_{v,Mises}$  der maximal beanspruchten Zahnfußrundung in Abhängigkeit des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  wird

<sup>4</sup> Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 69

ersichtlich, dass die Spannung ab dem Erreichen eines bestimmten Durchmessers signifikant abnimmt. Die beiden im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] experimentell bestimmten Tragfähigkeiten, einmal bei dick- und einmal bei dünnwandiger Nabe, deuten sehr gut auf einen derartigen Wandstärkeneinfluss hin. Die eingangs dieses Artikels definierte Fragestellung, ob der experimentell bestimmte Einfluss der Nabenwandstärke auf die Tragfähigkeit einer Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] numerisch nachweisbar ist, kann folglich bestätigt werden.

## 2.6 Variation der Nabenlänge bei $M_b / M_t = 0,2$

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, ist die Höhe der Kerbwirkung unter anderem eine Funktion des Steifigkeitssprunges im Übergang von der Welle zur Nabe. Diese ist erfahrungsgemäß nicht nur von der Nabenwandstärke, sondern ebenfalls von der Nabenlänge  $l$  abhängig. Zum Nachweis sowie zur Ermittlung des exakten Einflusses wurden die in Kapitel 2.5.3 angeführten numerischen Ergebnisse um Erkenntnisse bei den Nabenlängen 10 mm sowie 30 mm ergänzt, vgl. Abbildung 10.

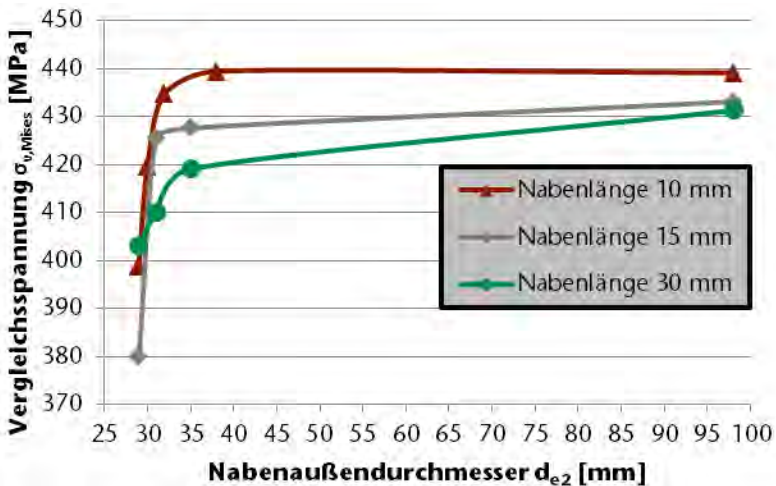


Abbildung 10: Vergleichsspannung  $\sigma_{v,Mises}$  als Funktion des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  sowie der Nabenlänge  $l$  (DIN 5480 - 25 x 1,75 x 13,  $M_b / M_t = 0,2$ )<sup>5</sup>

Ausnahmslos alle in Abbildung 10 gezeigten Spannungsverläufe zeigen den anfänglich beschriebenen experimentell erarbeiteten Effekt, dass es bei

<sup>5</sup> Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 79

dünnwandiger Gestaltung der Nabe zu einer Steigerung der Tragfähigkeit bedingt durch die verringerte Kerbschärfe kommen kann.

Bei Betrachtung der in Abbildung 10 gezeigten Graphen lassen sich diese anhand der Gradienten grob in zwei Bereiche unterteilen. Im linken Bereich herrscht ein sehr großer Spannungsgradient vor. Hier bewirkt eine kleine geometrische Variation eine große Tragfähigkeitsänderung. Ein mögliches Minimum gilt es in Abhängigkeit der Last unter Berücksichtigung der Plastizitätsgrenze der Nabe zu bestimmen. Dem Kurvenverlauf nach rechts folgend, scheinen sich die Vergleichsspannungen einem Maximalwert asymptotisch anzunähern. Diese Annäherung erfolgt bei höherer Steifigkeit deutlich schneller als bei einer konstruktiv weicher gestalteten Verbindung.

### 3 Übertragbarkeit

Wie in Kapitel 2.4 erläutert ist ein in der Praxis häufig vorkommender Lastfall jener der statischen Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung. Im Rahmen dieses Artikels wurde der positive Einfluss auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] dargelegt, der sich bei konstruktiv weicher Ausgestaltung bei diesem Lastfall ergibt.

### 4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] wurden neben numerischen Analysen experimentelle Untersuchungen an Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] durchgeführt. Diese dienten sowohl zur Validierung der numerischen Ergebnisse als auch zur eigenständigen Erarbeitung von Tragfähigkeitseinflüssen. Neben dem Einfluss der Lastart, des Fertigungsverfahrens, der Nabenlage, des Auslaufs etc. wurde auch der Einfluss der Nabenwandstärke betrachtet. Diesbezüglich wurden dick- und dünnwandige Naben hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit bei statischer Torsion sowie dynamischer Biegung in Kombination experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass die dünnwandige Ausgestaltung der Nabe einen signifikant positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit der Welle-Nabe-Verbindung hat. Dies als Anlass nehmend wurden weiterführend numerische Untersuchungen im Rahmen einer durch [Mont 15-1] am IMW der TU Clausthal erstellten Masterarbeit durchgeführt. Die Analysen beschränkten sich auf den Einfluss der Nabenwandstärke bei den Lastarten Torsion, Biegung sowie Torsion in Kombination mit Biegung. Neben der Lastart und des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  wurde zudem die Länge der Nabe variiert.

Die numerischen Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Nabenwandstärke bei Torsion zeigten, dass bei abnehmender Wandstärke auch die (Torsions-)Formzahl sinkt. Der Einfluss tritt allerdings erst bei sehr kleinen

Nabenwandstärken auf und ist nur in sehr geringem Maße ausgeprägt. Praktisch ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit von untergeordneter Bedeutung.

Resultierend daraus, dass der experimentell bestimmte signifikant positive Einfluss einer dünnwandigen Nabe auf die Tragfähigkeit einer Zahnwellenverbindung durch numerische Analysen unter reiner Torsionsbelastung kaum nachweisbar war, wurden weitere Untersuchungen bei Biegung durchgeführt. Das dort bestimmte Arbeitsergebnis ist, dass die biegemomentbedingte Formzahl im Zahnfußbereich bei dünner werdender Nabe deutlich ansteigt. Das so numerisch ermittelte Tragfähigkeitsverhalten der Welle-Nabe-Verbindung ist also genau entgegengesetzt zu jenem, welches sich experimentell bei statischer Torsion und dynamischer Biegung in Kombination zeigte.

Weiterer Untersuchungsgegenstand war die numerische Analyse des Einflusses der Lastart statische Torsion sowie dynamische Biegung in Kombination in vollständiger Analogie zu den im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] durchgeführten Experimenten. Hier zeigten die numerischen Ergebnisse, dass der Effekt der Tragfähigkeitssteigerung bei dünner werdender Nabe abbildbar ist. Bei Betrachtung des Spannungsgradienten ist der Verlauf der Vergleichsspannung als Funktion des Nabenaußendurchmessers grob in zwei Bereiche unterteilbar. Bei sehr kleinen Nabewandstärken hat eine kleine Veränderung des Nabenaußendurchmessers  $d_{e2}$  einen sehr großen Einfluss auf die maximal auftretende Zahnfußspannung. Bei größeren Nabewandstärken nimmt dieser Gradient stark ab. Die maximal vorhandene Zahnfußspannung nähert sich asymptotisch voraussichtlich einem gemeinsamen Maximalwert.

Neben der Nabewandstärke nimmt die Nabenlänge Einfluss auf die Steifigkeit der Zahnwellenverbindung. Dies berücksichtigend wurden zudem numerische Untersuchungen bei Variation dieses Parameters durchgeführt. Es zeigte sich im Wesentlichen, dass bei zunehmender Nabenlänge der Bereich der größeren Vergleichsspannungsgradienten bei dünnwandigeren Naben weniger stark ausgeprägt ist und zudem der asymptotische Übergang bei größeren Nabenaußendurchmessern  $d_{e2}$  zu einem potentiell für alle Nabenlängen gemeinsamen Maximalwert allmählicher stattfindet.

## 5 Ausblick

Mittelfristig werden die durch [Mont 15-1] erarbeiteten numerischen Ergebnisse um weitere Berechnungen ergänzt. Ziel hierbei ist die Steigerung der Ergebnisgüte insbesondere im Bereich der hohen Vergleichsspannungsgradienten bei dünnwandigen Naben. Dieser ist für die Praxis von besonderem Interesse, da hier hohe Potentiale zur Tragfähigkeitsverbesserung existieren.

In Ergänzung werden zudem Naben mit Längen größer als 30 mm in Abhängigkeit des Nabenaußendurchmesser  $d_{e2}$  bei sonst unveränderten Parametern untersucht.

Von besonderem Interesse ist der Einfluss des  $M_b / M_t$ -Verhältnisses auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen bei dünnwandiger Ausgestaltung der Nabe. Hier werden ebenfalls weitere numerische Untersuchungen durchgeführt.

Langfristig sollen die gegenwärtig zur Abschätzung der Kerbwirkung von Zahnwellenverbindungen vorhandenen Normen wie z.B. [DIN 743] oder [DIN 5466] um den Aspekt der konstruktiv weichen Ausgestaltung (dünnwandige Nabe, Nabenlänge  $l$ ) ergänzt werden.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsvorhaben [FVA 467 I, AiF\_Nr 14058 BG] sowie [FVA 467 II, AiF-Nr 16661 BG]. Die im Rahmen dieser Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse waren Ausgangspunkt für die numerischen Untersuchungen, deren Ergebnisse im Rahmen dieses Artikels dargelegt wurden.

Zudem bedanken sich die Autoren bei Herrn Marc Riera Montero für die freundliche und konstruktive Zusammenarbeit zur numerischen Erarbeitung des Einflusses der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480].

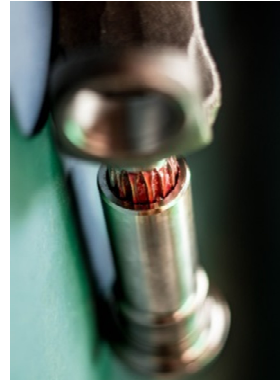
## 7 Formelzeichen

$d_B$	Bezugsdurchmesser
$d_{e2}$	Nabenaußendurchmesser
$l$	Nabellänge
$m$	Modul
$M_b$	Biegemoment
$M_t$	Torsionsmoment
$z$	Zähnezahl
$\alpha$	Eingriffswinkel
$\rho_{fp}$	Zahnfußrundung des Bezugsprofils
$\sigma_{v,Mises}$	Vergleichsspannung nach Mises

## 8 Literatur

- [DIN 743] Norm DIN 743, 2012-12-00. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- [DIN 5466] Norm DIN 5466, 2000-10-00. Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen
- [DIN 5480] Norm DIN 5480, 2006-03-00. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser
- [FVA 467 I] Daryusi, A. ; Lau, P.: Profilwellen-Kerbwirkung: Ermittlung der Kerbwirkung bei Profilwellen für die praktische Getriebeberechnung von Zahnwellen. Forschungsvorhaben Nr. 467 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 14058 BG). Frankfurt/Main, 2009 (FVA-Heft 905)
- [FVA 467 II] 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) noch nicht veröffentlichter Abschlussbericht
- [MONT 15-1] Montero, M.: Finite Element Analysis of a splined Shaft Hub Connection regarding the Wall Thickness of the Hub. Nicht veröffentlichte Masterthesis, Clausthal-Zellerfeld, 2015

# Potential moderner Schmierstoff- und Beschichtungssysteme am Beispiel axial bewegter Zahnwellenverbindungen



Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.

*Moderne Schmierstoff- und Beschichtungssysteme können laut Herstellerangaben die Reibung und den Verschleiß in bewegten Kontakten reduzieren. Am Beispiel axial verschiebbarer Zahnwellenverbindungen soll in diesem Artikel der Nachweis dieser Behauptung nachgegangen werden.*

*Modern tribological systems (greases and coatings) promise to reduce friction and wear in moving contacts. To prove this thesis, experimental investigation on spline shafts under axial motion were done by the authors.*

## Einleitung

Eine ständige Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Gelenkwellen durch Steigerung der Drehzahlen und/oder übertragbaren Drehmomente erzeugten bei gleichzeitiger axialer Bewegung im Längenausgleich ebenso steigende Anschlusskräfte wie Belastungen der Wellenabschnitte. Diese Kräfte sind stark von dem in den Kontaktstellen von Wellenverzahnung und Nabenverzahnung auftretenden Reibwert abhängig. Bei den bisher an dieser Schnittstelle verwendeten Schmierstoffen und Beschichtungen existiert, in Abhängigkeit vom Anwendungsfall, noch deutlicher Optimierungsbedarf. Daher liegt der Fokus in den aktuellen Untersuchungen auf der Eignung anderer Schmierstoff- und Beschichtungsvarianten zur Reduzierung der Reibwerte und des Verschleißes. Der Versuchsumfang besteht dabei aus sechs verschiedenen Schmierstoffen sowie vier Beschichtungen die mit Schmierstoff 1 geschmiert eingesetzt werden. Einen Überblick über die grundlegenden Eigenschaften der Produkte gibt Tabelle 1. Untersuchungsobjekt ist der verzahnte Längenausgleich einer Gelenkwelle.

Der verzahnte Längenausgleich wird dazu in einem eigens aufgebauten Prüfstand /1/ durch ein Torsionsmoment von 500Nm belastet und axial mit einer Frequenz von 1Hz und einem Verschiebeweg von 1mm bewegt. Die Belastung erfolgt dabei in einem zeitlichen Verhältnis von 60/40 (36s/24s) Belastung/Entlastung. Durch diese Verfahrensweise soll sich die Schmierstoffverteilung im Zahnkontakt wieder normalisieren. Eine dauerhafte Verspannung führt zu einem Klemmen der Verzahnung nach relativ kurzer Versuchsdauer.



Tabelle 1: Überblick der getesteten tribologischen Systeme

System	Eigenschaft
Schmierstoff 1	Lithiumverseiftes Mehrzweckfett mit EP Eigenschaften
Schmierstoff 2	Lithiumverseiftes Mehrzweckfett mit EP Eigenschaften
Schmierstoff 3	Lithiumseifenfett auf Syntheseölbasis mit weißen Festschmierstoffen
Schmierstoff 4	Fettpaste auf Basis eines Kalzium-Komplex Grundfettes mit weißen Festschmierstoffen
Schmierstoff 5	Lithiumverseiftes Fett auf Mineralölbasis mit weißen Festschmierstoffen
Schmierstoff 6	Lithiumverseifte Schmierpaste auf Syntheseölbasis mit weißen Festschmierstoffen
Beschichtung 1	Fluorpolymerbeschichtung mit Einlagerungen von Molybdän
Beschichtung 2	Hitzehärtender Gleitlack
Beschichtung 3	Semi-Kristalline Polymerbeschichtung
Beschichtung 4	Fluorpolymerbeschichtung mit Einlagerungen von Verstärkungstoffen

Tabelle 2: technologische Daten Prüfverzahnung

Norm	DIN5480
Zähnezahl $z$	14
Modul $m$	2mm
Bezugsdurchmesser $d_B$	32mm
Überdeckungslänge	48mm ( $=1,5 \cdot d_B$ )
Eingriffswinkel $\alpha$	30°

## Versuche und Auswertung

Wichtige Kriterien für die Charakterisierung des Verschleißverhaltens sind das sich im Versuch ergebende Knickspiel in der Verzahnung sowie die Zunahme des Verdrehspiels. Das Knickspiel wird gemäß Abbildung 1 in einer separaten Vorrichtung vor und nach jedem Versuch gemessen. Ausgewertet wird die Vergrößerung des Knickspiels bezogen auf die erreichte Anzahl Verschiebungen der Probe. Die Verdrehspielmessung ist in Abbildung 2 dargestellt, über eine Messuhr wird der Verdrehweg zwischen Welle und Nabe im Abstand von 40mm zur Bauteilachse bei einer Belastung von  $\pm 50\text{Nm}$  gemessen.

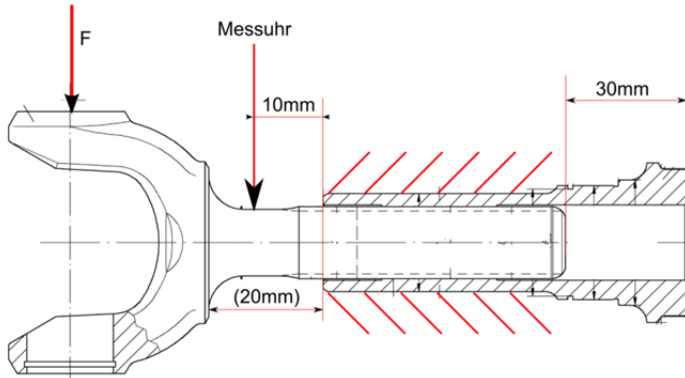


Abbildung 1: Prinzipskizze Knickspielmessung

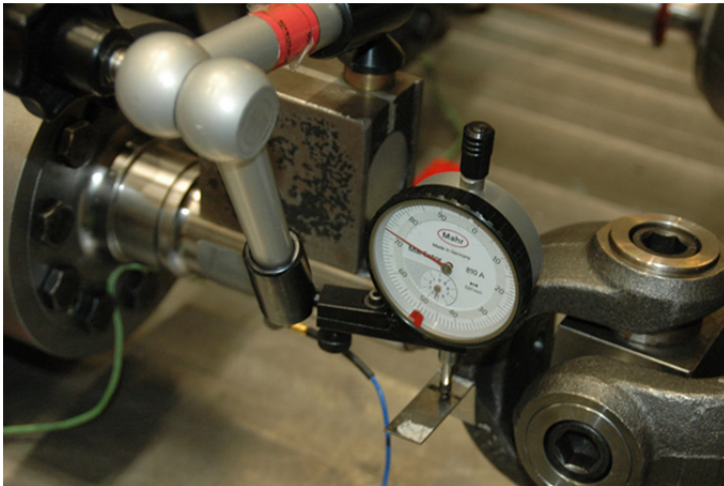


Abbildung 2: Aufbau Verdrehspielmessung

Eine weitere wichtige Messgröße ist die axiale Verschiebekraft, die zur Bewegung der ZWV unter Torsionsbelastung notwendig ist. Dazu gibt es für jede Probe im Prüfstand eine Axialkraftmessstelle. Die Axialkräfte werden dann mit Formel 1 (nach /2/) und den Geometriedaten aus Tabelle 2 in einen bauteilspezifischen Reibwert umgerechnet.

$$\mu = \frac{F_{ax}}{T} \cdot \frac{d_B}{2} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

Darin sind:

$F_{ax}$  – axiale Verschiebekraft [N]

$T$  – Verspannmoment [Nm]

$d_B$  – Bezugsdurchmesser der Verzahnung

$\alpha$  – Eingriffswinkel

Für die grundlegende Betrachtung der Eigenschaften des tribologischen Systems ist es ausreichend, den Versuch bei Reibwerten von ca. 0,2 und größer abzubrechen.

### Erreichte Lastwechselzahl

Nur wenige Proben erreichen im Versuch die tatsächlich anvisierte Lastwechselanzahl von  $10^6$  Verschiebungen. Tatsächlich sind deutliche Unterschiede bei den erreichten Lastwechselzahlen für die einzelnen Schmierstoffe und Beschichtungen zu sehen, damit eignet sich der Ausfallzeitpunkt der Proben schon als Merkmal für die Eignung als tribologisches System im Längenausgleich. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind für die verschiedenen eingesetzten Schmierstoffe und Beschichtungen die erreichten Lastwechselzahlen angegeben. Bei den Schmierstoffen (Abbildung 3) gibt es lediglich eine Variante die zuverlässig hohe Lastwechselzahlen ermöglicht.

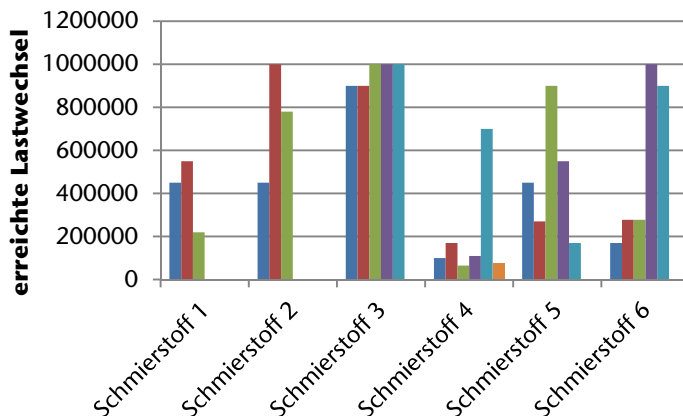


Abbildung 3: Erreichte Lastwechsel für die einzelnen Schmierstoffe

Im Gegensatz dazu erreichen die beschichteten Proben alle eine relativ hohe Anzahl Lastwechsel, allerdings wird das Ziel von  $10^6$  Lastwechseln nicht immer

erreicht. Einzig die Beschichtung 3 ist zuverlässig genug für alle Proben diese Lastwechselzahl und sogar noch wesentlich mehr Lastwechsel zu ermöglichen. Beschichtung 4 ist ebenfalls recht zuverlässig, allerdings ist bei dieser auch ein Frühausfall zu berichten.

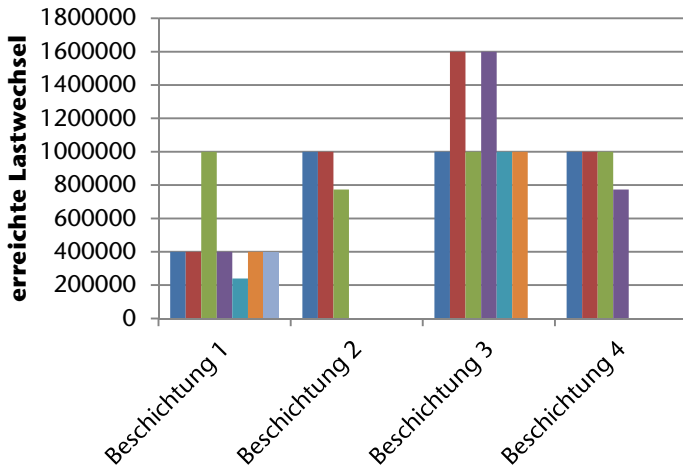


Abbildung 4: Erreichte Lastwechsel für die einzelnen Beschichtungen

### Verschleißmessungen

Das Verdrehspiel in der Zahnwellenverbindung ist ein Verschleißindikator und kann während der Versuche im Prüfstand gemessen werden. Die Verdrehspielzunahme ist definiert als Verdrehspiel zum Zeitpunkt X minus des Verdrehspiels zu Versuchsstart.

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind für die geschmierten und die beschichteten Proben die Entwicklungen der Verdrehspiele dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass durch die Ausfallrate der geschmierten Proben bei diesen zum Großteil nur Einzelergebnisse dargestellt werden können. Lediglich für Schmierstoff 3 ist eine Angabe über mehrere Proben möglich.

Bei den beschichteten Proben erfolgte der Ausfall wesentlich später als bei den geschmierten Proben, darum sind in Abbildung 6 die mittleren Verdrehspielzunahmen über die Versuchsdauer mit entsprechender Standardabweichung dargestellt.

Bei Beschichtung 1 ist ein Großteil der Proben relativ früh ausgefallen, über die Verdrehspielzunahme bei höheren Lastwechselzahlen kann daher keine Aussage getroffen werden.

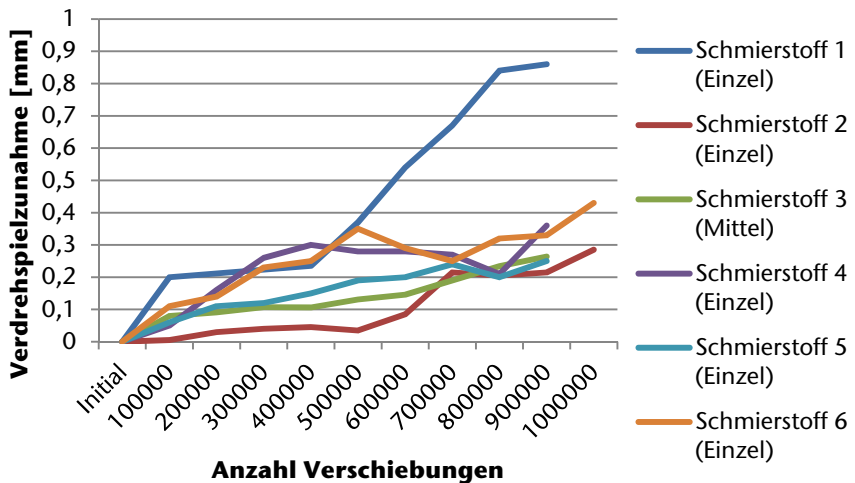


Abbildung 5: Verdrehspielzunahme der Schmierstoffproben

Die mit Beschichtung 2 versehenen Proben sind alle mit Vorschädigung im Versuch gestartet. Bei diesen Proben ist die Verzahnung im Bereich der Zahnköpfe angeschlagen und z.T. lokal verformt wurden, dadurch wurde ein lokales Nacharbeiten der Verzahnung notwendig wodurch an diesen Stellen die Beschichtung entfernt wurde. Die mittlere Verdrehspielzunahme dieser Proben verläuft annähernd linear steigend aber mit sehr großer Streuung der Ergebnisse.

Für Beschichtung 3 und 4 sind die mittleren Verdrehspielzunahmen relativ gering mit geringer Streuung. Im Vergleich zu den Schmierstoffuntersuchungen ist eine Reduzierung des Verschleißes um ca. 30% und mehr zu erkennen.

Eine weitere wichtige Größe, um den Verschleiß in einer Zahnwelle, besonders im Augenmerk auf die Anwendung in Gelenkwellen, größenmäßig zu charakterisieren ist das Knickspiel in der Verbindung. Da jedoch die verschiedenen Proben zu unterschiedlichen Zeiten ausgefallen sind, ist eine Aussage über das absolute Knickspiel nicht zielführend. Daher werden die Knickspielzunahmen über den Versuch auf die erlebte Lastwechselzahl bezogen, um ein relatives Maß zu erhalten. Die relativen Knickspielzunahmen sind in Abbildung 7 dargestellt. Ebenfalls eingetragen sind die minimalen und maximalen Knickspielzunahmen die erreicht wurden.

Gute Schmierstoffe und gute Beschichtungen erreichen bei der relativen Knickspielzunahme annähernd gleiche Werte wie auch gleichwertige Schwankungen der Ergebnisse. Allerdings muss beachtet werden, dass im Mittel die beschichteten Proben längere Standzeiten erreicht haben als die meisten

Schmierstoffproben. Die Ergebnisse der Knickspielmessung spiegeln somit nicht zwingend die Ergebnisse der mittleren Verdrehspiele wieder.

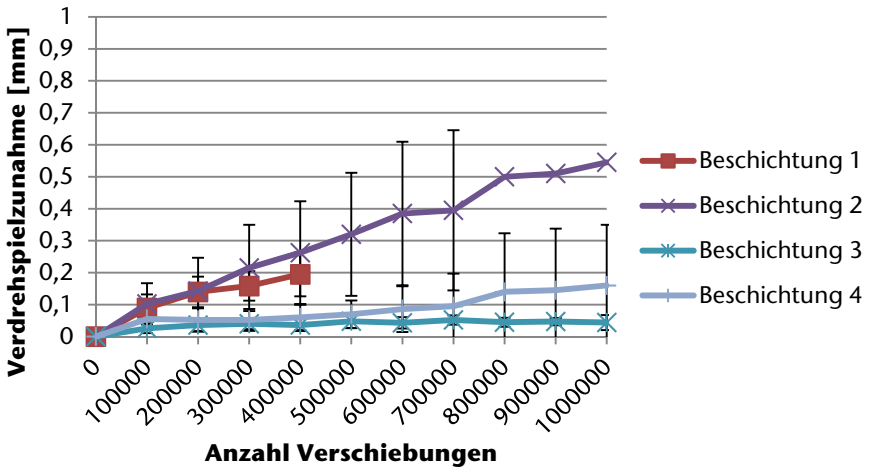


Abbildung 6: Verdrehspielzunahme der Beschichtungsproben mit Standardabweichung ermittelt aus mehr als drei Einzelwerten

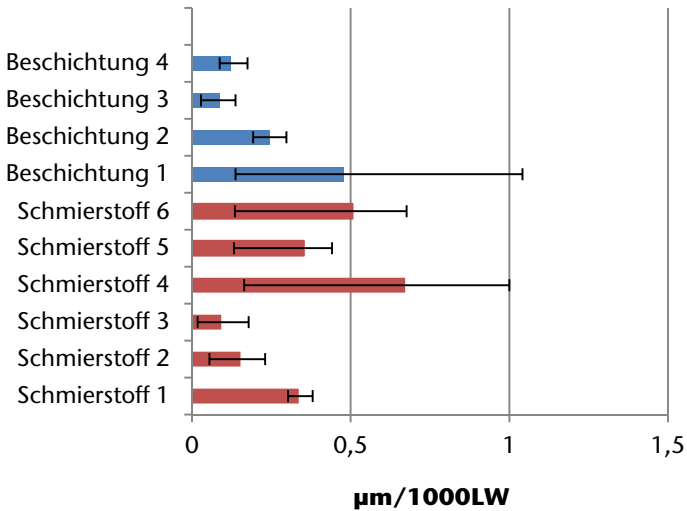


Abbildung 7: mittlere Knickspielzunahme pro 1000 Lastwechsel

## Reibwerte

Ein wichtiges Ziel der Untersuchungen ist, die Reibwerde in der Zahnwellenverbindung bei axialer Verschiebung zu reduzieren. In Abbildung 8 sind für die einzelnen getesteten Schmierstoff- und Beschichtungsproben die gemittelten Reibwerte bei Versuchsbeginn (Initial) und während des Prüflaufs (Mittel) angegeben. Für die Ermittlung der gemittelten Reibwerte im Betrieb wird nur der Bereich annähernd konstanter Reibwerte (vgl. Abbildung 9) herangezogen.

Die mit Schmierstoff 2 und 5 geschmierten Proben erreichen im Mittel einen Reibwert im Betrieb von ca. 0,17, für Schmierstoff 3 lässt sich ein mittlerer Reibwert von ca. 0,19 angeben. Für Schmierstoff 4 kann kein mittlerer Reibwert angegeben werden, da dieser Schmierstoff schon während der ersten Lastwechsel versagt und Reibwerte von größer 0,2 erreicht werden. Allgemein liegen die meisten Schmierstoffe bei den Reibwerten relativ nahe beisammen, eine deutliche Reibwertreduzierung im Vergleich zu Schmierstoff 1 kann nicht erkannt werden.

Ein anderes Bild hingegen zeigt sich, wenn man die Beschichtungen betrachtet. Die besten Ergebnisse erzielen dabei Beschichtung 3 und Beschichtung 4. Mit Beschichtung 3 kann der Reibwert im Kontakt dauerhaft auf ca. 0,043 gesenkt werden, Beschichtung 4 ermöglicht immerhin noch eine Reibwertreduzierung auf ca. 50% der Werte für Schmierstoff 1. Die anderen getesteten Beschichtungen zeigen hingegen kein deutlich besseres Bild als die Schmierstoffe.

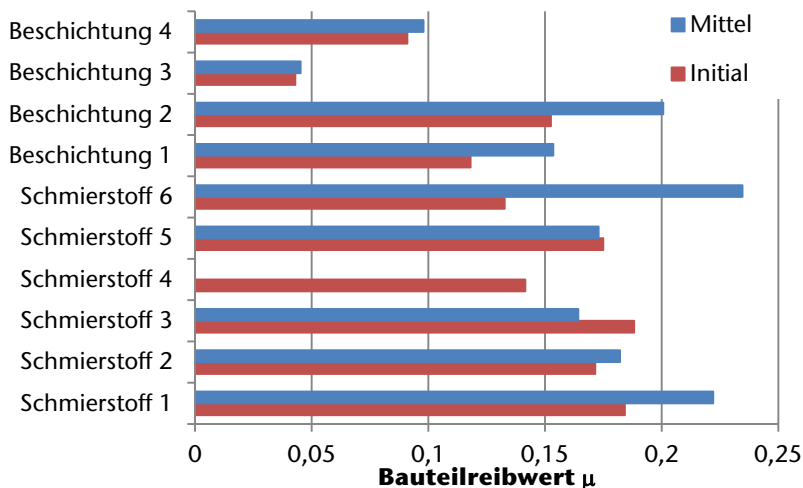


Abbildung 8: Initialer und mittlerer Reibwert für die einzelnen tribologischen Systeme

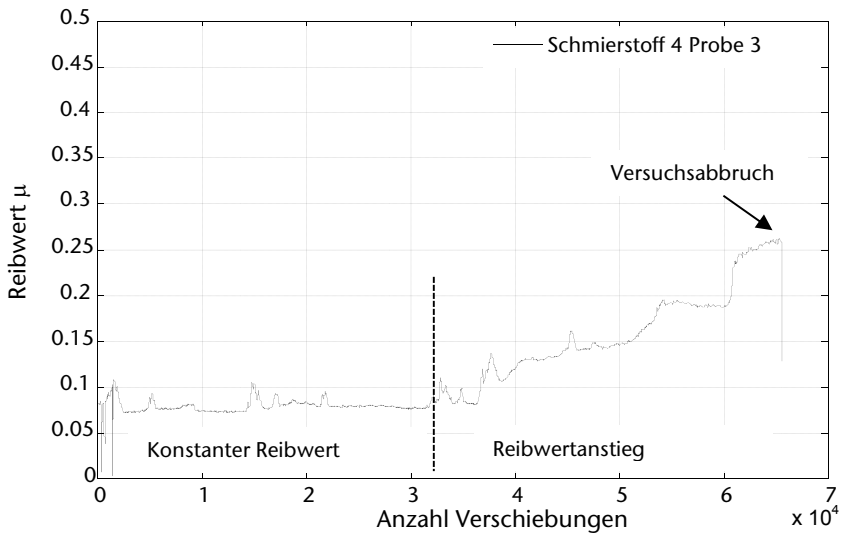


Abbildung 9: Beispielhafter Verlauf der Reibwertentwicklung für Schmierstoff 4, Probe 3

## Zusammenfassung

Moderne Beschichtungs- und Schmierstoffsysteme können zuverlässig Reibwerte und Verschleiß reduzieren wie hier am Beispiel von axial verschiebbaren Zahnwellenverbindungen, wie sie z.B. in Kreuzgelenkwellen zum Einsatz kommen, im Versuch aufgezeigt. Es konnten zwischen den getesteten Schmierstoffen und Beschichtungen zum Teil erhebliche Unterschiede in der Eignung für diesen Anwendungsfall nachgewiesen werden. Als besonders gut geeignet für die Anwendung in Zahnwellenverbindungen kann Schmierstoff 3 sowie Beschichtung 3 und 4 genannt werden, wobei Beschichtung 3 das beste Ergebnis mit einer Reibwertreduzierung von über 70% gegenüber Schmierstoff 1 erzielte. Allerdings ist Beschichtung 4 hitzebeständiger, wodurch diese in Umgebungen mit höheren Temperaturen noch eingesetzt werden kann. Außerdem benötigt Beschichtung 4 keine Nachbearbeitung, dadurch können im Vergleich zu Beschichtung 3 Fertigungskosten eingespart werden.



## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung, sowie bei der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Reibwert- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich“ (FVA Nr. 505II, IGF Nr. 17142 N/1).

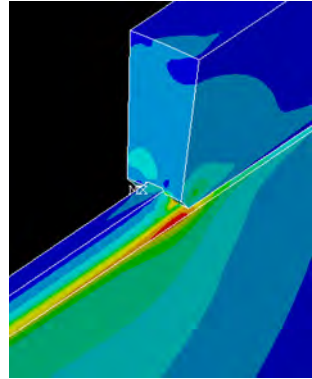
## Literatur

- /1/ Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Verschleiß in axial bewegten Zahnwellenverbindungen – Prüfstand zur experimentellen Ermittlung von Reibwerten und Verschleißkennwerten, Institutsmitteilung Nr. 39, IMW Clausthal 2013
- /2/ Seherr-Thoss, H.-C. v.; Schmelz, F.; Aucktor, E.: Gelenke und Gelenkwellen: Berechnung, Gestaltung, Anwendungen. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.

## Optimierung der Zahnwellenprofilform

Schäfer, G.; Wild, J.

Häufiges Ziel in der Praxis ist die Steigerung des zu übertragenden Torsionsmomentes bei gleichzeitig unverändert zu belassende Bauraum. Hier werden bei den gegenwärtig oft verwendeten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] zur Verbindungen von Wellen und Naben immer häufiger kerbwirkungsbedingt die Tragfähigkeitsgrenzen erreicht. Es ist bekannt, dass durch eine Veränderung der Profilform die Tragfähigkeit gesteigert werden kann. Inhalt dieses Artikels ist die Vorstellung eines Forschungsvorhabens, dass die Entwicklung einer neuen Zahnwellenprofilform auf Basis sogenannter komplexer Trochoiden zum Ziel hat.



Very often the goal to increase the torque to be transferred without changing the space has to be met in practice. As a result the commonly used splined tooth shaft connection according to the [DIN 5480] to connect shafts and hubs more and more frequently reach the limit of the load capacity in due to the stress concentration. It is known that the capability of the connection to carry load can be increased by a change of the profile shape. Content of this essay is the introduction of a new research project, which has the goal to develop a new toothed shaft profile based on the so-called complex trochoids.

### 1 Einleitung

In der Praxis werden Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] häufig angewendet. Begründen lässt sich dies dadurch, dass diese Art der Welle-Nabe-Verbindung dazu in der Lage ist, hohe stoßartig auftretende, dynamische Torsionsmomente zu übertragen. Zudem ist sie unter dem Aspekt des ökonomischen Prinzips wirtschaftlich herstellbar. Dies ergibt sich daraus, dass die zur Herstellung von Laufverzahnungen verfügbaren Werkzeug sowie optimierten Prozesse direkt anwendbar sind.

Häufiges praktisches Ziel ist die Steigerung des zu übertragenden Torsionsmomentes bei gleichzeitig zumindest unverändert zu belassendem Bauraum. Hier werden bei Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] immer öfter kerbwirkungsbedingt die Tragfähigkeitsgrenzen erreicht. Durch eine Optimierung der Zahnwellenprofilform kann Abhilfe geschaffen werden. Diesbezüglich ist es

Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] zu überprüfen, ob die sogenannten komplexen Trochoiden in Gegenüberstellung zur Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] nennenswert tragfähiger sind. Bei dieser Betrachtung gilt es neben dem Tragfähigkeitspotential zudem alle an eine Welle-Nabe-Verbindung gestellten Anforderungen insbesondere der wirtschaftlichen Herstellung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieses Artikels wird der Inhalt des Forschungsvorhabens beschrieben.

## 2 Inhalt des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben [FVA 742 I] wird vom Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal in Kooperation mit der westsächsischen Hochschule Zwickau bearbeitet. Abbildung 1 zeigt den arbeitspaketübergreifenden Inhalt sowie die Arbeitsaufteilung.

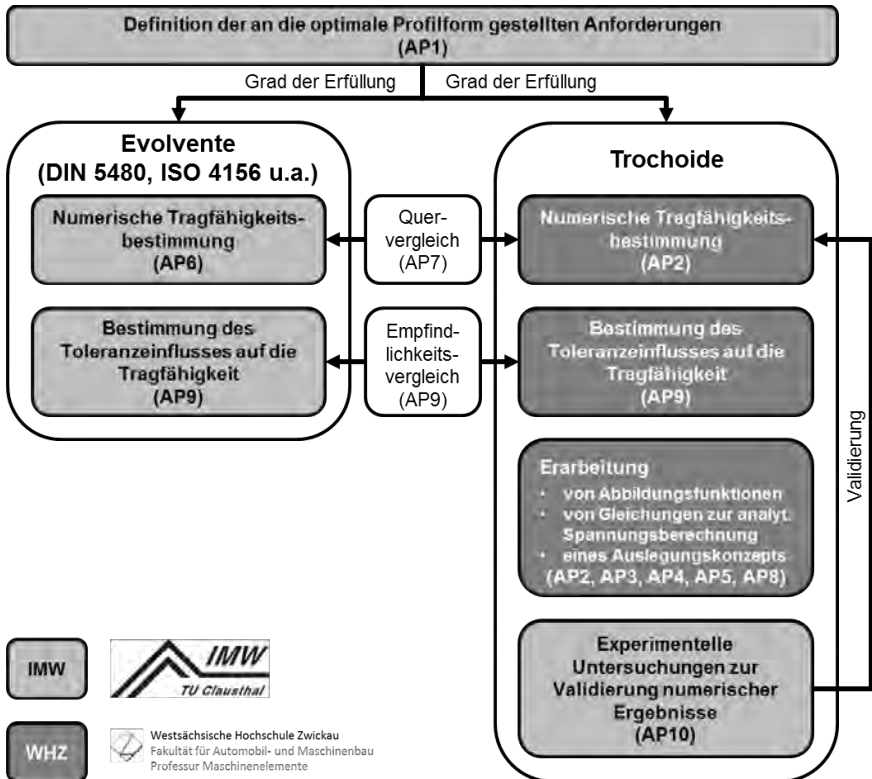


Abbildung 1: Inhalt sowie Arbeitsaufteilung des Forschungsvorhabens [FVA 742 I]

Im Wesentlichen werden die Untersuchungen bezüglich der Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] vom Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, jene hinsichtlich der komplexen Trochoiden von der westsächsischen Hochschule Zwickau durchgeführt. Ausnahme bilden die experimentellen Untersuchungen. Diese beschränken sich auf die Analyse der komplexen Trochoiden und werden am Institut für Maschinenwesen durchgeführt.

Die Durchführung des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] erfolgt in Anlehnung an die Vorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II]. Dieses Vorgehen ermöglicht die Validierung numerischer Untersuchungsergebnisse von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] anhand der in den zuvor genannten Forschungsvorhaben erarbeiteten experimentellen Erkenntnisse. Weiter kann das in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] zusammengetragene Wissen unmittelbar um die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse erweitert werden. Zudem ist ein direkter experimenteller Vergleich zwischen Evolvente und Trochoide möglich.

In den nachfolgenden Kapiteln wird lediglich auf die vom Institut für Maschinenwesen zu bearbeitenden Bereiche eingegangen.

## **2.1 Definition der an die optimale Profilform gestellten Anforderungen (API)**

Wie in der Einleitung dargestellt, ist die Steigerung der Tragfähigkeit der gegenwärtig häufig eingesetzten Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] angestrebt. Dies kann durch eine Optimierung der Profilform erfolgen. Bei einer Bewertung, ob eine bessere Profilform gefunden wurde, gilt es aber nicht nur den Aspekt der Tragfähigkeit, sondern alle an eine Welle-Nabe-Verbindung gestellten Anforderungen (Funktions- und Fertigungsmerkmale) im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung zu berücksichtigen. Hieraus folgend sollen beispielhaft die

- Belastungsbedingungen (Dreh-, Biegemoment, Querkraft),
- geometrischen Bedingungen (Nabenaußen-/Fügedurchmesser),
- Nutzungsart (Schiebe-, Festsitz),
- Fertigungsbedingungen (Prozessart,-zeiten, Werkzeugstandzeiten),
- Werkstoffe (Streckgrenze, Streckgrenzenverhältnis, Oberflächenschicht)
- sowie relevante Schadensursachen

als Bewertungskriterien benannt werden.

Eine mögliche neue Profilform ist jene der komplexen Trochoiden. Die Überprüfung ist Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 742 I].

## 2.2 Evolvente ([DIN 5480], [ISO 4156]) – Numerische Tragfähigkeitsbestimmung (AP6)

Für den reinen Tragfähigkeitsvergleich wird das praxisnahe Szenario eines vorgegebenen und zwingend einzuhaltenden Bauraums zugrunde gelegt. Konkret handelt es sich bei dieser Restriktion um einen maximal zulässigen Wellendurchmesser von 25 mm. Folglich gilt es bezüglich der Zahnwellenverbindung einen Bezugsdurchmesser  $d_b$  von 25 mm nicht zu überschreiten. Dieser Wert ergibt sich aus dem in Kapitel 2 erläuterten Sachverhalt der Vergleichbarkeit bzw. Ergänzung von Ergebnissen der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II]. Da ein kleiner gewählter Bezugsdurchmesser als dem maximal möglichen zu einer geringeren Tragfähigkeit führt, verbleiben als variable Parameter der Zahnwelle nach [DIN 5480] der Modul  $m$  beziehungsweise die Zähnezahl  $z$  sowie die Zahnfußrundung  $\rho_{fp}$ . Der Eingriffswinkel von  $30^\circ$  wird nicht verändert. Weitere von der Profilform unabhängige Parameter sind Nabenlage, Auslauform, Oberflächenzustand, Werkstoff, Nabenwandstärke, Nabenlänge etc. Diesbezüglich wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens lediglich die Nabenwandstärke modifiziert. Weitere Einflüsse auf die Tragfähigkeit neben der Verzahnung und der Nabe werden eliminiert.

Nach [DIN 5480] richtet sich die Zahnfußrundung des Bezugsprofils  $\rho_{fp}$  nach dem zur Verzahnungsherstellung genutzten Fertigungsverfahren. In zuvor genannter Norm wird bei der Berechnung zwischen durch Zerspanen sowie durch Kaltwalzen hergestellten Verzahnungen unterschieden, vgl. Abbildung 2.

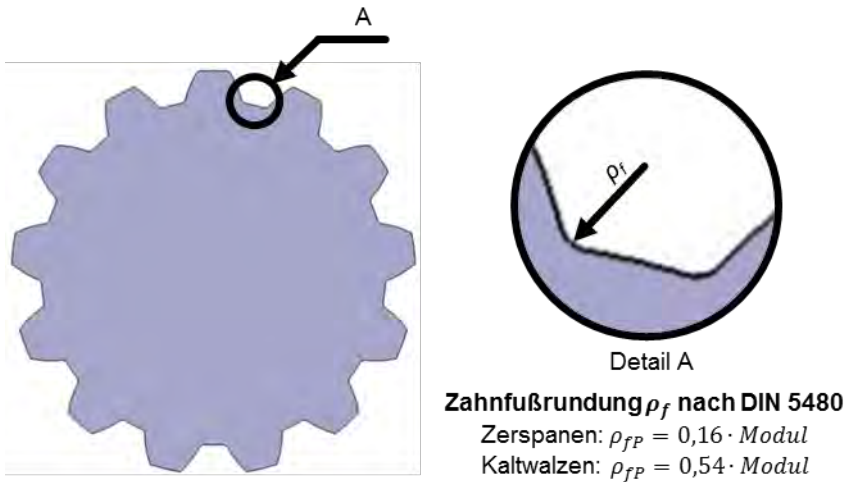


Abbildung 2: Teilausrundung einer evolventischen Zahnwelle nach [DIN 5480] für spanend und kaltgewalzt hergestellte Verzahnungen [FVA 742 I]

Die Zahnfußrundung des Bezugsprofils  $\rho_{fp}$  bildet sich in der Zahnfußrundung der Zahnwelle  $\rho_f$  ab.

Unter anderem im Forschungsvorhaben [FVA 591 I] zeigte sich, dass es spannungstechnisch ein geometrisches Optimum bezüglich der Zahnfußrundung  $\rho_{fp}$  gibt. Dieses liegt zwischen den durch die in Abbildung 2 gegebenen Gleichungen definierten Werten. Als Folge soll bezüglich dieses Parameters im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] von der durch die [DIN 5480] gegebenen Definition abgewichen und das Optimum beim Tragfähigkeitsvergleich zwischen der Evolvente und der Trochoide zugrunde gelegt werden. Vom Radius als Form der Zahnfußrundung wird hingegen nicht abgewichen.

Grundsätzlich entspricht die Geometrie der Standardnabe des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] jener der Vorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II], vgl. Abbildung 3.

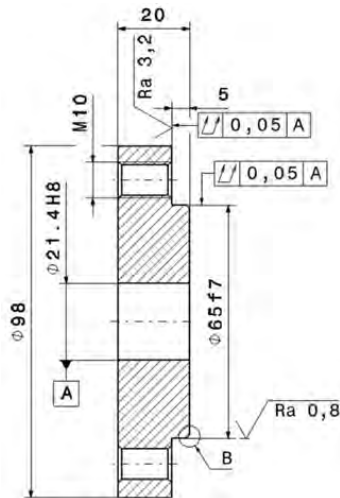


Abbildung 3: Geometrie der standardmäßig in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] genutzten Naben zur experimentell Analyse von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480]

In Rahmen einer Arbeitsgruppensitzung zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden die Untersuchungen um den Aspekt der Analyse des Einflusses der Nabenwandstärke erweitert. Bei entsprechender Praxisnähe wurde festgelegt die Durchmesserhältnisse  $Q_A = \text{Bezugsdurchmesser } d_B / \text{Nabenaußendurchmesser } d_{e2}$  von 0,88; 0,77 sowie 0,66 zu untersuchen.

### **2.3 Evolvente ([DIN 5480], [ISO 4156]) – Bestimmung des Toleranzeinflusses auf die Tragfähigkeit (AP9)**

Die Fertigung von Bauteilen unterliegt systematischen sowie stochastischen Fehlern. Diese Abweichungen führen zu einem zahnspezifischen Tragverhalten. Bei den in Kapitel 2.2 beschriebenen numerischen Untersuchungen findet dies keine Berücksichtigung. Hier wird von vollständiger Symmetrie ausgegangen. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird der Einfluss einer vorgegebenen Passung auf die Tragfähigkeit bestimmt. Arbeitsergebnis ist also die Toleranzempfindlichkeit. Durch einen entsprechenden Empfindlichkeitsabgleich zwischen beiden Profilformen (Evolvente, Trochoide) sind jene Passungen bestimmbar, die zur Realisierung der gleichen Empfindlichkeiten führen. Diese ermöglichen Aussagen zum finanziellen Aufwand zur Fertigung der jeweiligen Profilform.

Bei Zahnwellenverbindungen sind Abweichungen bei Kopf- und Fußkreis, der Profilkurve hinsichtlich Form und Lage, der Teilung sowie der Zahndicke möglich. Dies eröffnet ein enorm großes und modellbildungstechnisch komplex handhabbares Parameterfeld. Nach Rücksprache mit der Arbeitsgruppe wurde festgelegt, dass lediglich die Einflüsse Teilungs- sowie Zahndickenabweichung untersucht werden. Diese werden gleichmäßig über den Umfang verteilt.

Die in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] experimentell untersuchten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] wurden mit der Passung 9H/6g hergestellt. Diese wird der Bestimmung des Toleranzeinflusses auf die Tragfähigkeit als Inhalt des Vorhabens [FVA 742 I] zugrunde gelegt.

### **2.4 Komplexe Trochoide – Experimentelle Untersuchungen zur Validierung numerischer Ergebnisse (AP10)**

Bezüglich numerisch gewonnener Ergebnisse gilt es neben einer Plausibilitätskontrolle auch meist einen Abgleich unter zugrunde legen experimenteller Resultate durchzuführen. Hierdurch wird die Güte der theoretisch gewonnenen Erkenntnisse erhöht. Die richtige Gestaltung von Lagerung, Kraftangriffspunkt, Geometrie vorausgesetzt, kann ein Ergebnisabgleich durch die Anpassung der Steifigkeit im Kontakt zwischen Welle und Nabe erfolgen.

Die Validierung numerischer Ergebnisse hinsichtlich der Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] wird anhand bereits erarbeiteter Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] durchgeführt. Für die komplexen Trochoiden hingegen müssen diese Daten erst erhoben werden. Basierend auf den durch die westsächsische Hochschule Zwickau definierten Geometrien erfolgt diesbezüglich die Versuchsdurchführung durch das Institut für Maschinenwesen.





Hauptanwendungsfall einer Welle-Nabe-Verbindung ist die Übertragung eines Torsionsmomentes. Hieraus resultierend werden experimentelle Untersuchungen

bei statischer sowie dynamischer Torsion durchgeführt. In der Praxis kommt es jedoch häufig zu einer Überlagerung der zu übertragenden Torsion mit einer (Umlauf-)Biegung. Dies kann beispielsweise aus der Radialkomponente einer Stirnverzahnung oder aber aus Achs- bzw. Winkelversatz in Zusammenspiel mit einer statisch unbestimmten Lagerung resultieren. Auf diesem Sachverhalt basierend werden ebenfalls experimentelle Untersuchungen bei statischer Torsion sowie dynamischer Biegung in Kombination durchgeführt.

Für einen Tragfähigkeitsnachweis beispielsweise nach [DIN 743] oder aber der FKM-Richtlinie sind bei kombinierter Belastung (Biegung, Torsion) beide Form- bzw. Kerbwirkungszahlen erforderlich. Folglich gilt es diese Faktoren für den Lastfall der reinen Biegung zu bestimmen, obwohl dieser nicht der übliche Anwendungsfall von Profilverbindungen ist. Hierzu sind dynamische Biegeuntersuchungen vorgesehen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FVA 742 I werden eine für den Anwendungsfall Schiebesitz und eine für den Fall Festsitz optimierte Geometrie untersucht. Die schiebesitzoptimierte Variante wird bei den Lastfällen statische sowie dynamische Torsion, statische Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung und dynamische Biegung untersucht (Horizontalvergleich). Die für den Fall des Festsitzes optimierte Geometrie wird lediglich bei dynamischer Torsion analysiert (Vertikalvergleich). Folglich ergibt sich das in Tabelle 1 gezeigte Versuchsprogramm.

Tabelle 1: Versuchsprogramm des Forschungsvorhabens [FVA 742 I]

	
<p align="center"><b>Statische Torsion</b> (Schiebesitz, 8 Prüflinge)</p>	<p align="center"><b>Dynamische Torsion</b> (Schiebe- sowie Festsitz, je 8 Prüflinge)</p>
	
<p align="center"><b>Dynamische Biegung</b> (Schiebesitz, 8 Prüflinge)</p>	<p align="center"><b>Dynamische Biegung in Kombination mit statischer Torsion</b> (Schiebesitz, 8 Prüflinge)</p>



### 3 Zusammenfassung

Zur Verbindung von Wellen und Naben finden in der Praxis häufig Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] Anwendung. Hier ist die Entwicklung zu beobachten, dass immer höhere Torsionsmomente bei unverändert zu belassendem oder gar zu verkleinerndem Bauraum übertragen werden sollen. Kerbwirkungsbedingt gelangen Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] immer häufiger an ihre Tragfähigkeitsgrenzen. Schwachstelle ist hierbei die kerbwirkungskritische Stelle der Zahnfußrundung an der Nabenkante. Als Lösung für dieses Problem kann, neben diverser anderer Möglichkeiten zur Tragfähigkeitsoptimierung, eine neue Profilform dienen.

Eine Möglichkeit zur Erarbeitung einer neuen Profilform ist die Anwendung der Berechnungsmethodik der komplexen Trochoiden. Diesbezüglich ist es Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] eine Abschätzung des Potentials einer neuen aus dieser Berechnungsmethodik hervorgehenden Profilform vorzunehmen. Hierfür werden Evolvente und Trochoide einander Gegenübergestellt. Der Vergleich beider Profilformen wird ganzheitlich durchgeführt. Er beschränkt sich folglich nicht nur auf die Gegenüberstellung der Tragfähigkeiten, sondern auf alle an eine Profilhelle gestellten Anforderungen. Zu diesem Zweck wird als Bewertungsgrundlage eine Anforderungsliste ausgearbeitet. Hinsichtlich des ökonomischen Prinzips gilt es hierbei insbesondere die Wirtschaftlichkeit zu benennen.

Wesentlicher Bestandteil der zu betrachtenden Aspekte beider Profilformen (Evolvente, Trochoide) ist die jeweilige Tragfähigkeit. Diesbezüglich gilt es für beide Verbindungen bei vorgegebenem Bauraum das Maximum für den Lastfall der reinen Torsion zu ermitteln. Bezüglich der Zahnwellen nach [DIN 5480] sind hierbei hinsichtlich der Zahnfußrundung  $\rho_{\text{ff}}$  Abweichungen von der Norm vorgesehen. Unter anderem im Verlauf der Bearbeitung des Forschungsvorhabens [FVA 591 I] haben numerische Untersuchungen gezeigt, dass die in der Norm definierten Radien nicht zum optimalen Tragverhalten einer Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] führen.

Alle Fertigungsprozesse unterliegen Abweichungen. Im Fall von Profilhellenverbindungen führen diese zu einem ungleichen Tragverhalten der Zähne über dem Umfang. Dies resultiert in zahnspezifischen Beanspruchungen. Die kritische Stelle beschränkt dabei den Einsatz der jeweiligen Verbindung. In Abhängigkeit der spezifischen Profilform wird erwartet, dass die gleiche Toleranz sich unterschiedlich stark auf die Spannung der höchstbelasteten Stelle auswirkt. Die Empfindlichkeit beider Verbindungen wird also unterschiedlich sein. Im Gegensatz zum bloßen Spannungsvergleich ist unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung folgendes Vorgehen geplant: Bei gegebener Passung wird die Empfindlichkeit einer Profilform bestimmt. Bezüglich der zweiten Profilform wird durch Anpassung der Toleranz die gleiche Empfindlichkeit realisiert. Die hierfür

erforderlichen bzw. fertigungstechnisch einzuhaltenden Toleranzen liefern Aufschluss über den monetär bewertbaren Fertigungsaufwand.

Bezüglich der komplexen Trochoiden gibt es bislang keine experimentellen Untersuchungen. Somit ist keine Validierung etwaig entstandener numerischer Analysen möglich. Hier wird im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] Abhilfe geleistet. Im Einzelnen werden experimentelle Untersuchungen bei statischer und dynamischer Torsion, bei statischer Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung sowie bei dynamischer (Wechsel-)Biegung durchgeführt.

#### 4 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens unter der Nummer AiF 18406 BG.

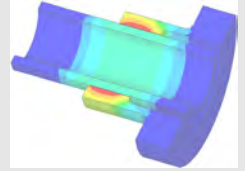
#### 5 Formelzeichen

$d_B$	Bezugsdurchmesser
$d_{e2}$	Nabenaußendurchmesser
$m$	Modul
$Q_A$	Durchmesserverhältnis
$z$	Zähnezahl
$\rho_f$	Zahnfußrundung der Zahnwelle
$\rho_{fp}$	Zahnfußrundung des Bezugsprofils

## 6 Literatur

- [DIN 743] Norm DIN 743, 2012-12-00. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- [DIN 5480] Norm DIN 5480, 2006-03-00. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser
- [ISO 4156] Norm ISO 4156, 2005-10-00. Passverzahnungen mit Evolventenflanken
- [FVA 467 I] Daryusi, A. ; Lau, P.: Profilverwellen-Kerbwirkung: Ermittlung der Kerbwirkung bei Profilverwellen für die praktische Getriebeberechnung von Zahnwellen. Forschungsvorhaben Nr. 467 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 14058 BG). Frankfurt/Main, 2009 (FVA-Heft 905)
- [FVA 467 II] Wendler, J.; Wild, J.: Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen: Tragfähigkeit von Profilverwellen (Zahnwellenverbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen. Forschungsvorhaben Nr. 467 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 16661 BG) noch nicht veröffentlichter Abschlussbericht
- [FVA 591 I] Biansompa, E.; Schäfer, G.: Zahnwellenberechnung: FVA-Berechnungsrichtlinie für Zahnwellen-Verbindungen. Forschungsvorhaben Nr. 591 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., Frankfurt/Main, 2015 (FVA-Heft 1139)
- [FVA 742 I] Selzer, M.; Wild, J.: Forschungsreport 2015 zum Forschungsvorhaben Nr. 742 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 18406 BG). In: FVA (Hrsg.): Forschungsreport 2015 (2015)

Konstruktion und Berechnung von  
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und  
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik  
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte





## Bewertung der recyclinggerechten Gestaltung von Konstruktionen und Produkten



Kirchner, J.-S.; Prumbohm, M.

*Die Recyclingeignung eines Bauteiles, einer Baugruppe oder eines Produktes lässt sich durch verschiedene Maßnahmen im Laufe des Konstruktionsprozesses steigern. Diese werden gesammelt, aufgelistet und hinsichtlich Faktoren wie der Umsetzbarkeit und des Verbesserungspotentials bewertet. Diese Einordnung bildet die Grundlage für ein Bewertungsverfahren, mit dem sich die Produktgestaltung zügig und vergleichsweise präzise hinsichtlich ihrer Recyclingeignung beurteilen lässt. Das Bewertungsverfahren wird an Hand eines konstruktiven Beispiels mit eingeschränkter Recyclingeignung demonstriert. Die vorgestellten Maßnahmen zur Verbesserung der Recyclingeignung werden an diesem Beispiel angewendet und die Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen werden mit Hilfe der Bewertungsmethode deutlich erkennbar.*

*The recycling suitability of a component, a module or a product can be enhanced through various measures during the construction process. These measures are collected, listed and evaluated in reference to factors such as the feasibility and the potential for improvement of the recycling suitability. With this classification an evaluation procedure is developed which gives us an easy, quick and comparatively accurate overview of the current recycling suitability of a product. The evaluation process is demonstrated by a constructive example with a restricted recycling suitability. The effect of the taken steps is determined by the evaluation method clearly.*

### Recyclinggerechte Produktgestaltung

Die Bedeutung der Gewinnung von Sekundärrohstoffen, also dem Recycling von Produkten am Ende des Lebenszyklus, gewinnt seit Jahren an Bedeutung. Die dabei entstehenden Kosten werden von der konstruktiven Gestaltung der Produkte stark beeinflusst. Vor der Betrachtung von Gestaltungsrichtlinien, die das Recycling der Produkte begünstigen, wird der Begriff des Recyclings betrachtet.

Bei dem Begriff des Recyclings handelt es sich um ein Lehnwort aus dem Englischen, das sich wiederum aus der lateinischen Vorsilbe „Re-“, (zurück) und dem griechischen Wort für Kreis (kyklos) zusammensetzt. Daher wird im Deutschen der Begriff der Rezyklierung passend verwendet. Laut VDI-Richtlinie 2243 versteht man unter dem Begriff des Recyclings die „erneute Verwendung

oder Verwertung von Produkten oder Teilen von Produkten sowie Werkstoffen in Form von Kreisläufen“ /1/.

Entsprechend zu dieser Definition lassen sich in einem nächsten Schritt die verschiedenen Recyclingarten in Abhängigkeit der Beibehaltung der Produktgestalt gliedern, s. Abbildung 1. Der Begriff des Produktrecyclings umfasst dabei die Verwendung von Produkten als Gebrauchtware für denselben (Wiederverwendung) oder einen anderen (Weiterverwendung) Verwendungszweck. Daneben beinhaltet das Materialrecycling die Verwertung der im Produkt enthaltenen Stoffe im gleichen Produktionsprozess wie bei der Produktentstehung (Wiederverwertung) oder der Verwertung in einem weiteren Produktionsprozess (Weiterverwertung).

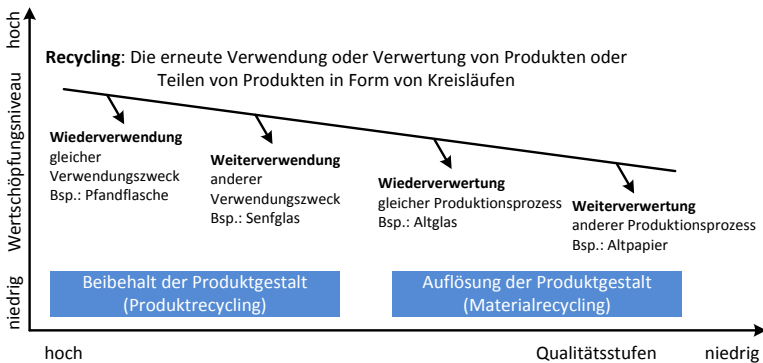


Abbildung 1: Übersicht der Recyclingarten in Abhängigkeit von der Beibehaltung der Produktgestalt und dem Wertschöpfungsniveau /2/

Die Gestaltung der Produkte beeinflusst sowohl das Produktrecycling, als auch das Materialrecycling. Die Gliederung der Maßnahmen zur recyclinggerechten Produktgestaltung entsprechend dieser Anordnung bietet sich an. Der Konstruktionsprozess lässt sich damit gezielt auf einen langen Produktlebenszyklus (Maßnahmen für das Produktrecycling) oder auf eine erleichterte Verwertbarkeit der verwendeten Materialien (Maßnahmen für Materialrecycling) ausrichten. Dabei können die Maßnahmen, die ein Produktrecycling begünstigen, auch einen positiven, sekundären Effekt auf das Materialrecycling aufweisen. Diese Zusammenhänge werden in der folgenden gegliederten Auflistung in den Anmerkungen berücksichtigt.

### Produktrecycling

Verwendung lösbarer Verbindungselemente: Erleichtern die Demontage und damit die Reparatur defekter Bauteile. Eine Verlängerung des Lebenszyklus ist die Folge. Das Materialrecycling wird ebenfalls begünstigt, die zügige und damit

günstige endgültige Demontage erleichtert die Separierung der Bauteile nach Werkstoffen. Beispiel: Schnappverbindungen wie beispielsweise Biegefedern /3/.

Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen und erleichterte Zugänglichkeit von Verbindungselementen: Analog zur Verwendung ausschließlich leicht lösbarer Verbindungselemente hat die Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen vergleichbare Auswirkungen. Beispiele: einzelnes, zentrales Verbindungselement für Zahnriemenabdeckungen /4/; Radmuttern im Motorsport /5/.

Verwendung alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente: Neben der Reduzierung der Verbindungselemente verlängert auch die Verwendung von alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente die Dauer des Lebenszyklus der Produkte und Bauteile. Beispiele: Schraubverbindungen mit aufgesteckten Kunststoffkappen oder isolierende Materialien zwischen zu verbindenden Bauteilen /6/.

Standardisierung von Bauteilen und Verbindungselementen: Durch die Nutzung von Standardteilen lässt sich der Montage- und Demontageaufwand verringern. Dies kann durch den erleichterten Austausch von Bauteilen zu einer verbesserten Wiederverwendung des Produktes führen. Ebenfalls wie die Verwendung leicht lösbarer Verbindungselemente, lässt sich das Materialrecycling durch diese Maßnahme und die daraus folgende erleichterte Demontierbarkeit ebenfalls verbessern. Beispiel: einheitliche Schraubenart und –größe im gesamten Produkt.

Aufbau von Baugruppen auf einem Basisbauteil und Bildung von variantenneutralen Baugruppen: Der leichte Austausch von Produktbestandteilen erleichtert die Wiederverwendung und verlängert den Lebenszyklus des Produktes. Eine spätere Verwertung wird ebenfalls erleichtert, die Baugruppen werden getrennt bzw. das Basisteil ist separierbar und kann gezielt dem Materialrecycling zugeführt werden. Beispiele: Modular aufgebautes Smartphone „Project Ara“ /7/; Modulares Kamerasystem „ALPA-12“ /8/.

Leichte Separierbarkeit wiederverwendbarer Baugruppen und unvermeidbarer Gift- und Gefahrstoffe: Lassen sich Gift- und Gefahrstoffe oder auch Baugruppen mit Verbrauchsmaterial einfach demontieren und ersetzen, verlängert sich der Produktlebenszyklus des Produktes erheblich. Gleiches gilt für wiederverwertbare Bauteile. Die entnommenen Bauteile und –gruppen lassen sich gezielt einer entsprechenden Weiterverwendung oder einer Verwertung der Materialien zuführen. Beispiele: Ölfilter mit wechselbarem Filtereinsatz /3/; Separate Tonerkassette bei Laserdruckern /9/.

Bereitstellung von Demontageinformationen und Informationen zur Wiederverwendung: Die Bereitstellung von Demontageinformationen oder Informationen zur Wiederverwendung durch den Hersteller erleichtert Reparaturen durch den Anwender, wodurch jedoch der Anspruch auf Gewährleistung meist verloren geht. Neben dieser Verbesserung auf Produktebene erleichtern Demontageinformationen für Entsorgungsbetriebe die Entnahme von Gebrauchtteilen



sowie die Sortierung der Bauteile entsprechend der verwendeten Materialien. Beispiele: International Dismantling Information System (IDIS) für PKW /10, 11/; iFixit-Internetdatenbank /12/.

Ermöglichung der Bauteilauferarbeitung: Die geplante Aufarbeitung von abgenutzten Baugruppen und -teilen ermöglicht die Wiederverwendung eines Produktes. Beispiele: runderneuerte Autoreifen /13/; Motor- und Getriebegehäuse /3/.

### *Materialrecycling*

Einheitliche und geradlinige Füge- und Trennrichtung: In erster Linie wird die Demontage am Ende des Lebenszyklus erleichtert. Aber auch der Austausch von Ersatzteilen und damit die Reparatur und die daraus folgende Wiederverwendung werden damit erleichtert. Beispiele: Kaffeemaschine /6/; Bürostuhl /3/.

Abwägung zwischen Integral- und Differentialbauweise: Mit der Integralbauweise ist die Zusammenfassung verschiedener Funktionen in einem Bauteil gemeint. Werden verschiedene Funktionen mit einem Bauteil aus einem Werkstoff bzw. möglichst wenigen Werkstoffen erfüllt, begünstigt dies das Materialrecycling. Die Differentialbauweise hingegen kann die recyclinggerechte Produktgestaltung hinsichtlich einfacher Demontierbarkeit durch lösbare Verbindungen und einfacher Separierbarkeit der Werkstoffe oder wiederverwendbarer einzelner Bauteile verbessern. Beispiele: Schraube mit integrierter Unterlegscheibe /6/; Integralbauweise im modernen Flugzeugbau /14/.

Erleichterte zerstörende Demontage: Im Laufe des für das Materialrecyclings grundlegenden Zerkleinerungsprozesses werden Bauteile an konstruktiv definierten Stellen voneinander getrennt. Werkstoffe lassen sich anschließend leichter trennen und verwerten. Beispiele: Sollbruchstellen, z.B. an PKW-Stoßfängern /3/.

Verwendung stofflich verwertbarer und nachwachsender Materialien: Diese lassen sich vollständig verwerten und in einigen Fällen wiederverwenden /3/. Beispiel: Naturfasern im PKW /15/.

Verringerung der Werkstoffvielfalt: Je mehr Werkstoffe in den einzelnen Bauteilen verwendet werden, desto größer ist der Aufwand zur Sortierung und Klassierung dieser. Eine Verringerung der Werkstoffvielfalt erleichtert die Verwertung der Stoffe im Anschluss an die Produktzerkleinerung. Beispiel: Toastauswurf ohne Nietverbindungen /16/.

Vermeidung unverträglicher Werkstoffkombinationen: Eine hohe Anzahl verschiedener Werkstoffe in einem Produkt hat häufig Werkstoffpaarungen zur Folge, die für das Recycling ungeeignet sind. Sind diese im Konstruktionsprozess bekannt und können durch Werkstoffsubstitution vermieden werden, verbessert dies die Möglichkeiten des Materialrecyclings deutlich. Beispiele für unverträgliche Werkstoffkombinationen: Verbundwerkstoffe wie glasfaserverstärkte Kunststoffe oder unverträgliche Kunststoffe (PE & PET beispielsweise) /6/.

Verwendung von Rezyklaten: Werden Werkstoffe verwendet, die sich wieder- bzw. weiterverwerten lassen, verbessert dies das Materialrecycling. Die gezielte Verwendung von Sekundärrohstoffen bietet neben einer Kostensenkung im Vergleich zu Primärrohstoffen auch den Reiz einer Kreislaufwirtschaft. Die verwendeten Rezyklaten können mit der Verwertung des neuen Produktes wieder zurück in den Kreislauf gehen. Beispiele: Wiederverwertung von Polyamid, beispielsweise in Handgriffen /3/; Zerkleinerte Duroplaste als Füllmaterial /3/.

Bereitstellung von Werkstoffinformationen: Bei Kunststoffbauteilen wird die präzise Kennzeichnung des verwendeten Werkstoffes bereits angewendet und erleichtert somit die Sortierung und eine Verwertung der Stoffe. Indirekt ist eine Kennzeichnung in der Stückliste möglich und üblich.

### Bestehende Bewertungsmethoden

Während der Produktentwicklung werden Bewertungsmethoden angewandt, welche die Recyclingeignung von Bauteilen, Baugruppen oder Gesamtprodukten erfassen und damit eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Varianten zulassen. Im Folgenden werden drei bestehende Bewertungsmethoden aufgelistet und erläutert.

#### Checklisten nach VDI-Richtlinie 2243 „Recyclingorientierte Produktentwicklung“

Einfache und grobe Checklisten dienen vor allem dazu, die Umsetzung möglichst vieler Maßnahmen und Richtlinien zur Erstellung recyclinggerechter Produkte zu kontrollieren, eventuell den Umsetzungsgrad zu bewerten und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Das Bauteil, die Baugruppe oder das Gesamtprodukt wird hinsichtlich Recyclingkriterien betrachtet und eingeschätzt, siehe Abbildung 2.

Technische Recycling-Kriterien	Bewertung	Optimierungs-Potenzial durch
Stoffliche Verwertbarkeit	recyclingfähig, gleiche Eigenschaften	keine Optimierung nötig
	recyclingfähig, mindere Eigenschaften	Einsatz höherwertigerer Werkstoffe prüfen
	nicht verwertbar, Beseitigung nötig	recyclingfähige Werkstoffe verwenden
Verwertungs-kompatibilität	kompatibel, gleiche Eigenschaften	keine Optimierung nötig
	kompatibel, mindere Eigenschaften	eventuell Stoffvielfalt optimieren
	nicht kompatibel	verträgliche Werkstoffe verwenden
Identifizierbarkeit	eindeutig, einfach, maschinenlesbar	keine Optimierung nötig
	gut separierbar, keine Kennzeichnung	mindestens Kennzeichnung vorsehen
	nicht möglich, keine Kennzeichnung	vermeiden, Kennzeichnung vorsehen
Recyclingkritische Stoffe	nicht vorhanden	keine Optimierung nötig
	vorhanden, gekennzeichnet, gut separierbar	dauerhaft gute Lesbarkeit sichern
	vorhanden, unseparierbar, Beseitigung nötig	vermeiden, Kennzeichnung und Demontage vorsehen
Schad- und Gefahrstoffe	nicht vorhanden	keine Optimierung nötig
	vorhanden, gut separierbar	mindestens Kennzeichnung vorsehen
	vorhanden, unseparierbar, Beseitigung nötig	vermeiden, Kennzeichnung und Demontage vorsehen

Abbildung 2: Checkliste für die Abschätzung des Optimierungsbedarfes hinsichtlich der Recyclinggerechten Gestaltung nach VDI-Richtlinie 2243

Für jedes technische Produkt ergeben sich beim Durchlaufen und Einordnen der Kriterien eine Reihe von Handlungsempfehlungen, die nach ihrer Umsetzung dazu beitragen, dass Produkt recyclinggerechter zu gestalten.

### Gleichungsbasierte Ermittlung der Komponenten-Kreislaufeignung nach VDI 2243

Neben der Nutzung von Checklisten zur Bewertung der Recyclingeignung sieht die VDI-Richtlinie auch die ökonomische Analyse mit Hilfe rechnerisch ermittelter Recyclingkriterien vor, siehe Abbildung 3.

*Gleichung:*

$$KE_K = \frac{\text{Kosten Neuteil} + \text{Beseitigungskosten in €}}{\text{Recycling-Kosten Altteil in €}} \quad ($$

*Erklärung:*  $\text{Kosten Altteil} = \text{Kosten (Demontage + Aufarbeitung + Logistik)}$

**Die Komponente ist kreislaufgeeignet, d.h. wirtschaftlich wiederverwertbar, wenn  $KE_K > 1$  ist.**

*Beispiel:*

Schrittmotor, Gewicht 1 kg: (verwendete Werte unterliegen den Marktschwankungen)

Demontageschritte:	12 Schrauben lösen à 3,0 s = 36,0 s = - 0,37 €
	3 Stecker abstecken à 1,5 s = 4,5 s = - 0,05 €
	3 Teile entnehmen à 4,0 s = 12,0 s = - 0,12 €
Aufbereitung (Reinigung, Prüfung, usw.)	= - 5,11 €
Logistik (Registrierung, Transport, Vereinnahmung)	= - 0,51 €
Neuteil	= -15,34 €
Beseitigung (Metallerlös)	= + 0,31 €

*Rechnung:*

$$KE_K = \frac{(-15,34) + 0,31 \text{ in €}}{(-0,37) + (-0,05) + (-0,12) + (-5,11) + (-0,51) \text{ in €}} = 2,44$$

*Ergebnis:* Für dieses Beispiel ist es sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht besser, den vorhandenen Schrittmotor aufzuarbeiten und erneut zu verwenden.

Abbildung 3: Berechnung der Komponenten-Recyclingeignung

Anhand der Gleichung zur Komponenten-Kreislaufeignung  $KE_K$  lässt sich berechnen, ob für ein definiertes Gerät, Bauteil oder eine Baugruppe die Aufarbeitung und erneute Verwendung wirtschaftlich sinnvoll ist. Dabei wird die Summe der Beseitigungskosten der vorhandenen, sowie die Beschaffungskosten der neuen Komponente im Verhältnis zu den Kosten der Aufarbeitung zur Weiternutzung der vorhandenen Komponente gesetzt. Eine Kreislaufeignung ergibt sich, wenn der berechnete Wert größer 1 ist. Analog ist auch eine Berechnung der Material-Kreislaufeignung möglich /16/. Diese Kennzahlen dienen der Bewertung des Gesamtproduktes in Hinblick auf dessen Recyclingeignung und ermöglichen auch eine Vergleichbarkeit von Komponenten und Materialien.

### Ökobilanz nach ISO 14040

Die Erstellung von Ökobilanzen ist in den Normen nach DIN EN ISO 14040 ff. einheitlich beschrieben. Die Methodik ist aufwendig, da Daten des gesamten Produktlebenszyklus für Baugruppen und Produkte ermittelt werden müssen. Es werden alle Umwelteinwirkungen des jeweiligen Produkts, die während des gesamten Lebensweges (from cradle to grave/ von der Wiege zur Bahre)

beispielsweise durch Gewinnung von Rohstoffen, Energieerzeugung, Transport, Herstellung von Betriebsstoffen und Abfallbeseitigung entstehen, betrachtet /17/. Zur anschließenden quantitativen Bewertung der Ökobilanz können wiederum verschiedene Verfahren wie der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, der kumulierte Energieaufwand oder virtuelles Wasser genutzt werden. Abbildung 4 zeigt den methodischen Aufbau von Ökobilanzstudien gemäß ISO-Norm 14040.

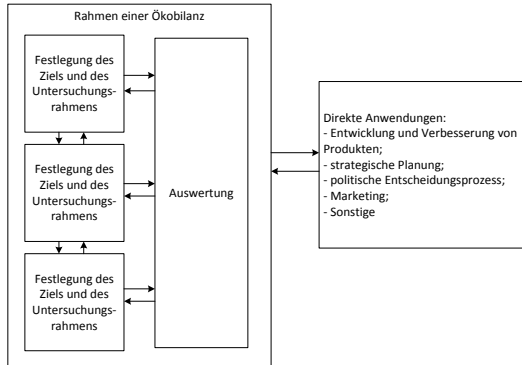


Abbildung 4: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

Bei der vorgestellten Untersuchung der Recyclingeignung von Bauteilen, Baugruppen oder Gesamtprodukten kann die Ökobilanz detailliert Aufschluss darüber geben, in welchen Lebensabschnitten Umweltbelastungen auftreten, sodass darauf während der Produktentwicklung Rücksicht genommen werden kann.

### Entwicklung einer Bewertungsmethoden

Die drei vorgestellten Bewertungsmethoden sind entweder einfach gehalten (Checklisten), aufwendig in der Aufstellung (Öko-Bilanz) oder beruhen auf einer Abschätzung der anfallenden Kosten bei der Beseitigung (Berechnung nach VDI 2243). Ziel einer Entwicklung einer eigenen Bewertungsmethode soll daher eine einfache, aber möglichst präzise Einschätzung der Recyclingeignung des aktuellen Standes der Produktgestaltung im Konstruktionsprozess sein. Als geeignet wird hierfür eine Prozentzahl angesehen, wobei 0 % eine völlig unzureichende Recyclingeignung darstellt und 100 % eine Ideallösung hinsichtlich der Recyclingeignung kennzeichnet. Um eine solche Prozentzahl zu generieren, werden die vorgestellten Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingeignung hinsichtlich ihrer Umsetzung in einer konkreten Bauteil- oder Produktgestaltung bewertet. Ist beispielsweise die Verwendung von Standardbauteilen vorgesehen? Entsprechend der Antwort wird die Umsetzung dieser

Maßnahme bewertet. Die Einzelbewertungen ergeben schließlich die Gesamtbewertung in Form einer Kennzahl.

Diese Kennzahl soll einfach und zügig aufzustellen sein und für den Konstrukteur einen Anhaltspunkt über den aktuellen Stand der Recyclingeignung geben und damit Ausgangsbasis für eine weitere Maßnahmenauswahl sein.

Als Grundlage werden die vorgestellten konstruktiven Maßnahmen hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit (Gewichtungsfaktor 4), dem Umsetzungsaufwand (Gewichtungsfaktor 2), dem Verbesserungspotential (Gewichtungsfaktor 4) sowie der Kombinierbarkeit (Gewichtungsfaktor 1) mit anderen Maßnahmen bewertet. Diese gewichtete Bewertung ergibt in der Summe eine Gewichtungspunktzahl  $G_i$  für jede einzelne Maßnahme.

In einem ersten Schritt wird bestimmt, welche der Maßnahmen sinnvoll auf das jeweilige Produkt anwendbar sind. So kann beispielsweise eine leichte Separierbarkeit von Gift- und Gefahrstoffen nur umgesetzt werden, wenn überhaupt Gift- und Gefahrstoffe verbaut sind. Die Gewichtungspunktzahlen  $G_i$  aller durchführbaren Maßnahmen  $i$  ergeben in der Summe die Zahl  $P_G$ :

$$P_G = \sum G_i \quad 1.1$$

Anschließend wird jede einzelne Maßnahme hinsichtlich der Umsetzung im aktuellen Zustand vom Konstrukteur mit einer Punktzahl von 0 bis 4 Punkten bewertet. Einer optimalen entsprechen 4 und einer komplett fehlenden Umsetzung entsprechen 0 Punkte. Diese Punktzahl wird mit dem Faktor  $\eta_r$  multipliziert, welcher sich nach folgender Formel berechnet:

$$\eta_r = \frac{G_i}{4 \cdot P_G} \quad 1.2$$

Das prozentuale Bewertungsergebnis der jeweiligen Maßnahme ergibt sich durch das Produkt der vergebenen Punkte mit dem Faktor  $\eta_r$ .

### **Anwendung des Bewertungsverfahrens**

Das Vorgehen der Bewertung der Recyclingeignung von Bauteilen und Produkten wird im Folgenden beispielhaft für einen Tablet-PC durchgeführt:

Beim iPad Air des Herstellers Apple handelt es sich um ein Verbraucher-elektronikgerät aus der Produktklasse der Tablet-Computer. Diese zeichnen sich vor allem durch eine besonders kompakte Bauweise und ein berührungsfähiges Display aus, das nahezu die gesamte Vorderseite des Produkts einnimmt. Trotz der Neuheit dieses Produkts sind vor allem die Möglichkeiten zur Demontage

aufgrund der Verwendung von Klebeverbindungen besonders schlecht. So sind das Display und auch der im Inneren des Geräts befindliche Akkumulator mittels eines Klebstoffs mit dem Aluminiumgehäuse verbunden. Das in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Öffnen des Geräts zum Austausch von Komponenten ist nur unter sehr hohem Aufwand möglich. Dazu muss eine gezielte Erhitzung des Klebstoffs erfolgen und das abgebildete spezielle Werkzeug verwendet werden. /18/



Abbildung 5: Öffnung des iPad Air /18/

Mit diesen Eigenschaften verstößt der Aufbau des iPad Air nicht nur wie viele Wettbewerber auch gegen die per EU-Richtlinie zum Umgang mit Elektronikschrott geforderte, problemlose Austauschbarkeit von Akkumulatoren. Der Aufbau erschwert durch die aufwändige Demontage außerdem die Wieder- und Weiterverwendung wertvoller Bauteile, wie zum Beispiel des hochauflösenden Bildschirms und des Prozessors. Die Recyclingeignung des Produktes ergibt sich mit dem entwickelten Bewertungsverfahren zu knapp 46 %, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Vorgehensweise zur Bewertung der Recyclingeignung eines frei im Handel erhältlichen Tablet-Computers

$G_i$	Titel der Maßnahme	Punkte	$\eta_r$	Ergebnis
<i>Produktrecycling</i>				
38	Verwendung lösbarer Verbindungselemente	1	0,013	1,33
33	Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen	3	0,011	3,48
39	Erleichterte Zugänglichkeit von Verbindungselementen	0	0,013	0
36	Verwendung alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente	3	0,012	3,78
41	Standardisierung von Bauteilen und Verbindungselementen	2	0,014	2,88
34	Aufbau von Baugruppen auf einem Basisbauteil	3	0,011	3,57
42	Bildung von variantenneutralen Baugruppen	3	0,014	4,41

34	Leichte Separierbarkeit wiederverwendbarer Baugruppen	1	0,011	1,19
28	Leichte Separierbarkeit unvermeidbarer Gift- und Gefahrstoffe	1	0,009	0,98
37	Bereitstellung von Demontageinformationen und Informationen zur Wiederverwendung	0	0,013	0
31	Ermöglichung der Bauteilaufarbeitung	1	0,010	1,09
Zwischensumme Produktrecycling:			22,71 %	
<i>Materialrecycling</i>				
39	Einheitliche und geradlinige Füge- und Trennrichtung	4	0,014	5,48
43	Abwägung zwischen Integral- und Differentialbauweise	3	0,015	4,53
38	Erleichterte zerstörende Demontage	2	0,013	2,66
36	Verwendung stofflich verwertbarer und nachwachsender Materialien	3	0,013	3,78
43	Verringerung der Werkstoffvielfalt	1	0,015	1,51
33	Vermeidung unverträglicher Werkstoffkombinationen	1	0,012	1,16
40	Verwendung von Rezyklaten	2	0,014	2,8
47	Bereitstellung von Werkstoffinformationen	1	0,016	1,65
Zwischensumme Materialrecycling:			23,57 %	
Gesamtsumme Recyclingeignung der Konstruktion:			46,28 %	

Bei der konstruktiven Verbesserung ist zu beachten, dass die stark eingeschränkten Möglichkeiten zur Reparatur beim betrachteten und bei vergleichbaren Modellen im Interesse des Herstellers sind. Der Verkauf neuer Produkte ist lukrativer, als die Bereitstellung von Reparaturinformationen und der Verkauf von Ersatzteilen. So zeigt eine Untersuchung der Demontageeignung aktueller Tablet-Computer verschiedener Hersteller aus dem Jahr 2014, dass keines der betrachteten Geräte einen speziellen Öffnungsmechanismus für Reparaturzwecke besitzt /19/. Dieses Vorgehen ließe sich nur unterbinden, in dem die Hersteller von Elektronikprodukten durch gesetzliche Vorgaben zur Bereitstellung von Demontage- und Reparaturinformationen und zu einer demontagerechten Auslegung ihrer Produkte verpflichtet werden.

In diesem Fall könnte die in Abbildungen 6 und 7 dargestellte Möglichkeit zur Verbindung der oberen Glasscheibe mit dem Gehäuse (Pos. 1) eingesetzt werden. Dabei wird die Klebeverbindung zur Verbindung des Displayglases mit dem Gehäuse durch eine Kombination aus der formschlüssig mit dem Gehäuse verbundenen Glasabdeckung (Pos. 3) und Schnappverbindungen zu ersetzen. Da die Schnappverbindungen nicht direkt in der Glasscheibe integriert werden können, befinden sie sich an einem weiteren Bauteil, welches ebenfalls formschlüssig mit der Glasabdeckung verbunden ist und auch die Elektronik der berührungsempfindlichen Scheibe ins Innere des Geräts führt. Die Abdichtung des

Gehäuses gegenüber Staub und Wasser kann anstatt durch den Klebstoff mit einer umlaufenden Gummidichtung (A) erfolgen. Zur Montage werden Glasscheibe und das Bauteil mit den Schnappverbindern zusammengesteckt und die Oberkante der Glasscheibe (B) in die dafür vorgesehene Nut an der Oberkante des Gehäuses (C) geführt. Durch Herunterdrücken der Scheibe und das Einrasten der Schnappverbindungen (D) wird die Scheibe fixiert. Dabei sorgen die in das Gehäuse eingebrachte Nut (F) und ihr Gegenstück am Verbindner für eine Zentrierung. Durch Lösen der Schnappverbindungen mittels der beiden an der Gehäuseunterseite angebrachten Ausfräsungen (E) kann die Scheibe wieder leicht demontiert werden.

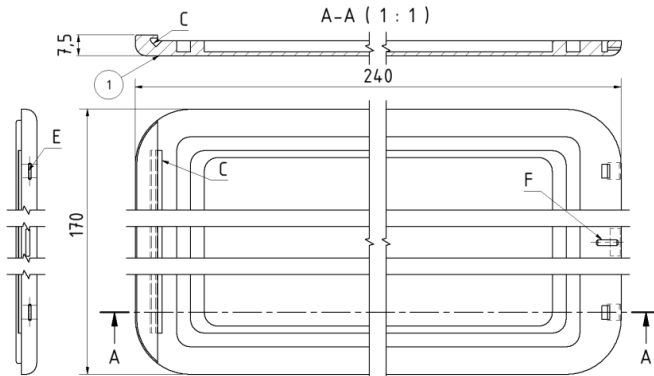


Abbildung 6: Gehäuse eines recyclinggerechten Tablet-PCs

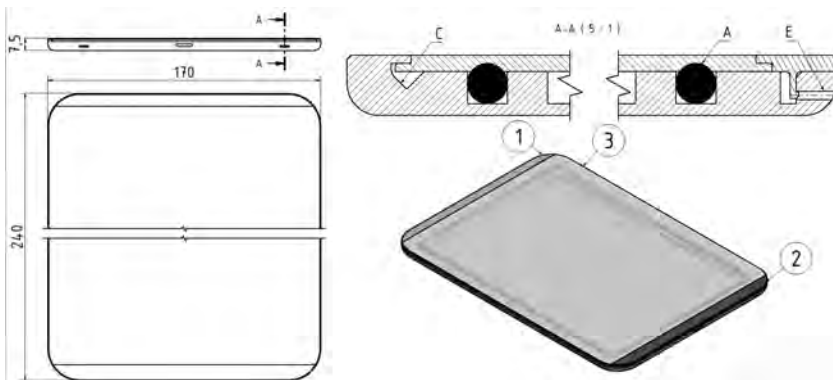


Abbildung 7: Verbesserter Tablet-PC im zusammengebauten Zustand

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Konstruktion bzw. die Auswirkungen auf die Recyclingeignung von Tablet-Computern sind in Tabelle 2 grün markiert. Der



Entwurf für eine verbesserte Konstruktion bietet mit dem Ergebnis von knapp 74 % eine Steigerung der Recyclingeignung von über 27 %.

Tabelle 2: *Bewertung der Recyclingeignung eines überarbeiteten Entwurfs für einen recyclinggerechten Tablet-Computer*

$G_i$	Titel der Maßnahme	Punkte	$\eta_r$	Ergebnis
<i>Produktrecycling</i>				
38	Verwendung lösbarer Verbindungselemente	4	0,013	5,32
33	Reduzierung der Anzahl von Verbindungselementen	3	0,012	3,48
39	Erleichterte Zugänglichkeit von Verbindungselementen	3	0,014	4,11
36	Verwendung alterungs- und korrosionsbeständiger Verbindungselemente	3	0,013	3,78
41	Standardisierung von Bauteilen und Verbindungselementen	2	0,014	2,88
34	Aufbau von Baugruppen auf einem Basisbauteil	3	0,012	3,57
42	Bildung von variantenneutralen Baugruppen	3	0,015	4,41
34	Leichte Separierbarkeit wiederverwendbarer Baugruppen	3	0,012	3,57
28	Leichte Separierbarkeit unvermeidbarer Gift- und Gefahrstoffe	3	0,0098	2,94
37	Bereitstellung von Demontageinformationen und Informationen zur Wiederverwendung	4	0,013	5,2
31	Ermöglichung der Bauteilaufarbeitung	2	0,011	2,18
Zwischensumme Produktrecycling:				41,44
<i>Materialrecycling</i>				
39	Einheitliche und geradlinige Füge- und Trennrichtung	3	0,014	4,11
43	Abwägung zwischen Integral- und Differentialbauweise	3	0,015	4,53
38	Erleichterte zerstörende Demontage	3	0,013	3,99
36	Verwendung stofflich verwertbarer und nachwachsender Materialien	3	0,013	3,78
43	Verringerung der Werkstoffvielfalt	2	0,015	3,02
33	Vermeidung unverträglicher Werkstoffkombinationen	3	0,012	3,48
40	Verwendung von Rezyklaten	2	0,014	2,8
47	Bereitstellung von Werkstoffinformationen	4	0,016	6,6
Zwischensumme Materialrecycling:				32,31
Gesamtsumme Recyclingeignung der Konstruktion:				73,75 %

## Zusammenfassung

Die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingeignung von Produkten und Bauteilen wird in diesem Artikel durch eine umfassende Auflistung und Einordnung hinsichtlich des Produktrecyclings sowie des Materialrecyclings dargestellt. Die einzelnen Maßnahmen werden hinsichtlich Ihrer Allgemeingültigkeit, der Umsetzbarkeit, des Verbesserungspotentials und der Kombinierbarkeit mit anderen Maßnahmen bewertet. Diese Bewertung dient als Grundlage für eine einfache und schnelle Bewertungsmethode, die es dem Konstruierenden erlaubt, im laufenden Konstruktionsprozess die Recyclingeignung des Produktes oder einzelner Bauteile an Hand einer Prozentzahl einzuschätzen. Änderungen und einzelne Maßnahmen lassen sich damit vergleichen. Optimierungsbedarf besteht in der Gewichtung der Bewertung der einzelnen Maßnahmen, beispielsweise der Informationsbereitstellung im Vergleich mit der erleichterten zerstörenden Demontage. Verbesserungen der Bewertungsmethode sollten nach Möglichkeit in Verbindung mit praktischer Erprobung und Beurteilung des Recyclings des entsprechenden Bauteiles erfolgen.

## Literatur

- /1/ Verein Deutscher Ingenieure: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002
- /2/ Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf [Hrsg.]: Handbuch Konstruktion. München: Hanser, 2012
- /3/ Kurz, Ulrich; Hintzen, Hans; Laufenberg, Hans: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen - Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2004
- /4/ Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf [Hrsg.]: Handbuch Konstruktion. München : Hanser, 2012
- /5/ Auto, Motor und Sport: Formel 1-Technik: Die Radmutter. Internet, 2010; URL: [www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-radmutter-1813653.html](http://www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/f1-radmutter-1813653.html)
- /6/ Kahmeyer, Martin; Rupprecht, Reinhard: Recyclinggerechte Produktgestaltung. 1. Aufl. Würzburg : Vogel Buchverlag, 1996
- /7/ Project ARA. <http://www.projectara.com>. Internet, 2015
- /8/ Alpa of Switzerland: Die ALPA-12-Plattform. Internet, 2014 (<http://www.alpa.ch/de/products/cameras/camera-bodies/alpa-12-tc.html>)
- /9/ Kyocera-Mita Deutschland GmbH: Verantwortung Zukunft. Das Umweltmanagement von Kyocera. Meerbusch, 2007. – Firmenschrift

- /10/ Honda Motor Europe Ltd: Umweltgerechte Aufbereitung. Internet, 2014 (<http://www.environment.honda-eu.com/recycling/Germany/German/efrec.htm>)
- /11/ IDIS: International Dismantling Information System: Internet, 2014 (<http://www.idis2.com>)
- /12/ iFixit: Nikon D3200 LCD Screen Replacement. Internet, 2014 URL: <https://ifixit.com/Guide/Nikon+D3200+LCD+Screen+Replacement/29841>
- /13/ ProReifen.com: Wie entsteht ein runderneuerter Reifen? Internet, 2012 (<https://www.proreifen.com/tires.php>)
- /14/ Klein, Bernd: Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 10. Aufl. Kassel : Springer Vieweg, 2013
- /15/ Daimler AG: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse. Stuttgart, 2013. – Firmenschrift
- /16/ Verein Deutscher Ingenieure: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2002
- /17/ Norm DIN EN ISO 14040 November 2009. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
- /18/ iFixit: iPad Air Wi-Fi Battery Replacement. Internet, 2014. URL: (<https://ifixit.com/Guide/iPad+Air+WiFi+Battery+Replacement/25869>)
- /19/ Schischke, K.; Nissen, N. F.; Stobbe, L.; Oerter, M.; Scheiber, S.; Schlösser, A.; Dimitrova, G.; Genz, P.; Lang, K.-D.: Ansätze zur stofflichen Verwertung von Tablets aus Sicht des Produktdesigns. Beitrag im Tagungsband: Recycling und Rohstoffe – Band 7. Neuruppin : TK Verlag, 2014

## Produktgruppen als mögliche Hilfe für die Auswahl zutreffender CE-Richtlinien



Langenbach, J.

*Für jedes neue Produkt, welches in Europa auf den Markt gebracht wird, muss die CE-Zertifizierung beachtet werden. Die Auswahl möglicherweise zutreffender Richtlinien gestaltet sich hierbei sehr schwierig. In diesem Artikel wird untersucht, ob eine Abhängigkeit zwischen Produktgruppen und zutreffenden CE-Richtlinien existiert oder ob andere Gruppierungsmöglichkeiten genutzt werden müssen.*

*Following the new approach of the European Union, person who intends to place products on the market must ensure the conformity to CE directives. But identifying possibly important directives for a certain product is very difficult. This article discusses a possible relation of product groups and the applicable CE directives.*

Für Produktentwickler stellt die Recherche nach zutreffenden gesetzlichen Vorschriften für ein konkretes Produkt eine große Hürde dar. Zum einen existieren unterschiedlichste Regelsetzer, die von unterschiedlichen nationalen bis hin zu internationalen Organisationen reichen. Zum anderen sind die Gesetzestexte in der Regel allgemein formuliert. Das erschwert dem Produktentwickler oft die Einschätzung, ob das Regelwerk für das konkrete Produkt relevant ist oder nicht. Damit steht der Entwickler vor der Herausforderung, sehr viele Dokumente identifizieren und anschließend analysieren zu müssen. Eine Hilfe zur adäquaten Vorauswahl von Dokumenten mit einer Schätzung der Relevanz für das konkrete Produkt wäre hier sehr hilfreich.

Eine Grundlage für eine Auswahlhilfe von zutreffenden rechtlichen Dokumenten, kann eine Zuordnung zwischen Produktgruppen und relevanten, rechtlichen Dokumenten sein. Im Rahmen der CE-Kennzeichnung sind diese Daten für existierende Produkte in der Regel einsehbar, wodurch in kurzer Zeit eine ausreichende Datengrundlage für die vorliegende Untersuchung geschaffen werden konnte. Hinzu kommt, dass die CE-Kennzeichnung für neue Produkte in Europa von großer Bedeutung ist. Daher beziehen sich die folgenden Betrachtungen auf die CE-Kennzeichnung.

## Statistische Clusterbildung

Die Grundlage für die Datenanalyse bilden die CE-Konformitätserklärungen vorhandener Produkte. In diesem Fall sind das Produkte aus den Kategorien Drucker, Computermonitore, Rasenmäher und Kaffeemaschinen (s. Abbildung 1). Die Produktkategorien sind so gewählt, dass sie teilweise sehr ähnlich sind und teilweise sehr unterschiedlich. Drucker und Monitore unterscheiden sich bspw. hinsichtlich CE-Konformität kaum, da beides elektronische Heimanwenderprodukte sind. Rasenmäher unterscheiden sich im Gegensatz dazu deutlich hiervon. Ebenso weisen die Produktkategorien eine unterschiedliche Homogenität auf. Drucker und Monitore sind in sich, jeweils sehr homogen. Die gewählten Rasenmäher und Kaffeemaschinen hingegen eher heterogen. Hier reichen die Bandbreiten von Mährobotern bis hin zu Benzinrasenmähern und Filterkaffeemaschinen über Siebträgermaschinen bis hin zu Vollautomaten. Diese unterschiedliche Zusammensetzung der Produktgruppen, zeigt sich auch in Abbildung 2. Bei den homogenen Produktgruppen der Drucker und Monitore, werden Richtlinien gar nicht verwendet oder aber bei nahezu allen Produkten. So schwankt die Häufigkeit der Nennung einer verwendeten Richtlinie zwischen 60 und 100%. Bei Rasenmähern und Kaffeemaschinen liegt die Häufigkeit jedoch zwischen 15 und 100%.

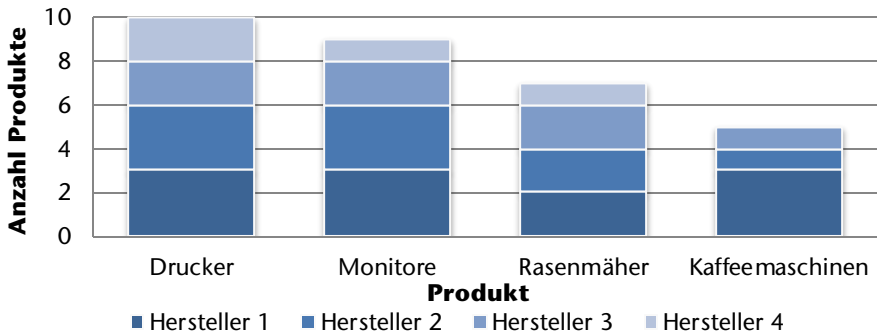


Abbildung 1: Zusammensetzung der untersuchten Produkte nach Produktkategorie und Anzahl der untersuchten Produkte

Um einen Zusammenhang zwischen Produktgruppen und verwendeten CE-Richtlinien zu ermitteln, wird das Clusterverfahren (s. /1/) im Rahmen einer statistischen Untersuchung genutzt. Ziel des Clusterverfahrens ist es, Gruppen mit möglichst ähnlichen Objekten zu definieren, die sich gleichzeitig möglichst stark von anderen Gruppen abgrenzen. Die Ähnlichkeit zwischen zwei Elementen wird hierbei mittels Algorithmen berechnet. Je ähnlicher sich zwei Elemente sind, desto eher nähert sich der Ähnlichkeitswert 1 an. Je nach vorliegenden Daten und Modell, kommen zur Ähnlichkeitsberechnung unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Da es sich bei den vorliegenden Daten um binäre Variablen handelt

(Richtlinie verwendet – 1; Richtlinie nicht verwendet – 0), erfolgt die Berechnung der Ähnlichkeiten mit Hilfe des Verfahrens nach Jaccard (s. /1/ und /2/). Aus den berechneten Ähnlichkeiten folgt zunächst eine Ähnlichkeitsmatrix (s. Tabelle 1). In der Matrix lässt sich die Ähnlichkeit zwischen den jeweiligen Einträgen ermitteln. Mittels der Ähnlichkeitsmatrix wird schließlich ein Dendrogramm (s. /1/) berechnet. Die Anordnung der Produkte erfolgt im Dendrogramm anhand der Ähnlichkeiten. Produkte, die sich nach der Ähnlichkeitsmatrix ähnlich sind, befinden sich im Dendrogramm nebeneinander.

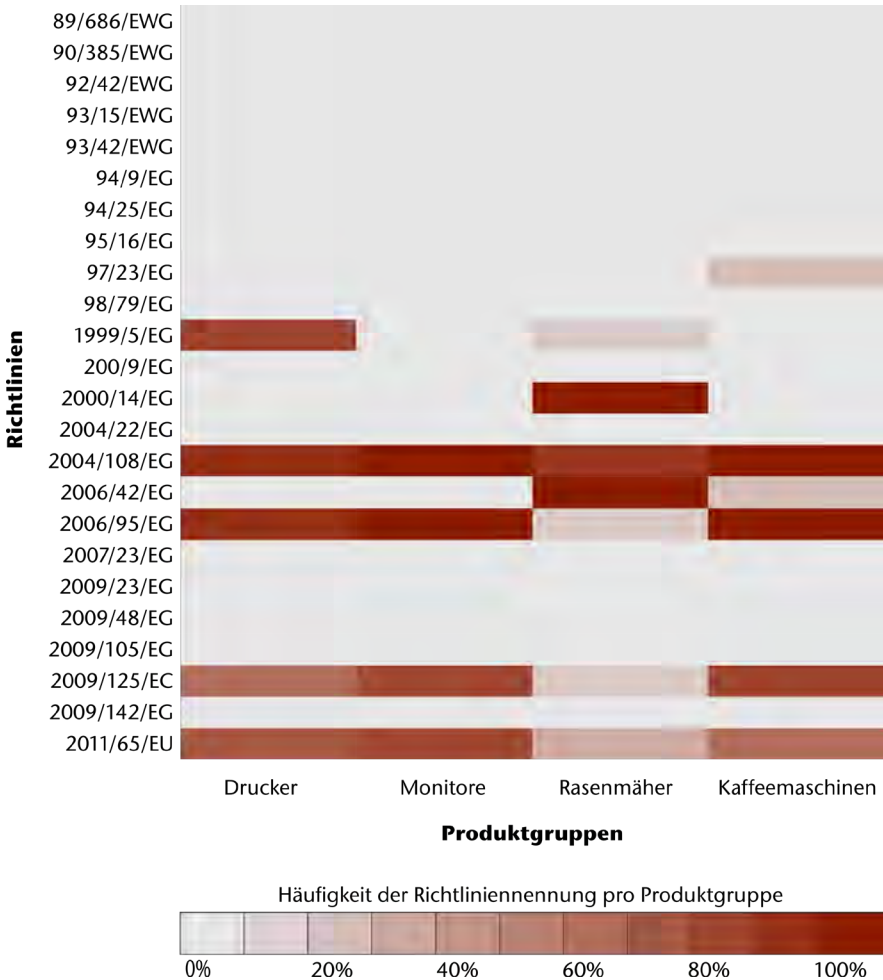


Abbildung 2: Anzahl der Nennungen einer Richtlinie pro Produktgruppe, normiert auf die jeweilige Anzahl der Produkte in einer Gruppe

Auf der horizontalen Achse ist ein Maß für die Heterogenität der Gruppen dargestellt. Die verwendete Software zur Auswertung SPSS normiert diese Heterogenitäten auf 25. Je größer dieser Wert ist, je größer ist die Heterogenität der Gruppen in diesem Zustand. Anzustreben ist eine möglichst geringe Heterogenität in den Gruppen, was eine Clusterausbildung im linken Bereich des Dendrograms bedeutet. Gleichzeitig steigt von rechts nach links die Anzahl der Gruppen. Das Optimum ist dort zu finden, wo eine geringe Anzahl an Gruppen, möglichst homogene Gruppen bilden.

Tabelle 1: Auszug aus der Ähnlichkeitsmatrix der Clusteranalyse

	DH1-1	DH1-2	MH1-1	MH2-1	RH1-1	RH1-2	KH1-1	KH2-1
DH1-1	1,000	1,000	0,750	0,875	0,500	0,375	0,375	0,875
DH1-2	1,000	1,000	0,750	0,875	0,500	0,375	0,375	0,875
MH1-1	0,750	0,750	1,000	0,875	0,250	0,625	0,625	0,875
MH2-1	0,875	0,875	0,875	1,000	0,375	0,500	0,500	1,000
RH1-1	0,500	0,500	0,250	0,375	1,000	0,625	0,125	0,375
RH1-2	0,375	0,375	0,625	0,500	0,625	1,000	0,500	0,500
KH1-1	0,375	0,375	0,625	0,500	0,125	0,500	1,000	0,500
KH2-1	0,875	0,875	0,875	1,000	0,375	0,500	0,500	1,000

Das Dendrogramm für die Produkte und deren genutzte CE-Richtlinien ist in Abbildung 3 dargestellt. Auf der ersten Ebene von links, können noch einige Produkte zu Gruppen zusammengefasst werden, ohne dass die Heterogenität stark ansteigt. Werden diese kleinen Gruppen auf der nächsten Stufe zu größeren Gruppen vereint, steigt die normierte Heterogenität bereits stark auf 5 – 15 an. Dieser starke Anstieg bei der Vereinigung weniger Gruppen, zeigt auf, dass die untersuchten Elemente sehr heterogen sind. Ausgehend von vier Produktgruppen als Datenbasis, ergibt sich eine normierte Heterogenität von ca. 18. Dieser Zustand wird durch die rote Linie im Diagramm repräsentiert. In diesem Zustand bilden Monitore, Drucker sowie die Kaffee-Vollautomaten und Filterkaffeemaschine die Gruppe 1. Die Rasenmäher (Gruppe 3) und die Siebträgermaschine (Gruppe 4) bilden ebenfalls jeweils eine Gruppe. Die Siebträgermaschine ist den Rasenmähern ähnlich, da sie nach der Maschinenrichtlinie zertifiziert ist und gleichzeitig keine elektronischen Komponenten enthält. Ausnahme bei den Rasenmähern ist der Rasenmäher RH1-1. Dieser Rasenmäher ist allerdings ein Mähroboter, wodurch die Tendenz zu den elektronischen Geräten erklärbar ist. Der ebenfalls in Gruppe 2 befindliche Drucker weist eine fehlerhafte CE-Erklärung auf, wodurch die falsche Zurdonugn erklärbar ist. Die Lage der roten Linie weit rechts im Diagramm, zeigt allerdings, dass die Gruppen bereits eine größere Heterogenität aufweisen. Ziel bei statistischen Clusteranalysen ist eine Grenze weiter Links im Diagramm zu erreichen.

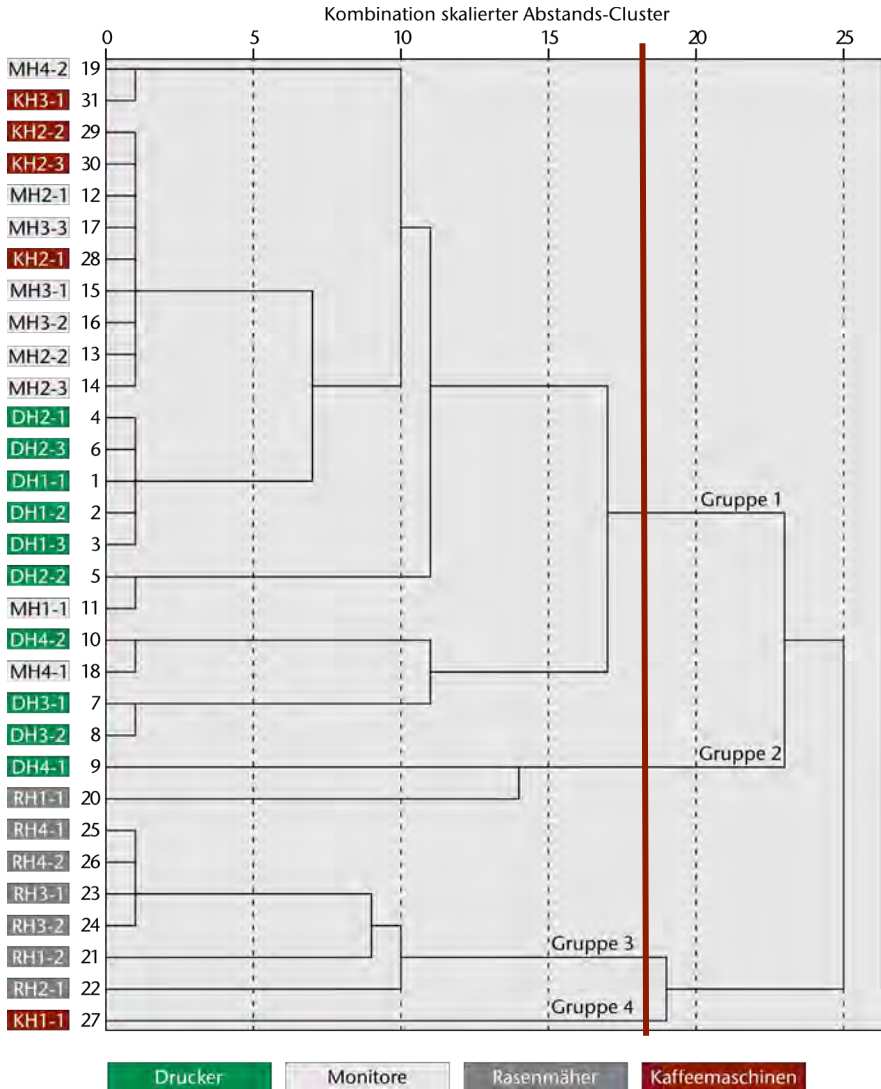


Abbildung 3: Dendrogramm mit durchschnittlicher Verknüpfung zwischen den Gruppen als Ergebnis der Clusteranalyse

Insgesamt legt die Clusteranalyse damit nahe, dass eine Auswahl auf Basis der Produktgruppen lediglich eine korrekte Tendenz liefert. Beispielsweise würden für die Produktgruppe Rasenmäher mit hoher Wahrscheinlichkeit die richtigen Richtlinien ausgewählt werden, da nahezu alle Rasenmäher im Dendrogramm der



Gruppe 3 angehören. Für Drucker, Monitore oder Kaffeemaschinen ist der Zusammenhang zwischen Produktgruppe und zugeordneten Richtlinien hingegen weniger stark ausgeprägt. Daher wäre eine Vorhersage entsprechend ungenauer. Zu berücksichtigen ist in diesem Fall auch, dass die zugrundeliegende Stichprobe von geringem Umfang ist. Um die Ergebnisse zu verbessern müsste eine Untersuchung mit deutlich mehr Produkten in jeder Produktgruppe sowie mehr Produktgruppen erfolgen. Ein weiterer Faktor bei der Clusteranalyse ist der verwendete Algorithmus zur Berechnung der Ähnlichkeiten. Neben dem Jaccard-Verfahren stehen weitere Verfahren zur Auswahl, um aus binären Skalen Ähnlichkeiten zu berechnen. Untersuchungen mit der vorhandenen Stichprobe haben allerdings ergeben, dass die Abweichungen zwischen den Ähnlichkeitsverfahren eher gering sind. So liefert die Clusteranalyse auf Basis der Ähnlichkeiten nach Lance-Williams, vergleichbare Ergebnisse wie die Clusteranalyse auf Basis der Jaccard-Ähnlichkeiten. Die normierte Heterogenität bei vier Produktgruppen auf Basis der Lance-Williams-Ähnlichkeiten, ist mit 14 sogar etwas besser.

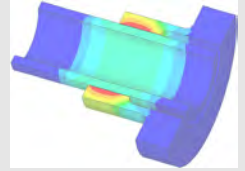
## Zusammenfassung

Die Clusterbildung zeigt auf, dass die Zuordnung zwischen Produktgruppen und statistisch gefundenen Gruppen nicht identisch ist. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass eine Auswahl von CE-Richtlinien aufgrund einer Produktgruppe nicht immer sinnvoll ist, wenngleich die Tendenz korrekt ist. Gleichzeitig zeigt die Clusterbildung aber auch auf, dass eine Vorauswahl aufgrund technischer Merkmale möglich scheint. Drucker und Monitore erfüllen bspw. grundlegend andere Funktionen und nutzen auch andere Wirkprinzipien. Allerdings dominiert bei beiden die Elektronik, wodurch sie mit den Vollautomaten der Kaffeemaschinen eine statistische Gruppe bilden. Hier ergibt sich folglich ein neuer Untersuchungsansatz. Zu jedem untersuchten Produkt sollten beschreibende Merkmale ermittelt werden. Anschließend können anhand der Merkmale höchstwahrscheinlich homogene Cluster gebildet werden. Solche geclusterten Merkmale wären wiederum die Grundlage für ein dialogbasiertes Auswahlverfahren von möglicherweise zutreffenden CE-Richtlinien.

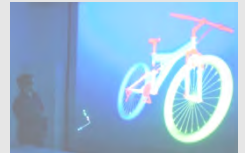
## Literatur

- /1/ Methodenberatung: Clusteranalyse, Universität Zürich, 2010, <http://www.methodenberatung.uzh.ch/datenanalyse/interdependenz/gruppierung/cluster.html>, zuletzt Abgerufen 11.2015
- /2/ Haenelt, K.: Ähnlichkeitsmaße für Vektoren, Fraunhofer-Gesellschaft e.V., 2012, [http://kontext.fraunhofer.de/haenelt/kurs/fohlen/Haenelt\\_VektorAehnlichkeit.pdf](http://kontext.fraunhofer.de/haenelt/kurs/fohlen/Haenelt_VektorAehnlichkeit.pdf), zuletzt Abgerufen 11.2015

Konstruktion und Berechnung von  
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und  
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik  
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte

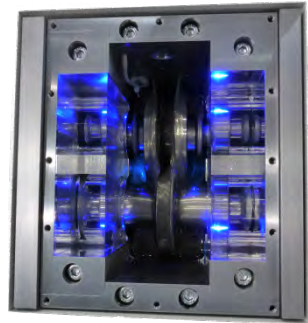




## DFG SPP 1551: Der Druckkamm als „Ressourceneffizientes Konstruktionselement“

Heß, M.

*Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1551 „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird am IMW der Einsatz von Druckkamm lagern zur Effizienzsteigerung schrägverzahnter Getriebe untersucht. Nach erfolgreichem Abschluss des ersten Projektzeitraumes gibt dieser Artikel einen Einblick in gewonnene Erkenntnisse und einen Ausblick auf anstehende Arbeiten in der zweiten Förderungsperiode.*



*Within the priority program “Ressourceneffiziente Kontruktionselemente” (SPP 1551) of the German Research Foundation (DFG) the use of thrust cone bearings to increase the efficiency of helical gears is investigated. After successful completion of the first project period, this article shall give an insight into gained results and offer a brief preview on the work ahead in the second period.*

### Frühzeitige Vollschrmerung

Druckkamm lager gestatten die direkte Übertragung axialer Kräfte zwischen Getriebewellen, ohne diese in Gehäusekomponenten abzuführen. Eine klassische Anwendung ist der Einsatz in Turboverdichtergetrieben, bei denen ein am Verdichterrad entstehender Axial Schub über das Druckkamm lager in die Radwelle übertragen wird, um eine schwimmende Lagerung der Ritzelwelle zu ermöglichen. Druckkamm lager bieten auch die Möglichkeit, die in schrägverzahnten Getriebe stufen bei der Drehmomentübertragung generierte axiale Kraftkomponente auf kurzem Weg zu kompensieren. Die in einer Ritzelflanke entstehende Axialkraft wird hierbei durch Druckkamm und Anlauf ring in das gegenüberliegende Rad geleitet, wo sie auf die entgegengesetzte Kraftkomponente aus der Radflanke trifft.

Die Axialkraftübertragung zwischen Rad- und Ritzelwelle erfolgt bei der Druckkamm lagerung über ein hydrodynamisches Schmierstoffkissen, welches sich zwischen den beiden kegeligen Kontaktflächen (bezeichnet als Druckkamm auf der Ritzelwelle und Anlauf ring an der Stirnseite des Rades) ausbildet. Kritisch sind daher, wie bei allen hydrodynamischen Lagern, vor allem jene Betriebs-situationen, in denen die hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit nicht

genügend Fluid in den Spalt fördert, um eine vollständige Trennung der Laufflächen durch den Schmierstoff trotz der anliegenden Axiallast zu gewährleisten. Gerade zu Beginn der hier vorgestellten Arbeiten lag der Fokus der Betrachtungen daher auf der Fragestellung, durch welche konstruktiven Maßnahmen Druckkamm lager so gestaltet werden können, dass Sie bei einer gegebenen axialen Belastung möglichst frühzeitig, also bereits bei möglichst geringen Drehzahlen, das sogenannte Vollschmierungsgebiet erreichen.

### Simulationsrechnungen

Die grundsätzliche Beschreibung hydrodynamischer Schmierfilme gelingt mit der REYNOLDS'schen Differentialgleichung /1/. Basierend auf der Arbeit von BARAGAN DE LING /2/ wurde eine Methodik zur Berechnung des Druckaufbaus in Druckkamm lagern erstellt und im Berechnungsprogramm MATLAB umgesetzt /3/ /4/. Mit Hilfe dieser Umsetzung ist es möglich, für eine gegebene Betriebs- und Gestaltungssituation eine Verteilung des zu erwartenden Öldrucks im Lager, die druckinduzierte elastische Deformation der Spaltgeometrie sowie eine minimale Schmierpalthe zu berechnen.

Mittels einer Variation der Betriebsparameter Last und Drehzahl lässt sich für einen Lagerentwurf ein charakteristisches Spaltweitenkennfeld erstellen. Zur Illustration dieses Vorgehens sind in Abbildung 1 die errechneten Spaltweiten für zwei Druckkamm lager aufgetragen.

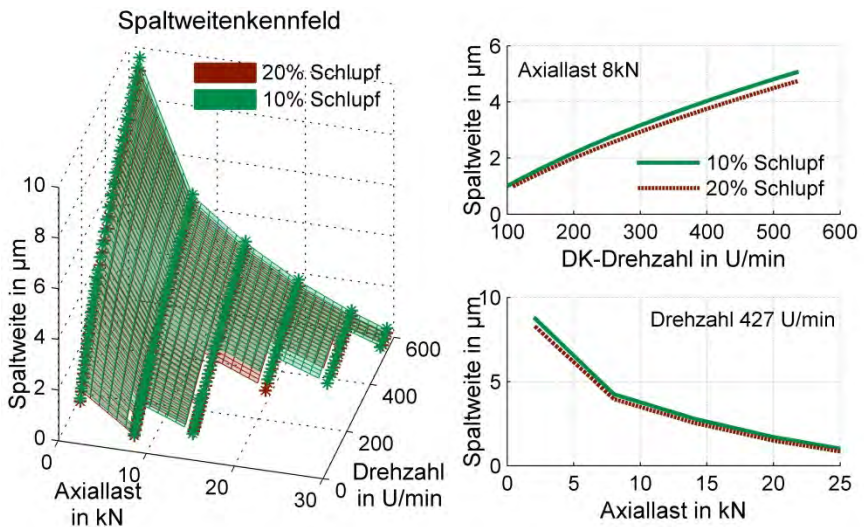


Abbildung 1: Spaltweitenvergleichsrechnung für ein Druckkamm lager bei unterschiedlichem Schlupfverhältnis /5/

Die dem Beispiel zugrunde liegenden Lagermodelle unterscheiden sich lediglich durch den mittleren Schlupf, alle sonstigen Bedingungen (Geometrie, Schmierstoff etc.) sind identisch. Über den Vergleich dieser Kennfelder lässt sich die Eignung unterschiedlicher Lagerentwürfe hinsichtlich eines möglichst frühzeitigen Vollschmierungsbeginns beurteilen. Es wird deutlich, dass sich an jedem Betriebspunkt für das Lager mit dem geringeren Schlupfverhältnis eine etwas größere Spaltweite ergibt. Nimmt man eine kritische Spaltweite für den Übergang in die Vollschmierung an, so folgt aus diesen Rechnungen, dass das Lager bei geringerem Schlupf eher in den sicheren Betriebsbereich wechseln wird. Im Rahmen des Projektes wurde neben dem auftretenden Schlupf auch der Kegelwinkel sowie die Formgebung der Lauffläche als Variationsparameter betrachtet.

### **Experimentelle Beurteilung des Übergangsverhaltens**

Die experimentelle Überprüfung der gewonnenen Prognosen erfolgte auf dem Zweiseibendruckkammprüfstand /6/ des IMW. Für die untersuchten Prüflingsgeometrien wurde das Übergangsverhalten bestimmt, indem für 15 Axiallastniveaus auf jeweils 35 Geschwindigkeitsstufen die Schmierungsituation erfasst und beurteilt wurde. Die Auftragung des gemessenen Reibkoeffizienten über der hydrodynamisch wirksamen Geschwindigkeit dient hierfür als eines der Auswertungskriterien. Da die fluidische Reibung etwa quadratisch mit der Differenzgeschwindigkeit ansteigt, führt die Absenkung der Untersuchungsgeschwindigkeit für ein Prüflingspaar, welches sich zu Beginn eines Testlaufes im Vollschmierungsgebiet befindet, zu einem abnehmenden Reibkoeffizienten. Im Verlauf des Experimentes ist allerdings nach einer gewissen Geschwindigkeitsreduktion ein Anstieg der gemessenen Reibwerte zu beobachten – dieser kann durch eine zusätzliche Festkörperreibungskomponente erklärt werden, die auftritt und zunimmt, wenn die in Folge der Geschwindigkeitsabsenkung eintretende Spaltweitenreduktion zum vermehrten Auftreten von Festkörperberührungen führt. Trägt man die Geschwindigkeiten der Reibungsminima dieser „STRIBECK-Kurven“ über den Axiallasten auf, ergibt sich für das jeweilige Prüflingspaar eine Grenzlinie, unterhalb derer die Festkörperreibung als dominierender Reibmechanismus angesehen werden kann (siehe untere Linie in Abbildung 2). Mit dem Ziel eines sicheren (nahezu verschleißfreien) Betriebs, erscheint der dauerhafter Einsatz eines entsprechenden Druckkammagelers oberhalb dieser Grenzlinie als notwendiges, jedoch nicht als hinreichendes Kriterium. Auch oberhalb des Reibungsminimums kann es zur Berührung von Rauheitsspitzen und damit zum Verschleiß der Kontaktflächen kommen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit eines weiteren, sensitiveren Kriteriums zur Beschreibung der Schmierungsituation, welches durch die in /7/ beschriebene Erweiterung der Prüfstandsmesstechnik gewonnen wurde. Unter Ausnutzung der Isolationsfähigkeit des Schmierstoffes kann die Messung des Übergangswiderstandes zur Identifikation von Festkörperkontakten zwischen den leitfähigen Prüflingen

herangezogen werden. Der Verlauf der oberen Linie in Abbildung 2 kennzeichnet die Geschwindigkeit, bei der in Abhängigkeit von der axialen Belastung für etwa 50 % der Messpunkte kein Festkörperkontakt aufgezeichnet wurde und wird im Folgenden als Grenze für den Übergang in einen vollentwickelten Schmierfilm herangezogen.

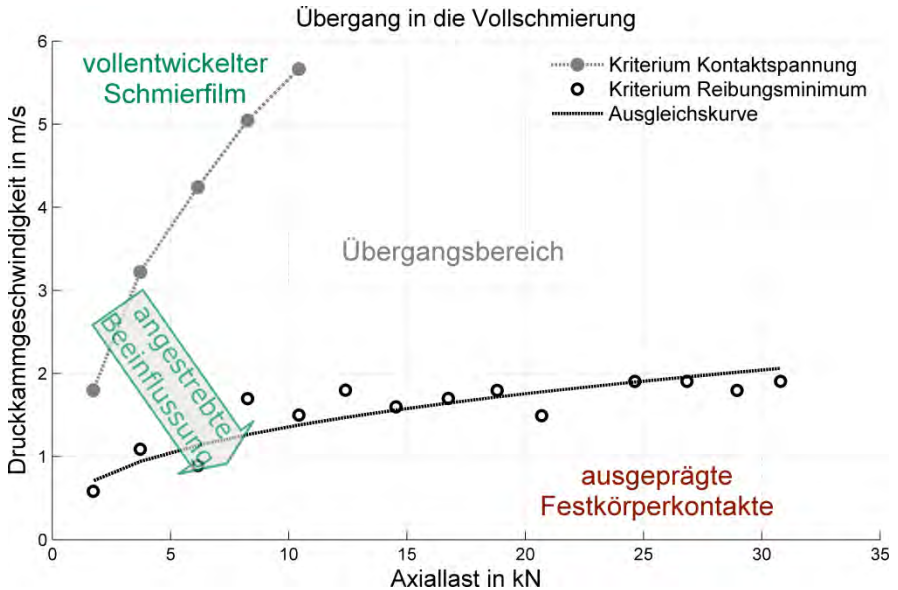


Abbildung 2: Experimentell ermittelte Grenzl意思 für ein Prüflingspaar: unter der schwarzen Linie dominiert die Festkörperreibung, über der grauen Linie wird der elektrische Übergangswiderstand durch den Schmierfilm signifikant beeinflusst /5/

Entsprechende Grenzl意思 wurden für neun unterschiedliche Laufbahngestaltungen auf jeweils zwei Schlupfstufen ermittelt, um den Einfluss der jeweiligen Modifikation auf das Übergangsverhalten zu bestimmen. Als zielführend werden hierbei möglichst niedrige Grenzl意思 angesehen, da diese auf ein frühzeitiges Erreichen der Vollschnierung hindeuten. Bei Wiederholungsläufen mit bereits gefahrenen Prüflingen konnte übereinstimmend für alle Versuchspaare eine Verbesserung des Übergangsverhaltens beobachtet werden. Dieser positive Einlaufeffekt lässt sich auf eine gewisse Glättung der Kontaktflächen zurückführen. Für die Bewertung der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass nur Grenzl意思 derselben Wiederholungsstufe sinnvoll miteinander verglichen werden können. Die gewonnene Reihenfolge hinsichtlich der Eignung der Kontaktgeometrien erwies sich für alle Wiederholungsstufen weitestgehend konsistent.

In den Untersuchungen erwiesen sich Prüflinge mit kleineren Kegelwinkeln und geringem Schlupf als besonders geeignet. Diese Beobachtung deckt sich mit den Spaltweitenberechnungen der Simulation. Die vielversprechenden Spaltweitensteigerungen der Simulation für Kanten- und Laufbahnverrundungen konnten im Experiment nicht bestätigt werden. Erste Berechnungen mit einem modifizierten Simulationsmodell, welches eine maximale Filmdicke beim Eintritt in den konvergierenden Spalt berücksichtigt, scheinen diese Abweichung jedoch wirkungsvoll zu korrigieren. Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass das Übergangsverhalten von Druckkamm lagern durch kleine Gestaltungsmodifikationen nennenswert beeinflusst werden kann. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 3 die mit dem Kontaktspannungskriterium bestimmten Grenzlinien zweier Geometrievarianten.

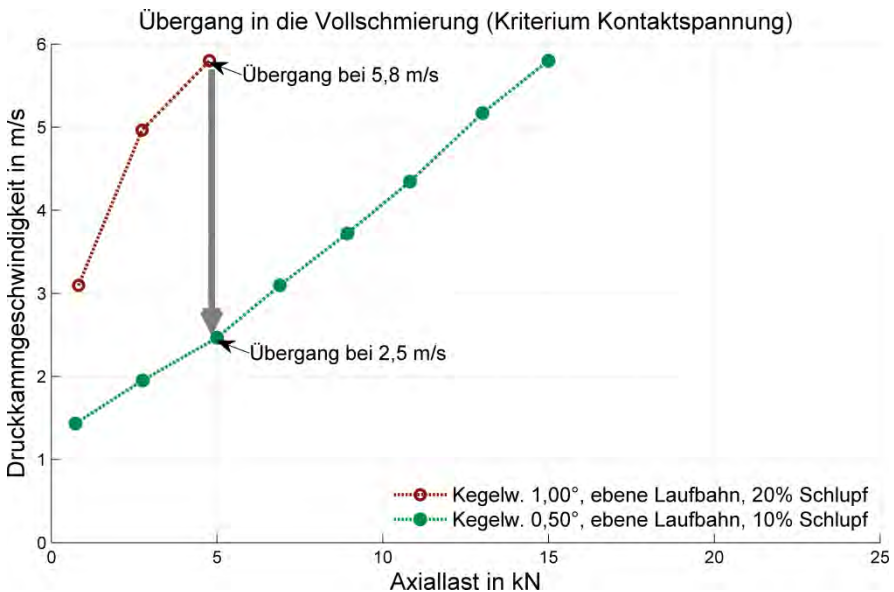


Abbildung 3: Vergleich der für zwei unterschiedliche Prüflingspaare experimentell ermittelten Grenzlinien für den Vollschrimerungsbeginn /5/

Bei einer Axiallast von 5 kN sinkt die Übergangsgeschwindigkeit von ursprünglich 5,8 m/s für ein Prüflingspaar mit einem Kegelwinkel von 1,0° bei 20 % Schlupf auf 2,5 m/s, indem der Kegelwinkel auf 0,5° reduziert und der Schlupf (beispielsweise durch eine wälzkreisnähere Positionierung des Lagers) auf 10 % gesenkt wird. Diese Reduktion der Übergangsgeschwindigkeit um etwa 57 % eröffnet möglicherweise viele neue Anwendungen, da beispielsweise bei einem Anlaufvorgang mit konstanter Beschleunigung nur noch ein Viertel der Wegstrecke im kritischen Mischreibungsbereich verbracht werden muss.



## Einfluss auf die Getriebefeffizienz

Wurden Druckkamm lager bisher weitgehend in relativ hochtourigen, gleitgelagerten Anwendungen eingesetzt, ermutigen die vorgestellten Ergebnisse auch den vermehrten Einsatz in etwas langsamer betriebenen, wälzgelagerten Getrieben. In /8/ wurde anhand eines Rechenbeispiels der Einfluss der Druckkamm lagerung auf die Effizienz von wälzgelagerten Getrieben diskutiert. Es zeigte sich, dass durch die direkte Axialkraftkompensation eine Umstellung der Lagerbauarten möglich wird, in deren Folge trotz der zusätzlichen Reibstelle im Druckkamm lager die Gesamtriebungsverluste reduziert werden.

Im Rahmen der Arbeiten im SPP1551, wurde auf Basis des fünften Ganges eines PKW-Getriebes ein Demonstrationsgetriebe entworfen, welches sowohl durch angestellte Kegelrollenlager als auch durch eine Kombination von Druckkamm- und Rillenkugellager gelagert werden kann. Bei letzterer, als „Blue Bearing Concept“ bezeichneter Lagerungsvariante, dienen die Wälzlager lediglich der Übertragung von radialen Lasten in das Gehäuse. Die beiden Lagerungskonzepte sind in Abbildung 4 einander gegenübergestellt.

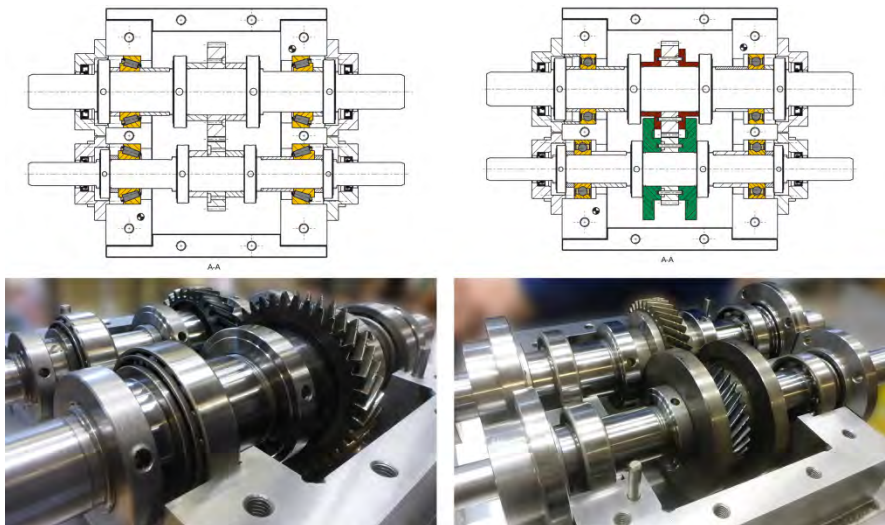


Abbildung 4: Lagerungsvarianten des Demonstrationsgetriebes: mit angestellter Kegelrollenlagerung (links) und „Blue Bearing Concept“ (rechts) /5/

Das Lagerspiel der Kegelrollenlager muss während der Montage mit Hilfe der Wellenmuttern eingestellt werden, die Druckkamm lagerung hingegen ist selbst-einstellend. Beim „Blue Bearing Concept“ müssen keine Axiallasten in das Gehäuse übertragen werden, weshalb nur ein Axiallager als Führungslager

erforderlich ist. In diesem Getriebeentwurf konnte die Ritzelwelle daher schwimmend im Gehäuse gelagert werden. Als Kompromiss an die Umrüstbarkeit des Getriebes mussten Druckkämme und Anlaufringe demontierbar gestaltet und dementsprechend durch Wellenmutter axial fixiert werden. Hierdurch ergibt sich für dieses Getriebe ein höherer axialer Raumbedarf, als dieser beim Einsatz fest montierter Druckkammmlager nötig wäre.

Durch die Erfassung des in das Getriebe eingeleiteten und des abgenommenen Drehmomentes lässt sich bei bekannten Drehzahlen der Gesamtwirkungsgrad des Getriebes bestimmen. Mit dem in Abbildung 5 dargestellten Versuchsaufbau wurden für beide Lagerungsvarianten Wirkungsgradkennfelder aufgezeichnet.

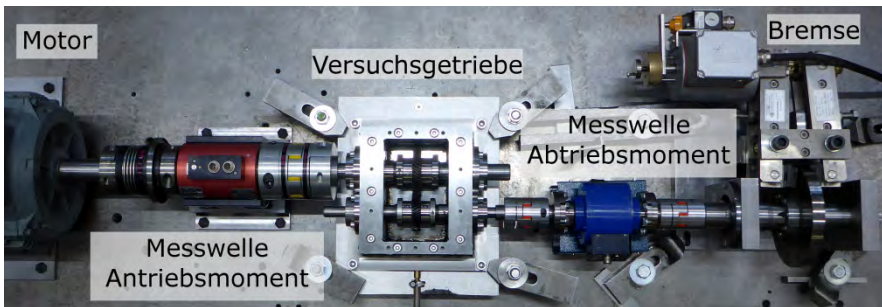


Abbildung 5: Aufbau zur Wirkungsgraderfassung des Versuchsgetriebes (hier konventionell durch Kegelrollenlager gelagert) /5/

Die Gegenüberstellung der aufgezeichneten Kennfelder in Abbildung 6 gestattet einen Vergleich der Getriebeeffizienz in Abhängigkeit von der Betriebsituation. Für beide Kennfelder ist ein Anstieg des Wirkungsgrades mit dem Lastmoment erkennbar, dies ist darauf zurückzuführen, dass konstante Verlustanteile im Teillastbereich einen höheren relativen Einfluss besitzen. In allen Betriebspunkten liegt der Wirkungsgrad des druckkammgelagerten Getriebeaufbaus deutlich über dem des Getriebeaufbaus mit Kegelrollenlagern. Da bei der Umrüstung des Getriebes nur Lagerungskomponenten getauscht werden, der übrige Versuchsaufbau (Zahnräder, Wellen, Dichtungen, Ölstand etc.) aber unverändert bleibt, sind diese Unterschiede auf die Lagerungsart zurückzuführen. Im dargestellten Versuch ergaben sich Wirkungsgradunterschiede von 1,5 % bis 9 %, im Mittel etwa 4 %.

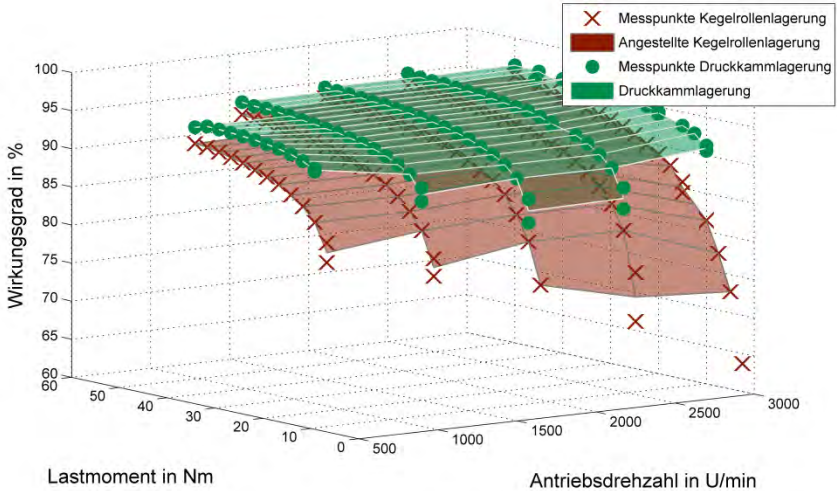


Abbildung 6: Im Versuch ermittelte Wirkungsgradkennfelder /5/

## Ausblick & Zusammenfassung

Die in der ersten Phase des DFG-Schwerpunktprogramms 1551 durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass durch eine geeignete Gestaltung der Laufflächen der Vollschmierungsbereich und damit das Anwendungsgebiet von Druckkammlagern in geringere Drehzahlbereiche verschoben werden kann. Diese Erkenntnisse erhöhen die Zuverlässigkeit von Druckkammlagerungen in klassischen, schnelllaufenden und gleitgelagerten Getriebeanwendungen. Mit dem vorgestellten Testgetriebe wurde darüber hinaus demonstriert, dass sich durch die als „Blue Bearing Concept“ bezeichnete Kombination von Druckkamm- und Gehäuseradiallagern Effizienzsteigerungen auch in wälzgelagerten, schrägverzahnten Getriebestufen erreichen lassen.

Für Druckkammlagerungen fehlen allerdings bisher allgemeinverfügbare Auslegungsvorschriften. Die Forschungsarbeiten am IMW zielen daher darauf ab, durch die Bereitstellung relevanter Erkenntnisse eine zielgerichtete Auslegung für den Anwender zu ermöglichen. Die Arbeiten der zweiten Phase des SPP werden sich daher vor allem den nachfolgenden Zielrichtungen widmen.

## Herausforderung Mischreibung/resistenz

Zum einen ist es trotz der erfolgreichen Reduktion der Übergangsgeschwindigkeiten nicht möglich, den vollkommen mischreibungsfreien Betrieb von Druckkammlagern in einer Getriebeanwendung zu realisieren, da zumindest

während der Anfahr- und Bremsvorgänge immer Mischreibungsbereiche durchquert werden müssen. Ein Ziel der Arbeiten wird daher darin bestehen, den Verschleiß unterschiedlicher Druckkammgestaltungen in diesem Bereich zu beobachten, um Auslegungshinweise für einen möglichst hohen Verschleißwiderstand erarbeiten zu können.

### **Maschinendynamischer Systemeinfluss**

Die andere Zielstellung für den zweiten Projektzeitraum liegt in der Beschreibung des maschinendynamischen Einflusses der Druckkamm Lagerung auf das System Getriebe und den Antriebsstrang. Der hydrodynamische Schmierfilm stellt eine zusätzliche Feder-Dämpfungs-Komponente dar, die etwa die axiale Anregung infolge von Drehmomentstößen beeinflussen kann. Diese Effekte sollen basierend auf erweiterten Schmierberechnungen mit Berücksichtigung von Festkörperkontakten im Mischreibungsgebiet in einer Modellvorstellung abgebildet werden, die Eingang in eine Mehrkörpersimulationen finden soll. Zudem ist der Aufbau eines größeren und umfangreicheren Testgetriebes vorgesehen, mit dem maschinendynamische Erfahrungen auch experimentell gewonnen und abgesichert werden sollen.

### **Literatur**

- /1/ Reynolds, O.: On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments. In Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. Phil. Trans. Roy. Soc., 177 (1886), 157-234
- /2/ Barragan de Ling, F. d. M.: Lubrication of thrust cones. Cardiff, University of Wales, Diss., 1993
- /3/ Thoden, D.: Genaue Schmierfilmberechnung als Hilfsmittel zur Druckkamm-Auslegung. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 36 (2011), 63-68.
- /4/ Lohrengel, A.; Heß, M.; Druckkamm Lagerungen zum Einsatz in effizienten schrägverzahnten Getrieben. TU Clausthal, Technical Report Faculty 3, ISSN 1869-8018, Fac3-14-01
- /5/ Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Heß, M.: Druckkamm Lagerungen: Gesteigerte Effizienz für schrägverzahnte Getriebe; In: Gleit- und Wälzlagerungen 2015: Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung; Schweinfurt, 06. und 07. Mai 2015. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2015 (VDI-Berichte, 2257). ISBN 978-3-18-092257-7, S. 221-233
- /6/ Thoden, D.: Neuer Prüfstand für Verschleißuntersuchungen an Druckkammern. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 34 (2009), 115-118

- /7/ Heß, M.: Der Vollschrnerung auf der Spur. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 38 (2013), 121-138
- /8/ Heß, M.: Beeinflussung der Reibungsverluste in schrägverzahnten Getrieben durch Druckkammerlager. In: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal 39 (2014), 33-44

## Erweiterung der institutseigenen Innenhochdruck-Fügeanlage für künftige Forschungsvorhaben

Mörz, F.

*Im Rahmen der Forschung auf dem Gebiet der mit Innenhochdruck gefügten Welle-Nabe-Verbindungen, wird die institutseigene Fügeanlage angepasst, um das Fügen mit anderen Fügedurchmessern zu ermöglichen.*



*In context of the further research of shaft hub connections made by hydraulic widening the hydroforming machine of the department is adapted for different joint diameters.*

### Das Prinzip des Innenhochdruckfügens

Das Innenhochdruckfügen von Welle-Nabe-Verbindungen funktioniert nach dem folgenden Prinzip: Die Nabe wird zunächst in der gewünschten Position auf der Hohlwelle platziert. Das Fügenspiel  $s_f$  (siehe Abbildung 1) ist dabei im Vergleich zu konventionellen Pressverbindungen sehr groß, sodass das Positionieren mit Handkraft erfolgen kann. Die Pressung zwischen Welle und Nabe entsteht im Anschluss, durch eine Beaufschlagung der Innenseite der Hohlwelle mit einem Druckmedium. Der Druck liegt dabei in einem Bereich bis ca. 4000bar. Dadurch wird die Hohlwelle aufgeweitet und plastisch verformt. Die Nabe, die für das Verfahren eine höhere Zugfestigkeit als die Welle aufweisen muss, verformt sich während des Fügevorganges lediglich elastisch. Nach der Rücknahme des Druckes wird die elastische Rückfederung der Nabe durch die plastisch verformte Welle begrenzt, wodurch die Pressverbindung zwischen Welle und Nabe entsteht. Wird eine ungünstige Werkstoffkombination gewählt, kann kein Presssitz ausgebildet werden (siehe Abbildung 2).

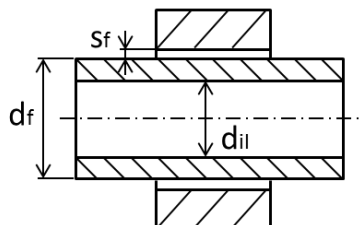


Abbildung 1: Abmessungen einer Welle-Nabe Paarung vor dem Fügen

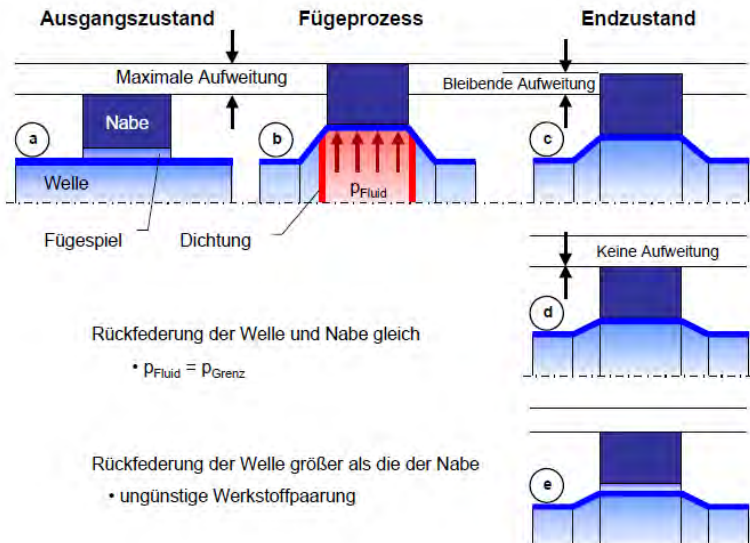


Abbildung 2: Prinzip des Innenhochdruckfügens /1/

## Die Fügeanlage am Institut für Maschinenwesen

Die Innenhochdruck Fügeanlage des Institutes für Maschinenwesen wurde 2008 im Rahmen des DFG Forschungsvorhabens DI-289/35-1 angeschafft und in Betrieb genommen.

Der Fokus des Forschungsvorhabens lag dabei auf innenhochdruckgefügten Welle-Nabe-Verbindungen mit einem Fügedurchmesser  $d_f = 25$  mm. Dazu wurden ausschließlich Hohlwellen mit einem Innendurchmesser  $d_{i1} = 19$  mm verwendet, was einem Durchmesser Verhältnis  $Q_i = 0,76$  entspricht (siehe Abbildung 1). Im Zuge künftiger Forschungsprojekte sollen größere Fügedurchmesser untersucht werden. Aus diesem Grund wird die Fügeanlage entsprechend angepasst.

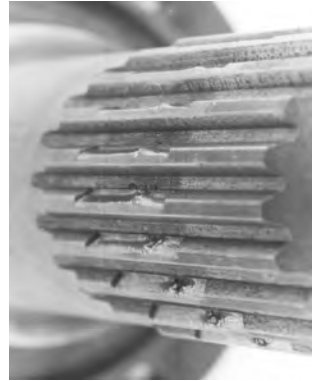
## Literatur

- /1/ Grünendick, T.: Die Berechnung innenhochdruckgefügtter Pressverbindungen, Dissertation, TU-Clausthal, 2004

## Verschleißschutzschicht für Zahnwellen-Verbindungen

Schäfer, G.; Wild, J.

*Der Verschleiß von Zahnwellen-Verbindungen ist eine industriell relevante Schadensursache. Öle und Fette sind prinzipiell zur Verschleißreduzierung geeignet. In Kombination mit Beschichtungen sind deutliche Verbesserungen erreichbar, wie der folgende Artikel am Beispiel einer Dünnschicht zeigt.*



*The wear of splines is a serious problem in industry. Oil and grease are typical products to avoid wear. The possible combination with coatings leads to better results, which is shown in this paper using the example of thin dense chrome.*

### Einleitung

Die Zahnwellen-Verbindung ist eine gerne genutzte Welle-Nabe-Verbindung, die eine hohe Übertragungsfähigkeit mit wirtschaftlichen Fertigungsverfahren vereint. Bezüglich möglicher Optimierungen der Tragfähigkeit gefräster Profile nach DIN 5480 sei auf den zweiten Artikel in dieser Institutsmitteilung, „Betrachtungen der Zahnfußausrundung von Passverzahnungen“, verwiesen. Hier geht es jetzt um die zweite mögliche Schadensursache in Zahnwellen-Verbindungen, den Verschleiß. Er tritt nicht nur an axial bewegten Schiebesitzverbindungen, siehe vierter Artikel, sondern häufig auch in Verbindungen mit axial fixierter Position auf. Ursächlich dafür sind sekundäre Quer- oder Biegelasten /1/.



Abbildung 1: Verschleißschaden an einer Naben(Innen)verzahnung



Abbildung 1 und das Titelbild dieses Artikels zeigen typische Verschleißbilder an Naben und Wellen, die mit Flankenzenrierung für reine Drehmomentübertragung konzipiert wurden und unter kleinen sekundären Lasten gelitten haben. Ein sehr wirksames, aber konstruktiv nicht immer anwendbares, Mittel gegen solchen Verschleiß ist die Ölschmierung [2]. In vielen Fällen ist ein prinzipiell trockener Betrieb gefordert, der lediglich den Einsatz von Fetten oder Pasten zulässt. Nicht selten ist diese Anforderung mit dem Wunsch verbunden, das Schmiermittel nur einmalig bei der Montage einzubringen. Für diesen häufigen Anwendungsfall werden immer wieder neue leistungsfähigere Schmiermittel und Beschichtungen entwickelt, so war durch die „weißen“ reaktionsschichtbildenden Fette ein deutlicher Schritt im Verschleißschutz möglich. Inhalt dieses Artikels ist die Untersuchung einer Dünnchromschicht in Kombination mit einer Montagepaste im Vergleich zu bewährten Schmierungsvarianten. Solche vergleichenden Untersuchungen werden am IMW, auf der für Zahnwellenversuche bewährten Prüfstandausstattung, immer wieder durchgeführt, um anwendungsspezifisch aktuell optimale Empfehlungen geben zu können.

### Das Versuchsprogramm

Die neue Variante aus Dünnchromschicht in Kombination mit Montagepaste wurde im Vergleich zu einem aktuell empfehlenswerten weißen Schmierfett (Referenz, ohne zusätzliche Beschichtung) untersucht. Ebenso wurden die Dünnchromschicht und die Montagepaste alleine untersucht. Für die Versuche wurden Wellen aus 42CrMo4V gegen Naben aus 16MnCr5 mit einer Verzahnung DIN 5480 25x1,25x30x18 mit einer gemeinsamen Verzahnungslänge von 20 mm eingesetzt.

Tabelle 1: Produktübersicht

Produkt	Hersteller	Herstellerangaben
DURALLOY TDC	AHC Oberflächentechnik	Schichtdicke 2,5-20 µm Härte 800-1300 HV Prozesstemp. < 70 °C Einsatztemp. < 350 °C
Silbermontagepaste	EWS-Becker	Einsatztemp. -40/200 °C
Weißes Fett	auf Anfrage	Lithiumseifenfett auf Syntheseölbasis Einsatztemp. -45/130 °C

Die DURALLOY-Schicht wurde, in einer möglichst großen Schichtdicke von ca. 15 µm, auf die Versuchswellen vom Hersteller aufgebracht. Die Versuche wurden alle bis  $5 \times 10^6$  Lastwechsel gefahren, zusätzlich wurden Versuche mit der Silberpaste

und der Kombination aus DURALLOY-Beschichtung und Silberpaste bis  $1 \times 10^7$  Lastwechsel gefahren. Die Belastung war jeweils zusammengesetzt aus 2000 Nm Drehmoment und einer Querkraft von 200 N, womit sich ein praxistypischer ideeller Radius von 100 mm ergibt /2/. Solche Querkräfte können z.B. durch Restausrichtabweichungen verursacht werden. Als Maß für den Verschleiß wird die Zunahme des in Umfangsrichtung gemessenen Verdrehspiels am Teilkreis in mm angegeben. Die Messung erfolgt mit einem Drehmomentwechsel von -50 Nm auf +50 Nm ohne Querkraftbelastung in zentrierter Position an der gereinigten Probe. Die Angaben finden sich in den Bildunterschriften.

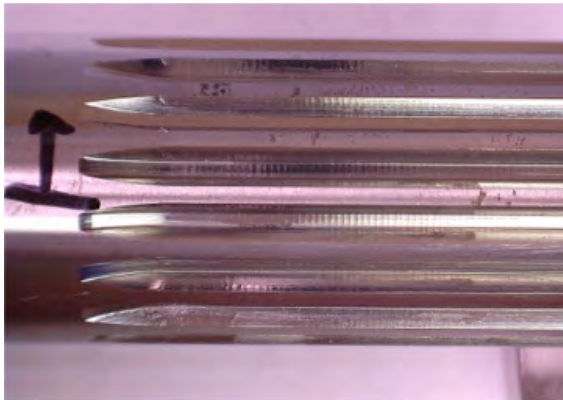


Abbildung 2: Weiβes Fett nach  $5 \times 10^6$  Lastwechseln (LW), Verdrehspiel am Teilkreis:  $11,4 \mu\text{m}/5 \times 10^6$  LW

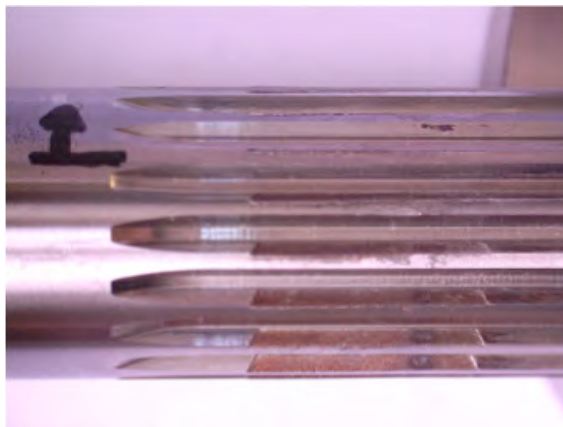


Abbildung 3: Silberpaste nach  $1 \times 10^7$  Lastwechseln (LW), Verdrehspiel am Teilkreis:  $17,2 \mu\text{m}/5 \times 10^6$  LW und  $51,9 \mu\text{m}/1 \times 10^7$  LW

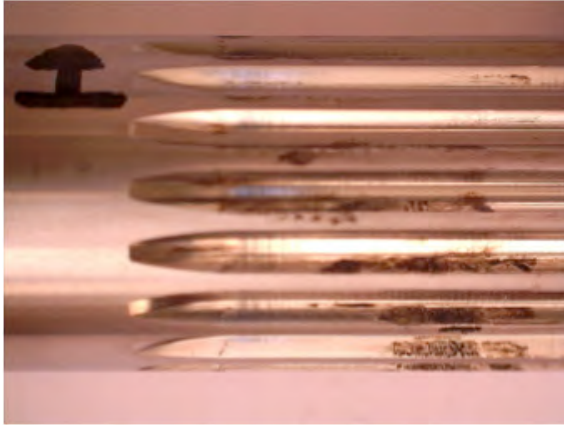


Abbildung 4: DURALLOY+Silberpaste nach  $1 \times 10^7$  Lastwechseln (LW), Verdrehspiel am Teilkreis:  $2,5 \mu\text{m}/5 \times 10^6$  LW und  $13,9 \mu\text{m}/1 \times 10^7$  LW

### Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen der Dünnschicht DURALLOY TDC in Verbindung mit einer Silbermontagepaste zeigen ein sehr positives Ergebnis in Bezug auf die erwartete Verschleißminderung. Unter einer betriebstypischen kombinierten Belastung aus Drehmoment und Querkraft, konnte der Verschleiß gegenüber einer aktuell sehr guten Schmierung mit einem „weißen“ Schmierfett nochmals um ca. 75% reduziert werden. Entscheidend dafür ist die Kombination aus Dünnschicht und klassischem Schmiermittel. Die Dünnschicht kann ohne spezielle Verzahnungsvorbereitungen (Standardverzahnwerkzeuge) auf der Welle aufgebracht werden und ist über weite Temperaturbereiche nutzbar. Der Abstand zur optimalen Ölschmierung ist damit wieder ein Stück kleiner geworden.

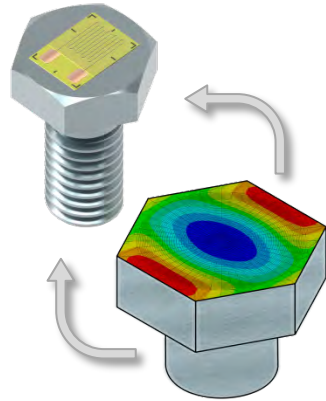
### Literatur

- /1/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal 1986
- /2/ Schäfer, G.: Der Einfluss von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal 1995

## Messverfahren zur Ermittlung der Schraubenvorspannung mittels Dehnungsmessstreifen

Chorzewski, D.; Hofmann, S.

*Im folgenden Artikel wird das im letzten Jahr vorgestellte rückwirkungsfreie Messverfahren zur Messung von Schraubenvorspannkraften mit Dehnungsmessstreifen (DMS) näher untersucht. Vorgestellt wird ein aufgebautes FEM-Modell zur Charakterisierung unterschiedlicher Einflussfaktoren und eine erste Testmessung.*



*In the following section, the repercussion free measurement method for measuring bolt preload tension with strain gauges that was presented last year is analysed. A structured FEM model for the characterisation of different influencing factors and a first test measurement will be presented.*

### Einleitung

Für einen sicheren Betrieb von Schraubenverbindungen ist die Kenntnis der Schraubenvorspannung unerlässlich. In vielen Anwendungsbereichen reicht ein Anziehen der Schraubverbindung mittels eines Drehmomentschlüssels aus, um die erforderliche Schraubenvorspannung zu gewährleisten. Dieses Verfahren ist jedoch stark von den vorliegenden Reibungsverhältnissen abhängig. Für kritische Anwendungszwecke und die Überwachung im laufenden Betrieb bieten sich weitere Verfahren an. Zwei übliche Messprinzipien basieren dabei auf die Verwendung von Dehnungsmessstreifen. Diese werden entweder auf einem verjüngten Schraubenschaft oder in einer im Schaft befindlichen zentrischen Bohrung installiert. Nachteil dieser Verfahren ist die Modifizierung der Schraube im verspannten Zustand und der damit resultierenden Verringerung der zulässigen Schraubenvorspannkraft. Daher soll das in /1/ beschriebene Verfahren näher untersucht werden, da eine quasi rückwirkungsfreie Messung ermöglicht wird. Vorgesehen ist dabei die Installation von DMS auf der Schraubenkopfoberfläche.

Zur Realisierung des Vorhabens wird im Folgenden eine FEM-Simulation einer vereinfachten Schraubverbindung aufgebaut. Diese wird zur Charakterisierung unterschiedlicher Einflussfaktoren und zur Beurteilung der in Versuchen auftretenden Streuungen verwendet. Abschließend erfolgt eine Testmessung.

## FEM - Simulation

Um die in der Schraube vorliegenden Beanspruchungsverhältnisse zu untersuchen, wurde ein FEM-Modell einer vereinfachten Schraubverbindung aufgebaut. Das Modell ist reduziert auf eine Schraube ohne Gewinde, sowie auf eine zylindrische Auflagefläche. Die Vorspannkraft der Schraube wird durch eine Zugkraft an der freien Schraubenstirnfläche dargestellt. Darüber hinaus wurde das Modell basierend auf die Norm DIN EN ISO 4014 (Sechskantschrauben mit Schaft) parametrisch aufgebaut. Einerseits können dadurch die Auswirkungen der tolerierten Schraubenabmessungen auf die Höhe der Beanspruchungen in einer Parameteranalyse untersucht werden. Andererseits besteht die Möglichkeit das aufgebaute Modell für alle in der oben genannten Norm dargestellten Schraubengrößen zu verwenden.

In Abbildung 1 ist exemplarisch der Spannungsverlauf (von Mises-Vergleichsspannung) im aufgebauten Modell (Schraube: M8 x 60 - 8.8) bei Belastung mit einer Schraubenvorspannkraft abgebildet.

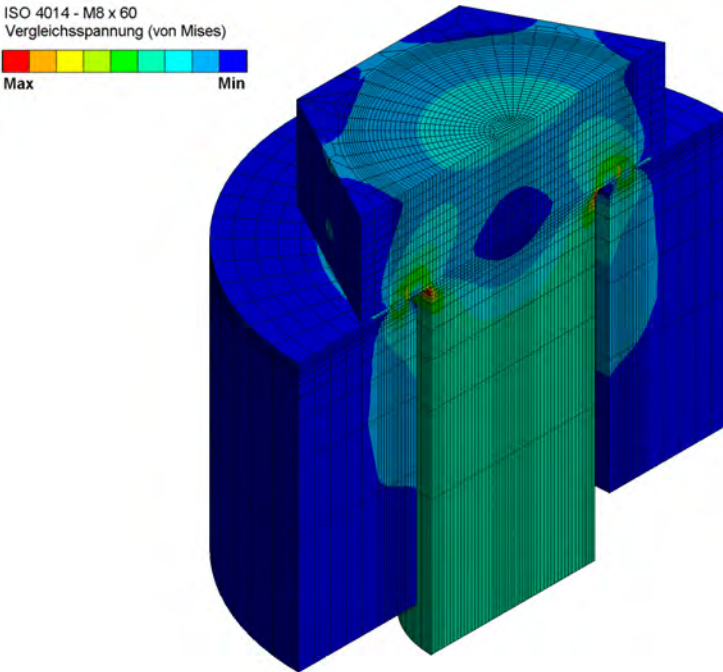


Abbildung 1: Exemplarischer Spannungsverlauf im aufgebauten Modell bei Belastung mittels einer Vorspannkraft  $F_V$

Da der Fokus im aktuellen Vorhaben auf den Schraubengrößen M6 und M8 liegt, wurde nach der Bestätigung der Plausibilität der Modellergebnisse eine Parameteranalyse durchgeführt. Das vergleichende Kriterium zwischen den einzelnen Untersuchungen ist hierbei die minimale normale elastische Dehnung (Druck) die sich in der Mitte der Schraubenkopfoberfläche ergibt. Diese Dehnung wird anschließend ebenfalls als Erwartungswert für die experimentellen Untersuchungen herangezogen.

Durch die Parameteranalyse wurde nachgewiesen, dass eine Veränderung bestimmter einzelner Abmessungen des Modells die Dehnungen auf der Schraubenkopfoberfläche beeinflusst. Als Beispiel sei hier der Schaftdurchmesser der Schraube  $d_s$ , der Durchmesser der Durchgangsbohrung  $d_d$  und die Kopfhöhe  $k$  zu nennen. Die Schlüsselweite  $s$  hat im Gegensatz zu den oben genannten Abmessungen keinen Einfluss. In Abbildung 2 wird der Einfluss einer Veränderung der Kopfhöhe  $k$  dargestellt. Die untersuchten Abmessungen entsprechen der unteren (5,06 mm) und oberen (5,54 mm) Toleranzgrenze, wobei  $k = 5,3$  mm dem Nennmaß entspricht.

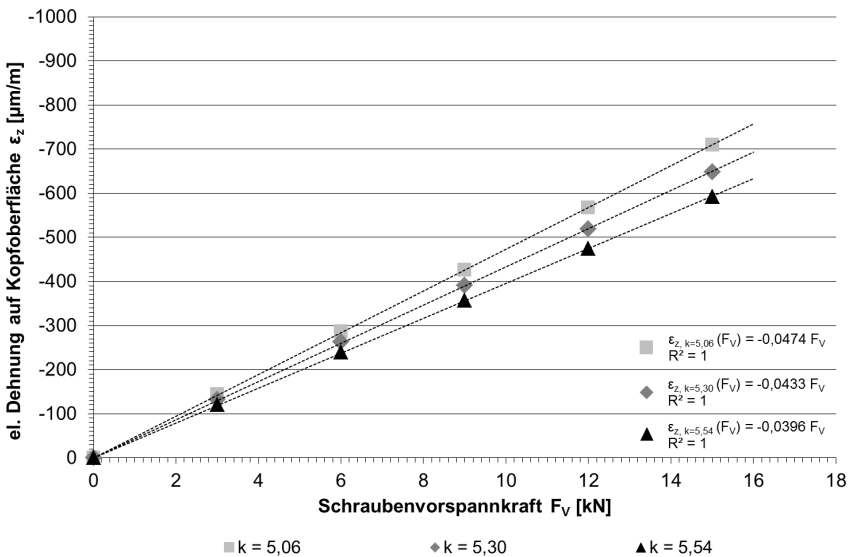


Abbildung 2: Verlauf der min. normalen elastischen Dehnung  $\epsilon_z$  auf der Kopfoberfläche in Abhängigkeit der Kopfhöhe  $k$  und der Vorspannkraft  $F_V$  bei sonst konstanten Abmessungen

Die erste wichtige Erkenntnis aus Abbildung 2 ist die für die Realisierung des Vorhabens notwendige Linearität zwischen Schraubenvorspannkraft und Dehnung. Ferner ist eine prozentuale Abweichung der Dehnung von bis zu 20 Prozent durch die fertigungsbedingten Toleranzen der Kopfhöhe zu erwarten.

Da eine Schraubenkennzeichnung auf jeder Kopfoberfläche vorgeschrieben ist, ist eine Bearbeitung dieser vor dem Kleben der DMS erforderlich. Dies ermöglicht es, die Kopfhöhe der zu beklebenden Schraube ungefähr auf das zugelassene Mindestmaß zu reduzieren um die Messwertstreuung der späteren Messung gering zu halten. Festgelegt wird daher  $k = 5,0 \text{ mm}$  bei M8 Schrauben und  $k = 3,7 \text{ mm}$  bei M6.

Durch das aufgebaute parametrische FEM-Modell der Schraube wurde gezeigt, dass eine Bestimmung der Schraubenvorspannkraft aus der am Schraubenkopf vorliegenden Dehnung möglich ist. Weiterhin wurden Erwartungswerte für die anschließenden experimentellen Messungen bestimmt und verschiedene Einflussfaktoren dargestellt. Damit diese Einflussfaktoren auch bei der späteren Messung charakterisiert werden können, wurde die Konstruktion aufbauend auf den FEM-Analysen aufgebaut (siehe Kapitel Messverfahren).

### Messverfahren

Für die Messung der Dehnungen an der Schraubenkopfoberfläche wurden unterschiedliche DMS-Bauformen in Betracht gezogen. Durch die vorliegenden Platzverhältnisse, insbesondere bei der M6 Schraube, wird die Auswahl beschränkt. Zusätzlich soll das Messverfahren einfach in der Handhabung und wirtschaftlich sein, sodass sich die Auswahl weiter reduziert. Aufgrund dieser genannten Kriterien werden im weiteren Vorhaben lineare DMS mit Anschlusskabeln verwendet. Diese DMS werden mit dem Ziel der Messung der maximalen Empfindlichkeit bzw. der maximalen Dehnung mittig auf der Schraube appliziert. In Abbildung 3 ist die Positionierung der DMS auf dem Schraubenkopf dargestellt.

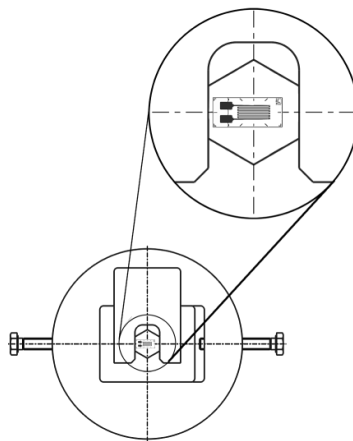


Abbildung 3: Draufsicht der konstruierten Messeinrichtung mit einem applizierten linearen DMS der Fa. HBM (DMS aus /3/)

Nach der Auswahl der DMS erfolgte die Konstruktion der Messeinrichtung für die experimentellen Untersuchungen (siehe Abbildung 4). Dabei dient die Ringkraftmessdose (6) zur Messung der Schraubenvorspannkraft im verspannten Zustand der zu untersuchenden Schraube (3). Das Verspannen der Schraube erfolgt durch das Anziehen der Mutter (10), wobei die Schraubensicherung (4) das Mitdrehen der Schraube verhindert. Für die Untersuchung der beiden Schraubengrößen ist die Schraubenauflagefläche (5), sowie die Mutterauflage (9) austauschbar. Durch das Axiallager (8) der Mutterauflage wird versucht ein möglichst annähernd torsionsfreies Anziehen der Schraube zu ermöglichen.

Einige der im Kapitel „FEM-Simulation“ ermittelten Einflussfaktoren wurden innerhalb der Konstruktion und Fertigung berücksichtigt. So ist die Schraubenauflagefläche für die beiden Schraubengrößen in jeweils dreifacher Ausführung vorhanden (unterschiedliche Durchgangsbohrungen). Außerdem ist durch ein Wenden der Auflagefläche eine Anpassung der Bohrungsfasen möglich. Des Weiteren kann durch die seitliche linke Schraube (1) eine gewünschte Exzentrizität zwischen der Schraubenachse und der Bohrungsachse eingestellt werden.

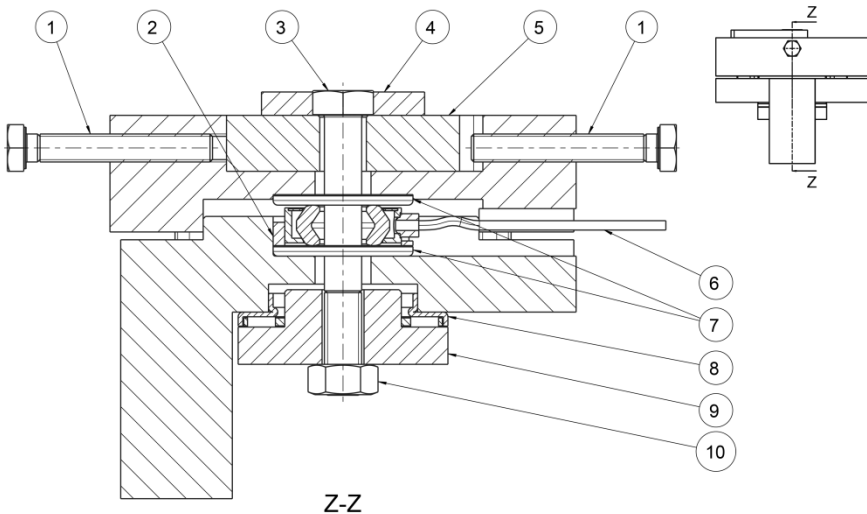


Abbildung 4: Schnittansicht der konstruierten Messeinrichtung im zusammengebauten Zustand



## Experimentelle Untersuchung - Erste Ergebnisse

Für die Ermittlung der Empfindlichkeit werden die Schrauben entsprechend der zuvor getroffenen Erkenntnisse mit einem DMS versehen und in die Messeinrichtung eingesetzt. Der Versuchsablauf beinhaltet anschließend ein stufenförmiges Anziehen und Lösen der Schraube unter Berücksichtigung der maximalen Vorspannkraft. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wird die Schraube einige Male neu eingesetzt und die Messungen entsprechend wiederholt.

In Abbildung 5 sind die Messwerte der durchgeführten Messung an einer M8 x 60 - 8.8 Schraube als Datenpunkte dargestellt. Durch diese ist eine Regressionsgerade gelegt, die die elektrische Empfindlichkeit des Systems beschreibt (siehe Gleichung 1).

$$\frac{u}{F_V} = -0,0239 \frac{\text{mV/V}}{\text{kN}} \quad 1$$

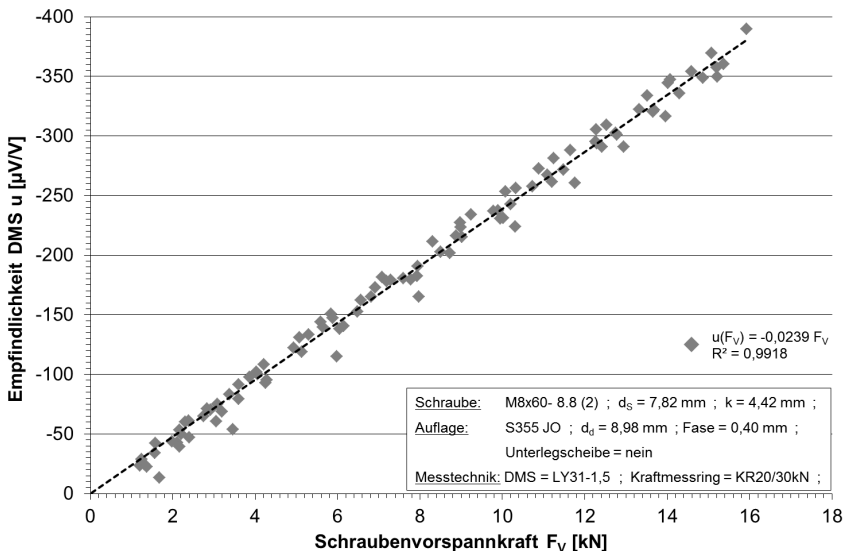


Abbildung 5: Datenpunkte der gemessenen Schraubenvorspannkraft  $F_V$  der Ringkraftmessdose in Abhängigkeit der gemessenen elektrischen Empfindlichkeit des DMS  $u$

Im Vergleich zur durchgeführten Messung mit linearem DMS in /1/, weist die Abbildung 5 eine geringere Streuung der Messwerte auf. Als Gründe hierfür

werden der geänderte Versuchsaufbau mit verbesserter Messtechnik und die genauere Platzierung der DMS auf dem Schraubenkopf angenommen.

Bei Betrachtung der ermittelten mittleren Empfindlichkeit, zeigt sich für die aktuell durchgeführten Messungen eine in etwa gleich große Empfindlichkeit wie in /1/. Da im Vergleich zu /1/ jedoch eine andere Schraubengröße untersucht wurde, sind die ermittelten Empfindlichkeiten nicht direkt miteinander vergleichbar. Wie sich die Empfindlichkeiten in Abhängigkeit der Schraubengrößen verändern wird in weiteren Untersuchungen geprüft. Ferner muss angemerkt werden, dass die zuvor dargestellte Messung mit einer nach der Norm DIN EN ISO 4014 zu geringen Kopfhöhe durchgeführt wurde ( $k = 4,4 \text{ mm}$ ). Dennoch wird bei den weiterfolgenden Messungen mit einer Kopfhöhe von  $k = 5,00 \text{ mm}$  eine immer noch ausreichend hohe Empfindlichkeit erwartet.

### Vergleich: Testmessung und Berechnung mittels FEM-Modell

In Abbildung 6 ist ein Vergleich der ermittelten Dehnungen aus der Testmessung (Mittelwert) und einer auf die untersuchte Schraube angepasste FEM-Berechnung dargestellt. Die Abweichung zwischen beiden Kurven beträgt ca. 9 %. Dies wird als akzeptable Abweichung eingestuft, da keine genauen Werkstoffkennwerte vorliegen und nicht alle für das FEM-Modell notwendigen Schraubenabmessungen ermittelt werden können. Zusätzlich muss noch die statistische Unsicherheit der durchgeführten Messung berücksichtigt werden.

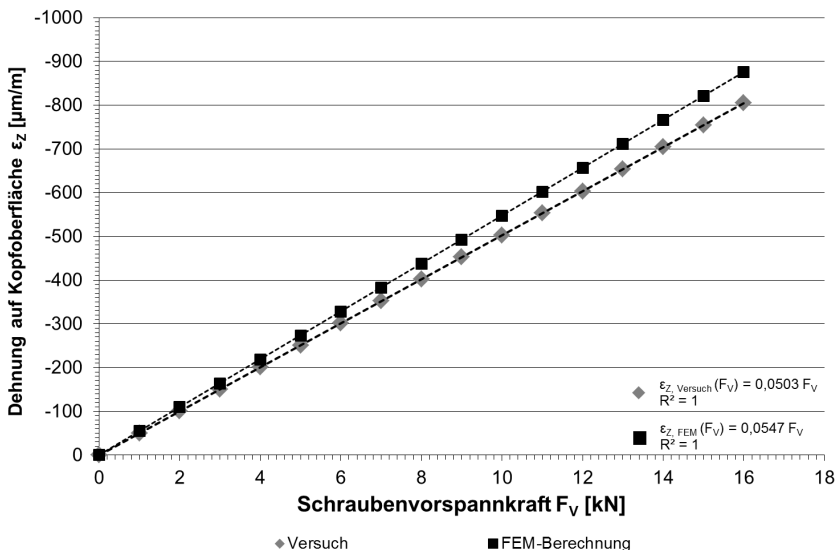


Abbildung 6: Vergleich der ermittelten Dehnungen aus der Testmessung und einer FEM-Berechnung

## Ausblick

Im weiteren Verlauf werden weitere Schrauben in den Größen M6 und M8 untersucht. Im Anschluss an die Versuche wird dann eine statistische Auswertung dieser zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit des Messverfahrens durchgeführt. Weiterhin sollen unterschiedliche Einflussfaktoren wie z.B. die Änderung der Durchgangsbohrungen untersucht werden.

Ferner soll bei zu hoher Streuung der Messergebnisse, infolge der unterschiedlichen Schraubengeometrien, das FEM-Modell zur Verbesserung der Ergebnisse verwendet werden. Dafür ist vorgesehen eine statistische Versuchsplanung (DOE) in ANSYS durchzuführen, um eine Gleichung zu ermitteln durch die anschließend ein Korrekturfaktor für die einzelnen Schrauben berechnet werden kann.

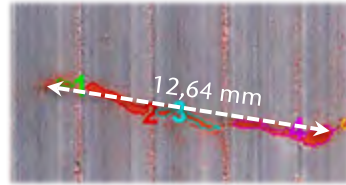
## Zusammenfassung

In dem vorliegenden Artikel wurde das in /1/ beschriebene Messverfahren zur Ermittlung von Schraubenvorspannkraften mittels am Schraubenkopf installierter DMS genauer untersucht. Hierfür wurde ein FEM-Modell aufgebaut, welches die Möglichkeit schafft unterschiedliche Einflussfaktoren zu charakterisieren. Als Beispiel sei hier die Kopfhöhe zu nennen. Allein durch die fertigungstechnische Toleranz ist mit einer Streuung der Ergebnisse von bis zu 20 % zu rechnen. Das Ziel ist daher die Schraubenkopfhöhe vor der Installation der DMS auf eine normierte Höhe plan zu schleifen. Aufbauend auf der FEM-Simulation wurde anschließend die Platzierung der DMS festgelegt und eine Messeinrichtung konstruiert. In einer ersten Testmessung wurden anschließend die Ergebnisse aus /1/ bestätigt. Im Unterschied zur vorangegangenen Messung ist mit einer geringeren Streuung, sowie mit einer höheren elektrischen Empfindlichkeit zu rechnen. Dieses Ergebnis soll durch weitere Versuche abgesichert werden und als allgemeingültiges, quasi rückwirkungsfreies Messverfahren etabliert werden.

## Literatur

- /1/ Hofmann, S.: Möglichkeiten zum Erfassen der Schraubenvorspannung mit Dehnungsmessstreifen, Institutsmittteilung Nr. 39, IMW Clausthal 2014
- /2/ Norm DIN EN ISO 4014 Juni 2011. Sechskantschrauben mit Schaft; Produktklassen A und B
- /3/ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: Dehnungsmessstreifen - Vollendete Präzision von HBM. Darmstadt, 2015. - Produktkatalog

## Entwicklung eines optischen Rissvermessungssystems



Jakob, M.

*Zur Ermittlung von Risswachstum wurde am Institut für Maschinenwesen ein optisches Verfahren zur Erfassung und automatisierten Vermessung von Rissen entwickelt. Zur Sichtbarmachung der Risse wurde die Magnetpulverprüfung angewendet, die Erfassung und Auswertung der Bilder erfolgte mit MATLAB.*

*An optical measuring system for detecting and recording cracks in welded seams was developed at the Institute of Mechanical Engineering. Magnetic particle inspection was used for uncovering fractures. The resulting images were recorded and analyzed with MATLAB.*

### Einleitung und Anforderungen

Bei der Nahtprüfung eines Trommelmantels zeigten sich kleine Risse an einer umlaufenden Schweißnaht. Durch wiederholtes Aufbringen von Torsions- und Manteldrucklasten durch den am Institut neu entwickelten 500 kNm Torsionsprüfstand soll die Lebensdauer der Trommel simuliert werden, um die vorhandenen Risse auf ein mögliches Risswachstum zu untersuchen. Im Rahmen einer Abschlussarbeit [1] wurden dazu die vorhandenen Risse detektiert, passende Risserschließungssysteme untersucht und ausgewählt. Die Realisation der Bilderschließung, der Bildverarbeitung und der Vermessung der Risse erfolgte mit MATLAB. Ziel war es, ein mögliches Risswachstum in Abhängigkeit der Belastungszyklen kontinuierlich aufzuzeichnen.

### Systeme der Risserkennung

Mit Hilfe der magnetischen Rissprüfung konnten die Positionen der Risse festgestellt werden. Zur Bildaufnahme wurde die Mikroskop-Kamera DigiMicro Profi mit zwei Zoomstufen eingesetzt. Der aufgezeichnete Riss in Abbildung 1 hebt sich nur sehr schwach von der mit Riefen versehenen Trommeloberfläche hervor. Die Spuren des Risses gehen in den Unebenheiten der Bearbeitungsriefen, sowie Staub und anderen Fremdkörpern unter. Auf Grund dieser Bedingungen erscheint eine reine softwarebasierte Umsetzung der Rissvermessung über eine einfache Sichtprüfung nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurden verfügbare Risserkennungssysteme bezüglich ihrer Eigenschaften untersucht und deren Eignung für die an die Prüfaufgabe gestellten Anforderungen wie Kosten,

geometrische Randbedingungen und Qualität der Messung bewertet. Eine bevorzugte reine Sichtprüfung mittels Mikroskop oder die Detektion der Risse über das Penetrierverfahren stellten sich als nicht geeignet heraus, da beide Verfahren die Risse experimentell nicht ausreichend sichtbar und auswertbar machen konnten.

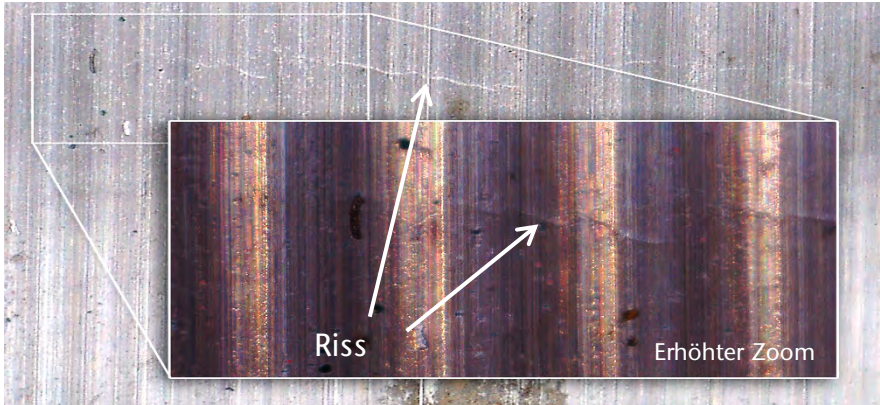


Abbildung 1: Schwach sichtbare Risspuren ohne und mit erhöhtem Zoom

### Magnetische Rissprüfung

Erst durch die magnetische Rissprüfung konnten die Risse ausreichend sichtbar gemacht werden. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden verschiedene Risspulver, Beleuchtungsszenarien und Grundierungen bezüglich Aufwand und erzeugten Kontrast untersucht. Das Pulver BS-850 A der Firma Ril Chemie erzeugte mit den in der Kamera eingebauten LEDs ohne zusätzliche Grundierung ein sehr kontrastreiches, orangefarbenes Rissbild (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: Mittels magnetischer Prüfung erfasstes Rissbild

### Umsetzung der Rissaufnahme

Nach einer bestimmten Anzahl an Lastzyklen wird die Prüfung pausiert und eine Auswahl an Rissen der magnetischen Rissprüfung unterzogen: Nach dem Säubern mit einem Reiniger werden alle Rissstellen magnetisiert und gleichzeitig ein magnetisierbares Risspulver aufgesprüht. Sind alle Stellen getrocknet, so kann nacheinander jeder Riss nach dem Einbau der Kamera aufgenommen werden. Danach kann mit dem Abfahren der Lastzyklen fortgefahren werden.

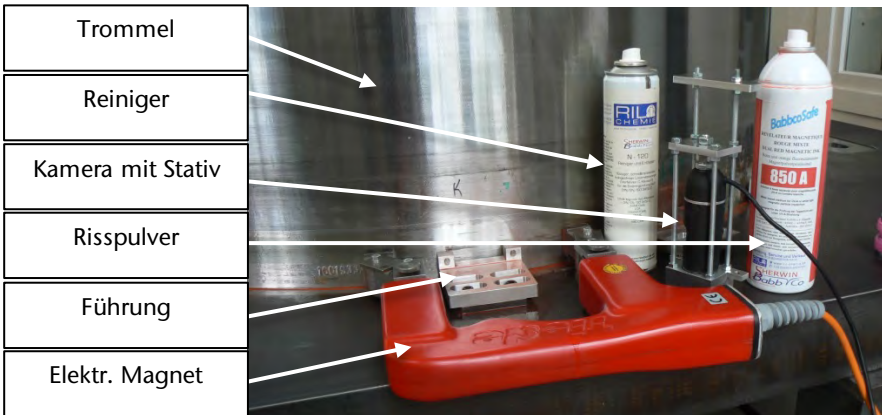


Abbildung 3: Verwendete Komponenten für die Rissprüfung

### Bildaufnahme mittels neuer Software: MikroUSBCap

Die Erfassung der Bilder erfolgte mit einer digitalen Mikroskop-Kamera "DigiMicro Profi" von DNT. Die mitgelieferte Software „DigiMicro Profi Software“ ermöglicht das Speichern von Bildern und Videos. Eine ereignisgesteuerte Bilderfassung durch die Vorgabe von externen Steuersignalen war damit allerdings nicht möglich. Es entstand am IMW ein MATLAB-GUI, welches das manuelle, zeitgesteuerte sowie durch ein externes Spannungssignal ausgelöste Auslesen von bis zur vier Kameras ermöglicht. Das Einlesen der externen Spannungssignale erfolgte mit einem preisgünstigen Entwicklungsboard über eine Arduino-USB-MATLAB-Schnittstelle. Die mit dem GUI erfassten Bilder werden in einem weiteren Programm ausgewertet.

### Bildverarbeitung und Bildanalyse mit ARLM

Das GUI „ARLM“ dient zur Verarbeitung der erfassten Bilder und der automatisierten Vermessung der Risse. Das Programm ist in verschiedene Bereiche gegliedert, welche in Abbildung 4 mit Nummern versehen sind. Die Bereiche 1

und 2 dienen dem Einladen und Bearbeiten von einem sogenannten Masterbild, das beispielhaft für die anderen Rissbilder konfiguriert wird. Durch geeignetes Zurechtschneiden des Bildbereiches, Farbselektion und Kantendetektion können die Risse über die Software erkannt werden. Durch den Abgleich von einer im Realen bekannten Strecke im Bild kann unter dem Bereich 3 „Kalibrieren“ eine Länge in Pixel in ein reales Längenmaß verrechnet werden. Mit der Schaltfläche 4 werden die über den Prüfverlauf aufgenommenen Rissbilder in das Programm geladen. Durch Betätigung der Schaltfläche 5 werden die eingeladenen Bilder automatisiert nach den vorab getroffenen Einstellungen des Masterbildes verarbeitet. Das Ergebnis der Flächen- und Längenvermessung wird in Bereich 6 als Tabelle angezeigt und kann als MATLAB, Excel oder CSV-Datei bzw. als Film oder in Form von Einzelbildern exportiert werden.

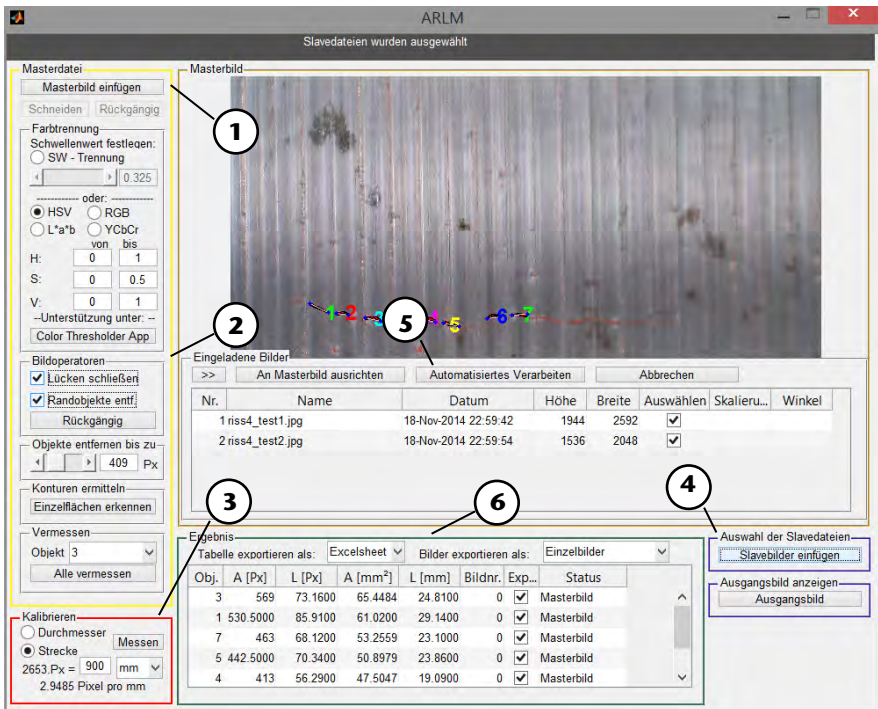


Abbildung 4: Aufbau des Programms ARLM

### Auswertungs – GUI

Durch die Riefen auf der Trommeloberfläche kommt es zu Unterbrechungen der Rissdarstellung (s. Abbildung 2 und 5). Mit dem Programm ARLM werden nur Abschnitte des gesamten Risses ausgemessen. Ein einfaches Aufsummieren aller

vermessenen Einzellängen würde auf Grund der Lücken und der unterschiedlichen Ausrichtung der Teilrisse zu einem falschen Ergebnis führen. Des Weiteren färbt das Pulververfahren auch Bereiche ein, die nicht zum Riss gehören. Auch mehrmaliges Einfärben des gleichen Risses führte verfahrensbedingt zu unterschiedlichen Rissdarstellungen.

Es wurde im Rahmen der Umsetzung notwendig, einen stabilen Algorithmus zu finden, der die Rissanfänge zuverlässig erkennt und der die Kontur der Risse nachverfolgen kann. Dennoch sollte er gegenüber Störungen, wie zum Beispiel fälschlicherweise eingefärbter Flächen außerhalb des Risses, unempfindlich sein.

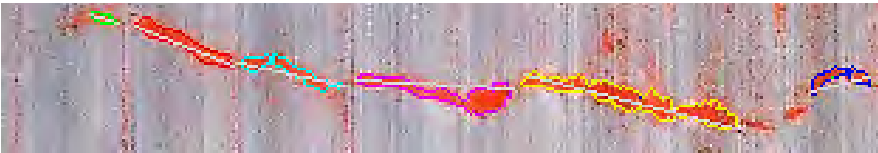


Abbildung 5: Unterbrochene Rissabschnitte (Ausschnitt)

Durch mehrmaliges Anwenden und Aufzeichnen der Rissprüfung pro Messvorgang können die erkannten Rissflächen in dem „Auswertungs-GUI“ in einem Histogramm (Abbildung 6) übereinander gelegt werden. Bereiche, die nur selten auftreten, werden als fehlerhafte Einfärbungen erkannt und herausgefiltert. Ausgenommen davon sind die Rissanfänge, die das Programm automatisiert erkennt.

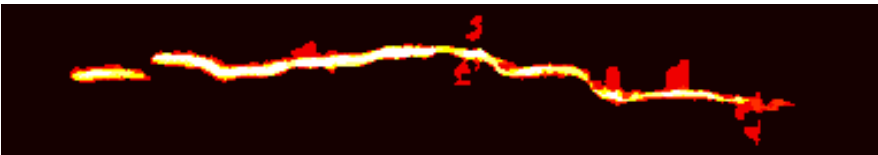


Abbildung 6: Histogramm der erfassten Rissbilder

Über das direkte Vermessen der am weitesten auseinander liegenden Punkte oder durch Splineinterpolation der Schwerpunkte der Teilrisse können die Risslängen bestimmt werden (s. Tabelle 1). Obwohl der gleiche Riss mehrmals in gleicher Weise eingefärbt und aufgezeichnet wird, zeigen sich deutliche Abweichungen in den gemessenen Längen. Aus diesem Grund war ein Teil der Arbeit ein Eignungsnachweis des entwickelten Prüfprozesses nach VDA 5.

Tabelle 1: Messergebnisse einer Wiederholungsmessung  $n = 5$

Messung	1	2	3	4	5	$\bar{l}$	s
Direkt [Px]	1219,76	1253,84	1334,05	1265,76	1355,66	1285,82	50,97
Spline [Px]	1225,66	1260,27	1343,03	1270,29	1362,17	1292,29	51,78



## Eignungsnachweis des entwickelten Prüfprozesses

Mit Hilfe der Stochastik lassen sich Einflussmöglichkeiten auf einen Messprozess mathematisch beschreiben. Die Standardmessunsicherheit  $u$  gibt dabei einen Wertebereich an, in dem der wahre Wert einer Messung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Mit der Standardunsicherheit wird derjenige Bereich bezeichnet, in dem 68 % aller Messwerte einer normalverteilten Wiederholungsmessung liegen. Werden die Grenzen des Bereiches erhöht, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Messwerte im definierten Bereich liegen. Dazu kann die Standardunsicherheit  $u$  mit einem Erweiterungsfaktor  $k$  multipliziert werden, um die sogenannte erweiterte Unsicherheit  $U$  zu bestimmen. In der Technik wird in der Regel der Erweiterungsfaktor  $k = 2$  verwendet. Das bedeutet, dass 95,45 % der Messwerte innerhalb des angegebenen Intervalls liegen. Durch Wiederholungsmessung konnte so die erweiterten Unsicherheiten der Software (1,56 Px), des Kamerasystems ohne Einfluss der Magnetpulverprüfung (28,80 Px), und des Gesamtsystem (79,86 Px) auf eine Bezugslänge von 1200 Px bestimmt werden. Die durch das magnetische Verfahren sehr schwankende Messung konnte durch eine verbesserte Rissprüfung, die Anwendung von Signifikanztests für den Stichprobenmittelwert sowie mittels Ausreiserests nach Dixon stochastisch so weit abgesichert werden, dass eine Aussage über ein relatives Risswachstum in Abhängigkeit der Belastungszyklen möglich wurde.

## Zusammenfassung

Im Rahmen einer Abschlussarbeit wurde ein Messsystem zur Ermittlung von Risslängen entwickelt. Mittels magnetischer Rissprüfung konnten die Risse sichtbar gemacht werden. Zur Erfassung und Vermessung der Rissbilder wurden Programme entwickelt und der Prüfprozess positiv auf seinen Eignungsnachweis überprüft. Somit steht dem Institut nun ein geeignetes Verfahren zur Rissfortschrittmessung zur Verfügung. Die entwickelte Software mit den MATLAB-Schnittstellen für die Kameras und dem Arduino ist durch ihren modularen Aufbau universell für optische Längenmessungen mittels Kamera einsetzbar.

## Quelle des Artikels

- /1/ Jakob, M.: Entwicklung eines optischen Verfahrens zur Erfassung und automatisierten Vermessung von Rissen an Seiltrommeln [Masterarbeit], IMW Clausthal 2015

## Untersuchungen zur Übertragungsfähigkeit stirnseitig verschraubter Freilauf-Flansch-Verbindungen – Vorstellung der Prüfmöglichkeiten am IMW



Hofmann, S.

*Die Verbindung zwischen dem Freilaufaußenring und der kundenspezifischen Anschlusskonstruktion kann z.B. durch Befestigungsflansche, Pressverbindungen oder stirnseitige Verschraubungen erfolgen. Bei größeren Nennmomenten wird jedoch die Schraubverbindung von Freilaufherstellern und Kunden bevorzugt. Hervorgerufen durch das kraftschlüssige Wirkprinzip der Freiläufe ergeben sich besondere Belastungen für die stirnseitige Schraubverbindung die zu einem vorzeitigen Aufheben des Kraftschlusses in der Schraubenverbindung führen. Die hierzu führenden Mechanismen sollen im Rahmen eines FVA-Projekts geklärt und eine Berechnungsgrundlage für die verbleibende kraftschlüssige und formschlüssige Übertragungsfähigkeit erstellt werden.*

*Various possibilities exist for the connection between the outer ring of a free wheel clutch and the customer's specific adjacent construction. For example the connection can be done by mounting flanges, press-fit or front-mounted screw connections. Out of these the screw connections are preferred by manufacturers and customers for higher nominal torques. The friction based working principle of these clutches is causing specific loads on the screw connection. This is leading to a premature failure of the traction in the screw connection. In the course of a FVA-project the mechanisms that are leading to this premature failure are to be clarified. Also a calculation method for the maximum traction and maximum form-fit is to be developed.*

### Einleitung

Klemmkörper- und Klemmrollenfreiläufe werden als selbstständig richtungsabhängig schaltende Kupplungen eingesetzt. Für die Verbindung zwischen dem Freilaufaußenring und der kundenspezifischen Anschluss-konstruktion (Flansch) existieren mehrere gebräuchliche Möglichkeiten.

In diesem Zusammenhang ergeben sich aufgrund der hohen prinzipbedingten Normalkräfte an den Klemmstellen im Freilauf elastische Aufweitungen des Außenrings, welche Probleme für die kraftschlüssige Übertragung durch die

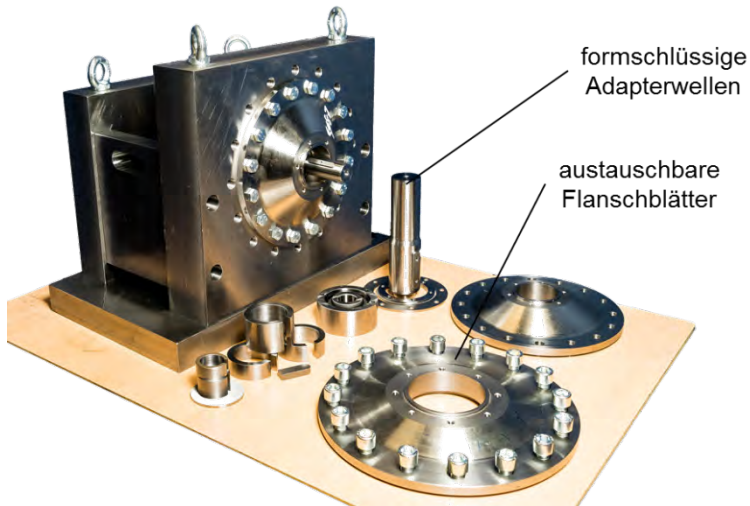
stirnseitige Schraubenverbindung bedeuten. Weiterhin wird die Verbindung, hervorgerufen durch die beiden Betriebszustände des Mitnahme- und Freilaufbetriebs, durch ein schwellendes Drehmoment belastet. Aufgrund dieser freilaufspezifischen Belastungssituation am stirnseitig befestigten Außenring kommt es gegenüber einer Belastung mit einem theoretischen, reinen Torsionsmoment zu einer vorzeitigen Aufhebung des Kraftschlusses zwischen Freilaufaußenring und Anschlusskonstruktion. Die Reduzierung der kraftschlüssigen Übertragungsfähigkeit, infolge der hohen radial aufweitenden Klemmkräfte, hervorgerufen durch das kraftschlüssige Funktionsprinzip von Klemmkörper- und Klemmrollenfreiläufen, gegenüber den geltenden Auslegungsvorschriften ist bisher noch nicht bekannt. Weiterhin kommt es infolge der vorzeitigen Aufhebung des Kraftschlusses solange zu Verschiebungen zwischen den beteiligten Komponenten Freilaufaußenring, Schrauben und Flansch, bis die Schrauben in Umfangsrichtung zur Anlage kommen. Hierdurch findet die Drehmomentübertragung entgegen den geltenden Auslegungsvorschriften nicht mehr rein kraftschlüssig, sondern zumindest zeitweise durch eine Kombination aus Kraft- und Formschluss statt.

Ziel des Projekts ist die Ursachen für die vorzeitige Aufhebung des Kraftschlusses am stirnseitig befestigten Freilaufaußenring sowie Einflussfaktoren auf die kraftschlüssige Grenze der Übertragungsfähigkeit (Rutschgrenze) in der Trennfuge zwischen Freilaufaußenring und Anschlussflansch zu ermitteln. Ausgehend von diesen Kenntnissen sollen mögliche Steigerungen des Kraftschlusses diskutiert werden. Weiterhin sind die Grenzen der formschlüssigen Übertragungsfähigkeit zu bestimmen. Hierbei ist zu klären, ob durch eine elastische oder sogar plastische Beanspruchung der Schrauben als Scherbolzen der Kraftschluss über die Zeit aufgehoben wird und ob es somit zum vorzeitigen Lösen der Verbindung kommen kann.

## **Prüfstand**

Nachdem in /1/ das Forschungsvorhaben und das geplante Vorgehen zur Erreichung einer Berechnungsgrundlage vorgestellt wurden. Soll im folgenden Artikel auf die am Institut vorhandenen Prüfmöglichkeiten zur Untersuchung von stirnseitig befestigten Freilauf-Flansch-Verbindungen eingegangen werden.

Zur Untersuchung der Grenzen der kraftschlüssigen (Rutschgrenze) und formschlüssigen (Schermoment der Schraubenverbindung) Übertragungsfähigkeit wurde ein Prüfstand am IMW aufgebaut. Der Prüfstand bietet die Möglichkeit stirnseitige Verbindungen mit einem Drehmoment von bis zu 6 kNm zu belasten. Der Prüfaufbau (siehe Abbildung 1) kann über austauschbare formschlüssig Adapterwellen und Flanschblätter an die zu untersuchenden Prüflinge angepasst werden.

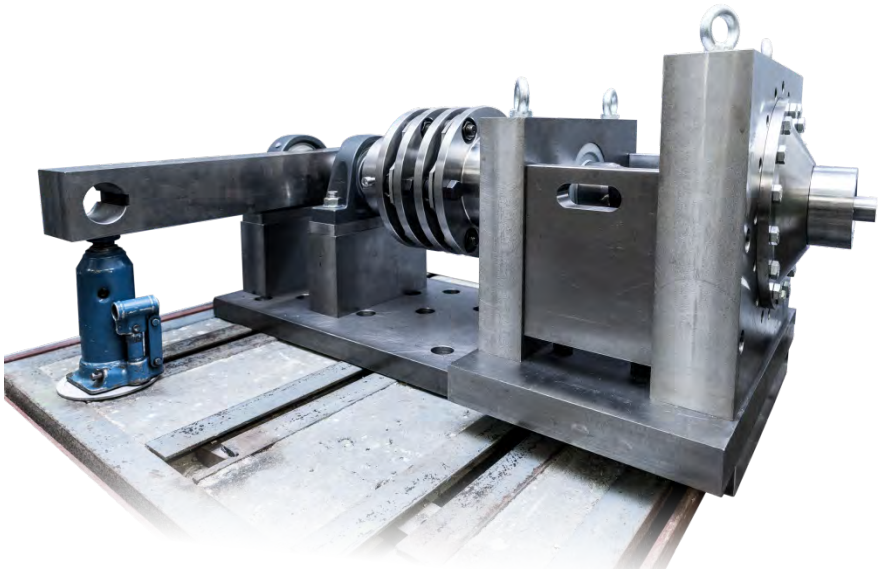


*Abbildung 1: Prüfaufbau für Rutsch- und Scherversuche an stirnseitig befestigten Freiläufen*

Die Welle des Prüfaufbaus ist mit einer DMS-Messbrücke zur Messung der anliegenden Torsionsdrehmomente ausgestattet und kann mit optischen Wegmesssystemen zum Erfassen der Aufweitung und Verschiebung bzw. des Durchrutschens des Freilaufaußenrings erweitert werden. Der Prüfaufbau ist um eine Belastungseinrichtung erweitert, welche aus einer gelagerten Welle mit Hebel besteht. Über diesen Hebel kann von einem Hydraulikzylinder ein Drehmoment zur Belastung der zu untersuchenden Verbindungen erzeugt werden. Weiterhin ist eine Stahllamellenkupplung zwischen den der Belastungseinrichtung und dem eigentlichen Prüfaufbau verbaut, um eine querkräftfreie Übergabe des Drehmoments auf den Prüfaufbau zu ermöglichen. Der Prüfstand zur Untersuchung der Übertragungsfähigkeit von stirnseitig befestigten Freiläufen ist in seiner Gesamtheit in Abbildung 2 dargestellt.

## **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Artikel wurde der am IMW zur Untersuchung von stirnseitigen Schraubenverbindungen zur Verfügung stehenden Prüfstand kurz vorgestellt. Dieser kann stirnseitige Verbindungen mit bis zu 6 kNm querkräftfrei belasten und durch austauschbare Adaptierungen an verschiedene Prüflinge angepasst werden.



*Abbildung 2: Prüfstand für Rutsch- und Scherversuche an stirnseitig befestigten Freiläufen mit Belastungseinrichtung, Kupplung und Prüfaufbau*

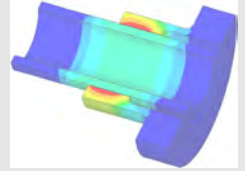
## **Danksagung**

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Stirnseitige Befestigung von Freiläufen“ (FVA-Nr. 704, IGF-Nr. 17481 N/1).

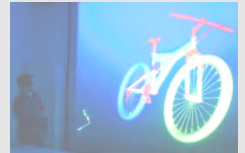
## **Literatur**

- /1/ Hofmann, S.: Untersuchungen zur Übertragungsfähigkeit stirnseitig befestigter Freiläufe. Institutsmittellung Nr. 39, IMW Clausthal 2014
- /2/ Hofmann, S.: FVA 704, Stirnseitige Befestigung von Freiläufen; Zwischenbericht; Forschungsreport 2014; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2014; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2014
- /3/ Hofmann, S.: FVA 704, Stirnseitige Befestigung von Freiläufen; Zwischenbericht; Forschungsreport 2015; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2015; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2015

Konstruktion und Berechnung von  
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und  
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik  
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte





## Erfahrungen aus einem Jahr Techniker2Bachelor – Offene Hochschule



Kasüschke, L. ; Friedland, J.

*Seit August 2014 fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBWF) das an der TU Clausthal angesiedelte Projekt „Techniker2Bachelor“. Nach jetzt einem Jahr kristallisieren sich die Herausforderungen deutlich heraus und die ersten Erkenntnisse werden gewonnen.*

*The Federal Ministry of Education and Research (BMBWF) supports the Project “Techniker2Bachelor” at TU Clausthal since August 2014. After one year now the challenges are defined and first results are identified.*

### Projekthalte und Ziele

Mit dem Projekt Techniker2Bachelor soll die beidseitige Durchlässigkeit zwischen universitärer und betrieblicher Ausbildung gefördert werden. In beide Richtungen soll dabei eine Verkürzung der Ausbildungsdauer ermöglicht werden. Zum einen soll den Studienanfängern, die ihre Hochschulzugangsberechtigung über den Technikerabschluss erlangt haben (nachfolgend als Probanden bezeichnet), dabei eine pauschale Anrechnung der beruflich erworbenen Kompetenzen gewährt werden. Zum anderen sollen Studienabbrecher als Auszubildende in Unternehmen vermittelt werden, um dem Fachkräftemangel im MINT-Bereich entgegen zu wirken. Dabei soll nach Möglichkeit auch der Zugang zu einer verkürzten Techniker Ausbildung realisiert werden. Das Projekt hat mit der Technikakademie der Stadt Braunschweig als Kooperationspartner begonnen und soll auf weitere Technikerschulen ausgebaut werden. Den Probanden soll dabei eine Verkürzung der Studiendauer von etwa zwei Semestern gewährt werden, wobei sie in den regulären Bachelorstudiengang integriert sind, um die Vergleichbarkeit mit den regulären Studenten zu gewährleisten. Durch die pauschale Anrechnung der beruflich erworbenen Kompetenzen verringert sich der administrative Aufwand für eine Anrechnung erheblich. Deswegen ist das Ziel möglichst vielen Technikern eine pauschale Anrechnung zu ermöglichen. Durch das Projekt wird den Technikern eine besondere Betreuung zuteil. Diese dient auch dazu Probleme herauszufiltern und Maßnahmen zu deren Behebung zu treffen. In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die Stärken des Projektes an der TU Clausthal noch einmal dargestellt.



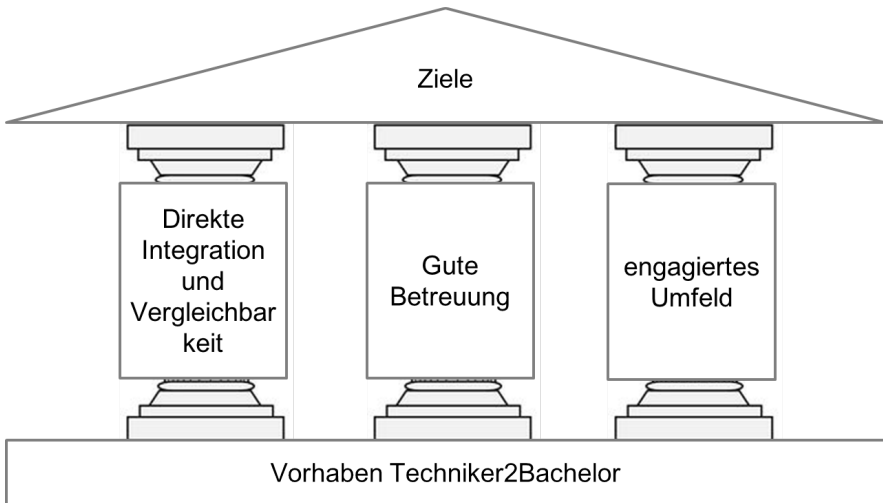


Abbildung 1: Stärken des Vorhabens

### Besondere Herausforderungen

Die Bearbeitung des im Rahmen des Bund-Länder-Wettbewerbs „Aufstieg durch Bildung: offene Hochschulen“ /1/ geförderten Projektes lehnt sich an die ANKOM-Initiative „Übergänge von der beruflichen in die hochschulische Bildung“ /2/ an. Die grundlegende Voraussetzung für das Projekt ist jedoch die offene Hochschule Niedersachsen, durch die ein Hochschulstudium auch ohne Abitur möglich wird /3/. Eine der größten Herausforderungen des Projektes ist neben der externen Bekanntmachung die interne Bekanntmachung, innerhalb der Hochschule. Erst dadurch wird eine enge Zusammenarbeit mit anderen Hochschuleinrichtungen möglich, die für das Projekt sehr wichtig ist. So zum Beispiel die Zusammenarbeit mit dem Prüfungsamt und dem Studentensekretariat. Auch die Vernetzung mit Lehrveranstaltungen und Zusatzangeboten für beruflich Qualifizierte, welche nicht vom Projekt betreut werden, stellen eine Herausforderung dar.

Eine weitere Herausforderung ist die Erstellung einer Datenbasis, um die Arbeit im Projekt und die Kommunikation nach außen sicherzustellen. Im Projekt stellt sich insbesondere die Herausforderung einer ausreichenden Datenbasis für eine Anrechnung mit einer sogenannten mäßig strukturierten Methode. Die mäßig strukturierten Methoden benötigen Material zu Lerngebietsbeschreibungen, welche sowohl die Inhalte einer Lehrveranstaltung, als auch das Kompetenzspektrum, welches nach der Teilnahme an der Veranstaltung erreicht ist, abbilden. Durch die strukturierten Methoden wird die Vergleichbarkeit zwischen den Lehrveranstaltungen an der Technikerschule und der TU Clausthal überprüft - und

im Falle einer Äquivalenz - eine Anrechnungsempfehlung ausgesprochen. Die Ergebnisse aus den Vergleichsdokumenten sind jedoch eine institutionalisierte Form des Lernergebnisses. Insbesondere der individuelle Lernstand kann durch diese Methoden nicht ausreichend abgebildet werden.

Die dritte Herausforderung ist es einen Regelkreise im Projekt zu integrieren. Dieser technische Begriff ist im Umfeld des Projektes wahrscheinlich am besten mit Qualitätsmanagement und Prozessoptimierung zu übersetzen. Für diesen Regelkreis müssen die Schnittstellen im Projekt identifiziert werden und mögliche Stellglieder im Prozess vorgesehen werden (z.B. Tutorien, festgelegte Verfahrensabläufe). Mit den Stellgliedern ist es bei Bedarf möglich, operativ oder strategisch im Projekt einzugreifen. Die komplexe Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Akteuren macht es dabei erforderlich die Arbeitsziele des Projektes mit einzelnen Schnittstellen zu verknüpfen. So kann der Handlungsspielraum und die zu informierenden Akteure bei Problemen anhand der Schnittstelle identifiziert werden. Hierbei müssen natürlich auch die Spielräume der einzelnen Akteure bekannt sein, um ein Arbeitsziel an der Schnittstelle erreichen zu können.

Die dargestellten Herausforderungen sind in dem Projekt auch als Chance zu sehen. Die damit verbundenen Aufgaben werden von einer Hürde zu einem Baustein. Das übergeordnete Projektziel, die beidseitige Durchlässigkeit zwischen Techniker Ausbildung und Studium, kann dadurch zu einem soliden Weg der Durchlässigkeit ausgebaut werden.

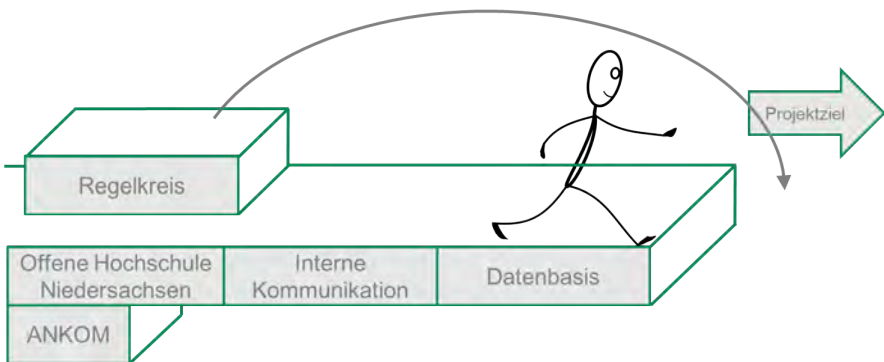


Abbildung 2: Besondere Herausforderungen des Projektes

## **Erste Erkenntnisse und Ergebnisse**

Neben der Technikakademie der Stadt Braunschweig konnte auch die Technikerschule Allgäu als Kooperationspartner gewonnen werden. Für die Absolventen dieser beiden Kooperationspartner gilt eine Verkürzung der Regelstudienzeit um zwei Semester.

Bei den Probanden haben sich größere Defizite im Bereich der Mathematik herausgestellt, denen durch Tutorien im Rahmen des Projektes begegnet wird. Auch dabei geht es nicht nur um die fachlichen Inhalte, die vermittelt werden müssen, sondern auch darum wie man sich solche Inhalte selbstständig aneignet.

Der individuelle Lernstand der Probanden kann durch die pauschale Anrechnung, wie oben erläutert, nicht abgebildet werden. Im Projekt erfolgt die Analyse durch regelmäßige Treffen und Fragebögen. Mögliche Gegenmaßnahmen bei Schwierigkeiten der Probanden stellen Tutorien, Einzelgespräche und bessere Integration in eine Lerngruppe dar. Dabei hat sich herausgestellt, dass eine Betreuung der Probanden in der Studieneingangsphase essentiell ist um Probleme zu erkennen und einem vorzeitigen Studienabbruch entgegen zu wirken. Viele der Probanden müssen, ebenso wie die regulären Studenten, das eigenständige und eigenverantwortliche studieren erst lernen. Dabei scheint die Frustrationstoleranz der Probanden geringer zu sein, da diese nicht mehr am Anfang ihres unabhängigen Lebens stehen und zum Teil Verantwortung in Form von Familie oder aus beruflichen Gründen haben.

## **Zusammenfassung**

Für das Projekt ist eine enge Zusammenarbeit innerhalb der Hochschule sowie mit den Probanden unerlässlich. Die pauschale Anrechnung der beruflich erworbenen Kompetenzen gibt den Studienanfängern, die ihren Techniker bei einem der Kooperationspartner gemacht haben eine Planungssicherheit, was ihr Studium angeht. Trotz der Verkürzung des Studiums ist dieses jedoch nicht leichter als das reguläre Studium und erfordert viel Selbstdisziplin.

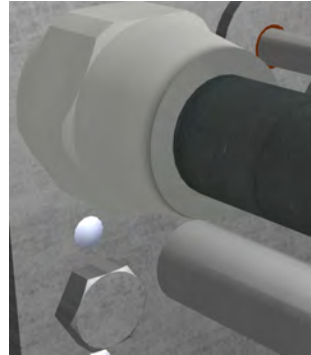
## **Literatur**

- /1/ <http://www.wettbewerb-offene-hochschulen-bmbf.de/>
- /2/ <http://ankom.his.de/>
- /3/ <http://www.offene-hochschule-niedersachsen.de/>
- /4/ <http://www.t2b.tu-clausthal.de>

## Erweiterung der Virtual und Augmented Reality Ausstattung

Langenbach, J.

*Das Institut für Maschinenwesen (IMW) setzt die Erweiterung der Virtual und Augmented Reality Umgebung weiter fort. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit (IMAB) erfolgt die Erweiterung der Umgebung mit Virtual und Augmented Reality Brillen sowie die damit einhergehende Lizenzanpassung. Mobile Geräte wie Smartphones und Tablets können damit ebenfalls als Ausgabe- und Steuerungsgeräte integriert werden*



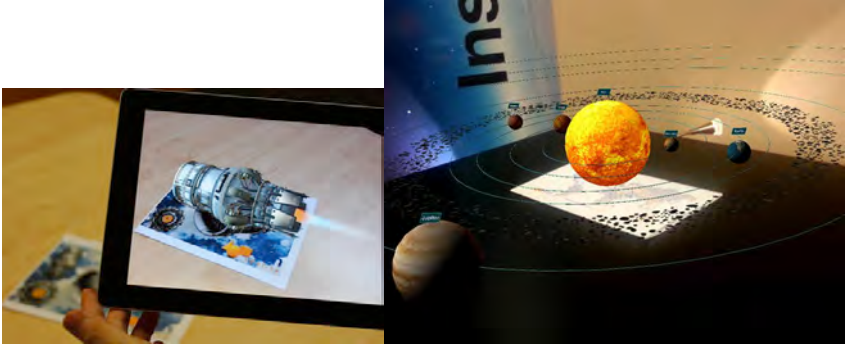
*The virtual and augmented reality environment is enlarged again. In cooperation with the Institute of Plant Engineering and Fatigue Analysis (IMAB) the institute of Mechanical Engineering (IMW) buys new software licenses to allow the usage of mobile devices like smartphones and tablets. Also new head mounted displays like virtual and augmented reality are going to be tested.*

In Zusammenarbeit mit dem IMAB entwickelt das IMW die Virtual Reality Hardware- und Softwareausstattung der TU Clausthal weiter. Hierzu wird die Lizenz der vorhandenen Software erweitert, so dass auch Augmented Reality Szenen erstellt werden können. Als Wiedergabegeräte dienen Mobilgeräte wie Smartphones und Tablets, aber auch entsprechende Head Mounted Devices wie Augmented bzw. Virtual Reality Brillen. Ziel der Zusammenarbeit ist zum einen die eingesetzten Ressourcen besser zu nutzen und gleichzeitig die Anwendung der Virtual und Augmented Reality innerhalb der Universität zu stärken.



Abbildung 1: Microsoft HoloLens und Oculus Rift von Oculus VR

Das Institut für Maschinenwesen setzt damit den Ausbau der Anwendungs-kompetenz im Umfeld von Virtual und Augmented Reality konsequent fort. Im letzten Jahr konnte bereits die Microsoft Kinect für die Gestensteuerung von VR Szenen in das Gesamtsystem integriert werden.



*Abbildung 2: Beispielanwendungen von Augmented Reality Szenen auf mobilen Geräten des Softwareherstellers EON Reality*

## Zusammenspiel von Theorie und Praxis

Konetzky, R. (Sennheiser electronic GmbH & Co. KG)

*Wie löse ich ein altbekanntes Problem mit Hilfe neuer Sichtweisen? Hierbei half uns der Konstruktionswettbewerb des Institutes für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal. Mit den gewonnenen Ergebnissen verbessern wir einen Prozessschritt in unserer Fertigung.*



*How do you solve an old problem with new perspectives? The design competition by the Institute of Mechanical Engineering (IMW) TU Clausthal helped us with its knowledge. With the results we change an automatic process which is used a lot of years.*

### Vorgehensweise

Wer kennt das nicht, man hat ein Problem mit einem Produkt oder Fertigungsschritt und je länger man sich mit dem Problem beschäftigt, umso mehr bekommt man den sogenannten „Tunnelblick“. Die Lösung will sich einem nicht erschließen. Vor diesem Punkt standen wir bei Fa. Sennheiser auch. Seit Jahren schrauben wir automatisch einen Einsprachekorb auf einen Mikrofongriff. Hierbei treten Fehler auf, die wir mit dem derzeitigen Maschinenkonzept nicht abstellen können bzw. nur mit manueller Nacharbeit.

In diesem Zuge half uns ein wenig das Glück. Wir wurden vom IMW angesprochen, ob wir nicht eine Aufgabe im Rahmen des Konstruktionswettbewerbes für sie hätten. Hierbei lösen Studenten eine Aufgabenstellung durch analytische Methoden, die sie parallel erlernen. Zu diesen Methoden gehören z.B. Erstellung einer Anforderungsliste, einer Funktionsstruktur oder einer Funktionsanalyse. Des Weiteren wurden Techniken wie Brainstorming, Mindmap oder der Morphologische Kasten angewandt. Insgesamt hatten wir 23 Gruppen à 4 Personen die sich mit dem Problem des Aufschaubens befasst haben. Einerseits konnten die Studenten ihr theoretisches Wissen an einem realen Beispiel anwenden und wir bekamen neue Ideen wie wir unser Problem lösen können.

Für uns war es das erste Mal, dass wir an so einer Veranstaltung teilgenommen haben. Unsere Intention für diesen Schritt lag in der Neutralität der Studenten hinsichtlich der Aufgabenstellung. Sie konnten komplett frei von Vorkenntnissen am derzeitigen Prozess an die Aufgabe gehen. Wir überließen es den Studenten

ob sie sich den Fertigungsprozess anschauen oder das Produkt verändern um die Aufgabenstellung zu lösen.

Da wir einige Anforderungen an den Fertigungsprozess hatten, waren wir doch überrascht, wie viele verschiedene Lösungen am Ende herausgekommen sind. Während der Betreuungsphase am Institut wurden wir teilweise mit Fragen konfrontiert, die wir uns selber nicht mehr gestellt haben. Die analytische Vorgehensweise, die die Studenten angewandt haben, um zu ihren Lösungen und Entscheidungen zu kommen, war sehr beeindruckend. Des Weiteren haben einige Gruppen ihre Lösungen in einem Versuch nachgestellt und die Machbarkeit nachgewiesen. Andere haben ganze 3D Modelle im CAD erstellt und simuliert. Mit Hilfe der neuen Lösungen werden wir unsere Automation umbauen und dadurch die Fehlerquellen abstellen.

Zum Abschluss des Wettbewerbes haben alle Gruppen ihre verschiedenen Lösungen präsentiert. Die ersten 3 Plätze wurden von uns prämiert, obwohl wir sagen müssen dass alle Gruppen super Arbeit geleistet haben. Man hat gesehen wie engagiert und motiviert die Studenten zu Werke gegangen sind.



Abbildung 1: *Siegerteam des Konstruktionswettbewerbs mit Industrievertretern (von links: Arne Goltermann, Hendrik Behme, Thomas Meyer, Jan Gottschalk, Robert Konetzky, Leonard Hansen, Dr. Axel Schmidt)*

## Zusammenfassung

Wenn man neue Ideen oder Denkanstöße haben möchte, dann empfiehlt es sich so eine Veranstaltung mitzumachen, bzw. sich an Institute oder Forschungseinrichtungen zu wenden. Für beide Seiten ist diese Zusammenarbeit von Vorteil. Die Studenten können ihr theoretisches Wissen praktisch anwenden und die Unternehmen bekommen neue Ideen und Lösungen.

## Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik erstmals in Clausthal

# KT2015

13. Gemeinsames Kolloquium  
Konstruktionstechnik  
8. und 9. Oktober in Clausthal

Ernst, C.; Langenbach, J.

*Am 8. und 9. Oktober fand in das 13. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik" in Clausthal statt. Damit beteiligte sich das IMW nicht mehr nur als Vortragender, sondern erstmals auch als Ausrichter an der Veranstaltung.*



*At the beginning of october the "13. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik" was held at the IMW at the first time. This year the IMW was not only a participant, but also a part of the organisation team as well.*

Wie muss eine Seiltrommel für innovative Faserseile konstruiert sein, wie ist der Fahrzeuginnenraum der Zukunft geformt und wie lassen sich Stahlkonstruktionen mittels magnetischer Sensoren verbessern? Diese und weitere Fragen sind auf dem „13. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik“ behandelt worden, das am 8. und 9. Oktober im IMW stattgefunden hat.



Abbildung 1: Teilnehmer des 13. Gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik 2015



Das Kolloquium war 2003 unter Beteiligung der drei Universitäten in Dresden, Magdeburg und Rostock ins Leben gerufen worden, um sich angesichts wachsender Herausforderungen bei Industrie- und Forschungsprojekten besser zu vernetzen. Inzwischen bringen sich auch die RWTH Aachen, die Universität Bayreuth und die TU Clausthal in die Veranstaltung mit ein. Erstmals fand die Tagung in diesem Jahr mit rund 50 Teilnehmenden im IMW statt. In seiner Begrüßung lobte Professor Karl-Heinrich Grote aus Magdeburg „die freundliche Seminaratmosphäre, die es vortragenden Doktorandinnen und Doktoranden erleichtert, ihre Forschungsarbeiten zu präsentieren“. Seitens der TU Clausthal hieß Professor Norbert Müller die Gäste willkommen. Neben den Hochschulwissenschaftlern aus verschiedensten Ingenieurgebieten, denen das Kolloquium ein kreatives Forum des Austauschs bot, waren Vertreter aus der Wirtschaft (Daimler, Volkswagen) und von außeruniversitären Forschungs-einrichtungen (Fraunhofer) dabei. Insgesamt umfasste die zweitägige Konferenz 32 Fachvorträge zu den Themen Qualitätssicherung, Produktentwicklung, Konstruktion und Berechnung. Zusammengestellt sind alle Beiträge in einem Tagungsband. Vom IMW gehörten Martin Schulze, M. Sc. zu den Referenten.



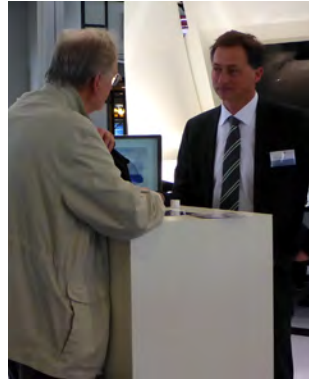
*Abbildung 2: Martin Schulze vom IMW während seines Vortrages zum Thema „Auswirkungen von Faserseilen auf die Bewicklung der Seiltrommel“*

Zum Rahmenprogramm zählten der Besuch des Oberharzer Bergwerksmuseum sowie eine Abendveranstaltung im Glück-Auf-Saal. „Die Organisation ist gut gelaufen, das Feedback der Teilnehmer war positiv“, zog Professor Müller eine zufriedene Bilanz. Im kommenden Jahr wird das Kolloquium fortgesetzt, die Ausrichtung wird dann der Lehrstuhl Konstruktionstechnik der Universität Rostock übernehmen.

## Das IMW repräsentiert die TU auf Messen und Ausstellungen

Ernst, C.; Heß, M.; Langenbach, J.

*Das IMW präsentierte aktuelle Forschungsprojekte auf zwei Messen. Vielfältige Kontakte entstanden während der Hannover Messe und bei der Veranstaltung „Open Inspiration“ der Firma Schaeffler.*



*The IMW presented current research projects on two industrial fairs this year. During the Hannover Messe and on Schaeffler's exhibition "Open Inspiration" multiple contacts were made.*

### Hannover Messe

Die „Hannover Messe Industrie“ ist eine der weltweit bedeutenden Leistungsschauen für Trends und Entwicklungen in der Industrie. Gemäß dem diesjährigen After Show Report /1/ kamen im April 2015 mehr als 220000 Fachbesucher nach Hannover, davon über 70000 aus dem Ausland, um sich die Präsentationen und Produkte von über 6500 Ausstellern aus 70 Nationen anzusehen.

Die Technische Universität Clausthal als innovative Forschungseinrichtung und potentieller Entwicklungspartner für die Industrie ist auf dieser Messe traditionell als Aussteller vertreten. In diesem Jahr wurden unter anderem zwei Projekte aus dem Institut für Maschinenwesen auf dem niedersächsischen Gemeinschaftstand vorgestellt.

Speziell an Entwickler für Software im Maschinen- und Anlagenbau richtet sich eine unter der Bezeichnung „TestIng“ entwickelte Innovation aus Clausthal. Bisher ist es schwierig, numerische Modelle parallel zum weiteren Entwicklungsprozess zu testen. Deshalb wurde am IMW eine Softwareumgebung konzipiert, die das automatische Testen und Auswerten erleichtert. Erkannte Fehler fließen in die Optimierung des Modells ein, ohne dass eine von Grund auf neue Berechnung stattfinden muss. Der neuartige Ansatz nennt sich „Systematisches Testen numerischer Berechnungswerkzeuge“, die Entwicklungszeiten im Maschinen- und Anlagenbau können damit verkürzt werden.

Eine Effizienzsteigerung schrägverzählter Getriebestufen ermöglicht ein Lagerungsaufbau nach dem „Blue Bearing Concept“. Verzahnungsaxialkräfte werden mittels eines Druckkammlagers entstehungsnah kompensiert, weshalb

die verbleibenden Radiallasten mittels reibungsärmeren Wälzlagerbauarten in das Gehäuse übertragen werden können.



Abbildung 1: Der Auftritt des IMW auf dem Gemeinschaftsstand des Landes Niedersachsen während der Hannover Messe Industrie 2015

### „Open Inspiration 2015“

Auch auf der Innovationsmesse „Open Inspiration 2015“, zu der die Firma Schaeffler im November etwa 1000 Fachbesucher ins fränkische Herzogenaurach einlud, konnte das IMW das „Blue Bearing Concept“ einem interessierten Publikum vorstellen. Ein lauffähiges Getriebe mit „gläsernen Lagersitzen“ gestattet als besonderes Exponat außergewöhnliche Einblicke in dieses andersartige Lagerungskonzept.

Auftritte und Präsentationen bei Ausstellungen dienen nicht nur dem Transfer aktueller Ergebnisse und Erkenntnisse in die Öffentlichkeit, der enge Austausch zwischen Forschern und Anwendern liefert immer auch wertvolle Anregungen und Impulse aus der Praxis für weitere anwendungsnahe Entwicklungen.

### Literatur

- /1/ Deutsche Messe AG: AFTER SHOW REPORT 2015: Zahlen & Fakten der HANNOVER MESSE. <http://www.hannovermesse.de/de/news/after-show-report/infografik/> (Abruf: 09.11.2015)





## 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- und Mehrkörpersimulation
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung
- Maschinenakustik und Schwingungsdiagnostik
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Rechnereinsatz im Maschinenbau
- Technische Normung
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling

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 sechs Verspannprüfständen bis 1 MW, fünf Torsions-Schwingprüfständen bis 500 kNm, zwei kombinierten Umlaufbiege- und Torsionsprüfständen, zwei statischen Torsionsprüfständen bis 200 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, eine hochdynamische Belastungseinheit für stirnseitige Verschraubungen und ein statischer Prüfstand zur Ermittlung der Drehfedersteifigkeit zur Verfügung. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät, sowie ein separates mobiles Prüfgerät für Seilquerelastizitätsmessungen und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Für die experimentelle Beanspruchungs-

ermittlung werden Systeme von HBM, Peekel 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, Abweiseradwindsichter) und ein Prüfstand zur mechanischen Zerkleinerung 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 eingesetzt.

Die technische Ausstattung des Labors für Maschinenakustik und Schwingungen ermöglicht Messungen an kombiniert belasteten Bauteilen. Mittels elektrodynamischer Schwingerreger können Bauteile neben ihrer stat./dyn. Betriebslast gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 5 kHz unterworfen werden. Eingesetzt werden solche Belastungseinrichtungen in unseren beiden Lagerprüfständen die für Lebensdaueruntersuchungen an Lagern und zur Untersuchung des Geräuschübertragungsverhaltens von Wälz- und Gleitlagern genutzt werden. Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Messequipment auf dem neuesten Stand der Technik ausgestattet:

- Signalanalysatoren (OROS und IMC) mit bis zu 32 Kanälen mit einer Bandbreite von bis zu 102 kHz pro Kanal zur Echtzeitverarbeitung, die auch mobil eingesetzt werden können.
- 3 Modalshaker (1 kN, 200 N, 10 N)
- Rotations-Laservibrometer
- Feinwuchtgerät mit Analysefunktionen
- Intensitätsmesssonde
- Freifeld-Messmikrofone
- Ein großes Sortiment an Schwingungsaufnehmern
- Vibrant Me'Scope Modalanalyse Software
- CAE Intensity Inspector zur Schallquellenortung
- MATLAB als Software für Sonderfunktionen

Darüber hinaus verfügt das IMW über einen schallarmen Messraum. Zur maschinenakustischen Beurteilung von Maschinenstrukturen stehen alle gängigen Analyseverfahren 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
- Maschinendiagnose

zur Verfügung. Darüber hinaus können Schwingungsuntersuchungen unterschiedlichster Art mittels Auswertung im Programmiersystem MATLAB durchgeführt werden.

Das fertigungstechnische Labor besteht aus vier Fräsmaschinen, vier Drehmaschinen, einer Senkerodiermaschine (CHARMILLES ROBOFORM 505) mit 3D-Bahnsteuerung, und einer ZEISS Koordinatenmessmaschine mit NC-Rundtisch. Als CAD/CAM-System wird CATIA V5 und Creo Parametric 2 (früher: Pro/Engineer Wildfire mit Pro/Manufacturing) eingesetzt. Als PDM/PLM-System ist TeamCenter von Siemens im Einsatz.

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 mit bis zu jeweils 128 GB Hauptspeicher und 8 Kernen 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 sowie SIMPACK für die Mehrkörpersimulation.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette. Hierzu gehören im Einzelnen eine Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 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, einen Stereolithographie Drucker, einen optischen 3D-Scanner, 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 besonders 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 und eine Powerwall in unserem Seminarraum. 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 (z.B. Prüfstände und Mühlen)
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen
- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien
- Konstruktion und Herstellung von metallischen Formen, Funktionsteilen und Prototypen durch direktes Lasersintern (Rapid Tooling)
- Spritzgießen kleinerer Kunststoffteile (PE, PP) in geringen Stückzahlen mit Hilfe einer Spritzgusspistole

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

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D)
- 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, Untersuchung und Gutachten zur Konstruktion lärmarmen Maschinen
- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen
- Beratung und Hilfestellung bei der Beantragung und Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten

## **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
- 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

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

### ***Konstruktionssystematik und Rechnereinsatz im Maschinenbau***

Die Entwicklung von Konstruktionsinformationssystemen zur Unterstützung des Produktentwicklers unter Einbeziehung aller Produktlebensphasen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte.

Weitere Themenschwerpunkte sind:

- Normungs- und Standardisierungsprozessen in der Produktentwicklung
- Einführung von Normungsinformationstechniken
- Unterstützung von Online-Normung
- Verbesserung von Benutzerschnittstellen zur Mensch-Maschine Interaktion

## **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**

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet Rapid Prototyping / Rapid Tooling umfassen die gesamte Rapid Tooling Verfahrenskette.

Hierzu zählt im Einzelnen:

- die Rapid Tooling gerechte CAD-Konstruktion
- die Datenaufbereitung für den Sinterprozess
- der Rapid Tooling Bauprozess einschließlich der Untersuchung von neuen Sinterparametern und Sinterwerkstoffen
- die Nachbearbeitung bzw. das Finishen der Sinterbauteile durch Beschichten und Infiltrieren

Weiterhin werden die Anwendungsgebiete der Rapid Tooling Technologie betrachtet wie z. B. die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen und das Sintern von Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss oder Faserverbundkonstruktionen sowie das Generieren von Funktions- und Einsatzteilen mittels neu entwickelter Sinterwerkstoffe und Sinterstrategien.

## Veröffentlichungen des Institutes seit dem 01.01.2007

### 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.; Heß, M.; Schäfer, G.: Druckkamm Lagerungen – 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

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

## **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 Profilverbindungen (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 innenhochdruckgefügtter 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.: Druckkammmlagerungen 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

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 "Kranne – Nachhaltigkeit in Entwicklung und Betrieb" (2013) S. 223-234, ISBN: 3-89194-205-2

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.; 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

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

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

## 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

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

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

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 Profilwellen (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

## Veröffentlichungen 2011

Ruther, C. A.; Timm, U.; Ewald, H.; Mittelmeier, W.; Bader, R.; Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Kluess, D.: Current possibilities for detection of loosening of total hip replacements and how intelligent implants could improve diagnostic accuracy; Recent Advances in Arthroplasty (2011), ISBN: 978-953-307-990-5

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Nagler, N.; Meier, L.: Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke - Maschinentechnische Aspekte (2011); S. 278 – 334; ISBN: 978-3-942216-54-8

Lohrengel, A.; Thoden, D.; Schmelter, R.: Hören, was das Lager sagt - Praktische Lagerdiagnose in der Maschinenakustik-Ausbildung. Fortschritte der Akustik: DAGA 2011, 37. Jahrestagung für Akustik, 21.-24. März 2011 in Düsseldorf, ISBN: 978-3-939296-02-7

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wesling, V.; Echtermeyer, P.: Konstruktionssystematik zur Entwicklung hochfester, lokal angepasster Strukturen mit Hilfe des Finite Elemente Design; 8. Industriekolloquium Sonderforschungsbereich 675 „Erzeugung hochfester metallischer Strukturen und Verbindungen durch gezieltes Einstellen lokaler Eigenschaften“ (2011) S. 45–53, ISBN: 3-92360-24-2

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Safe use of hoisting drums wound with multiple layers of wire, hybrid, fibre and/or large diameter ropes; Safe use of ropes; Proceedings of the OIPEEC Conference 2011, Dr. I.M.L. Ridge, Oxfordshire, UK, ISBN: 978-0-9552500-3-3

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Sicherer Einsatz von Seiltrommeln bei mehrlagiger Bewicklung mit Kunststoffseilen und/oder großer Nenndurchmesser; Technical Report Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der TU Clausthal; Dezember 2011, ISSN 1869-8018

Lohrengel, A.; Thoden, D.; Schäfer, G.: Untersuchungen zum Anfahrverhalten von Druckkämmen; In: Gleit- und Wälzlagerungen : Gestaltung, Berechnung, Einsatz mit Fachausstellung ; Schweinfurt, 24. und 25. Mai 2011. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011 (VDI-Berichte, 2147). - ISBN 978-3-18-092147-1, S. 419-422

## Veröffentlichungen 2010

Amorim, F.L.; Müller, N.; Bassani, I.; Schäfer, G.; Siemann, E.; Czelusniak, T.; Noronha, M.A.; Higa, C.F.; Bönisch, K.; Belmonte, G.R.: Some results on the performance of EDM electrodes produced by SLS technique; 6<sup>th</sup> Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2010), 15th-26th November 2010, Cardiff

Müller, N.; Bessling, S.; Bormann, E.: Normungsinformationstechnologien für KMU und Handwerk; DIN-Mitteilungen + Elektronorm, Ausgabe 06-2010, S. 20-25, Beuth Verlag Berlin 2010, ISSN 0722-2912

Müller, N.: Zugang mit neuen Medien zur Normungsarbeit; tech transfer, Hannover Messe Industrie, Vortrag 20.04.2010, Hannover 2010

Schäfer, G.: Berechnungsrichtlinie für Zahnwellenverbindungen; Tagungsband, FVA-Informationstagung, Würzburg 23./24. November 2010, [www.fva-net.de](http://www.fva-net.de)

Rolshofen, W.; Schäfer, G.: Measurement of torque in underground loaders, as a basis for optimization; Advanced Mining Solutions 03/2010, advanced-mining, Aachen, S. 93 – 97, [http://www.advanced-mining.com/images/upload/ams\\_201003\\_en.pdf](http://www.advanced-mining.com/images/upload/ams_201003_en.pdf)

Daryusi, A.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Schlecht, B.: Ermüdungsfestigkeit von Zahnwellenverbindungen mit freiem und gebundenem Auslauf; 4. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2010, VDI-Berichte 2114, S. 361-366, ISBN 978-3-18-092114-3

Schäfer, G.: Neuerungen in der Berechnung von Passverzahnungen; 4. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2010, VDI-Berichte 2114, S. 197-210, ISBN 978-3-18-092114-3

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Shen, L. J.: Optimization design of shaft-hub connection in ball type plunging constant velocity joints; 4. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2010, VDI-Berichte 2114, S. 355-360, ISBN 978-3-18-092114-3

Hilgermann, J. L.; Lohrengel, A.: Gestaltung und Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen mit dominierendem Kraftschluss unter statischer und dynamischer Betriebslast. In: Welle-Nabe-Verbindungen : Gestaltung - Fertigung - Anwendungen mit Fachausstellung ; 4. VDI-Fachtagung Nürtingen bei Stuttgart, 27. und 28. Oktober 2010. Düsseldorf : VDI-Verl., 2010 (VDI-Berichte, 2114). - ISBN 9783180921143, S. 51-62

Lohrengel, A. ; Thoden, D. ; Dietz, P.: Über die Beanspruchung von dünnwandigen Pressverbänden unter exzentrischer Axialkraft. In: Welle-Nabe-Verbindungen : Gestaltung - Fertigung - Anwendungen mit Fachausstellung ; 4. VDI-Fachtagung Nürtingen bei Stuttgart, 27. und 28. Oktober 2010. Düsseldorf : VDI-Verl., 2010 (VDI-Berichte, 2114). - ISBN 9783180921143, S. 81-92

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Nagler, N.: Maschinenbauliche Fragestellungen, Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2009, Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke; Förderkennzahl des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 0325074, <http://idserver.fiz-karlsruhe.de/ih3000/ptj2010/>

Arslan, G.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Minimierte Zahnfußbiegespannungen an Zahnstangen durch optimierte Zahnfußausrundung mit Isight; Deutsche SIMULIA-Konferenz 2010, 20. und 21. September 2010, Heidelberg

Lohrengel, A.; Bessling, S.; Stahr, K.; Wesling, V.; Echtermeyer, P.: Systematic Design Approach to the Development of High-Strength, Locally Adapted Structures with the Aid of the Finite Element Design (FED) Method; Creation of High-Strength Structures and Joints; Advanced Materials Research, Volume 137, Page 413-450, Trans Tech Publications Inc., Stafa-Zurich, (2010), ISBN: 978-0-87849-234-3

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Thoden, D.: Acoustic Measurement to Proof High-Strength Structures and Joints; Creation of High-Strength Structures and Joints; Advanced Materials Research, Volume 137, Page 451-456, Trans Tech Publications Inc., Stafa-Zurich, (2010), ISBN: 978-0-87849-234-3

Kruk, R; Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Hermerath, P.; Esderts A.; Wilmes, C.; Neubert, V.: Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Brüdenventilatoren. Studie von konstruktiven Optimierungsmöglichkeiten der in Industrie eingesetzten Ventilatoren. 6. VDI – Fachtagung Ventilatoren Entwicklung – Planung – Betrieb, VDI – Berichte, Braunschweig, 16. und 17. November 2010, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2010,

Kruk, R; Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Schmelter, R.; Thoden, D.: Körperschallübertragung von Gleitlagern – Eine Messstrategie für Ermittlung von

frequenzabhängiger Parameter der Gleitlagern. VDI – Fachtagung mit Fachausstellung Maschinenakustik 2010, Wettbewerbsvorteil durch geräuscharme Produkte, VDI – Berichte 2118, Leonberg bei Stuttgart, 26. und 27. Oktober 2010, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2010, ISBN 978-3-18-092118-1, S. 15-21

Kruk, R.; Thoden, D.; Lohrengel, A.; Dietz, P.; Schäfer, G.: Körperschallübertragung von Wälz- und Gleitlagern. Fortschritte der Akustik: DAGA 2010, 36. Jahrestagung für Akustik, 15.-18. März 2010 in Berlin, ISBN 978-3-9808659-8-2, S. 529-530

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Nagler, N.: Maschinenbauliche Fragestellungen. Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2009, Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke; Förderkennzahl des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 0325074, <http://idserver.fiz-karlsruhe.de/ih3000/ptj2010/>

Schmelter, R.; Lohrengel, A.; Thoden, D.: Maschinenakustik mal praktisch. Fortschritte der Akustik: DAGA 2010, 36. Jahrestagung für Akustik, 15.-18. März 2010 in Berlin, ISBN 978-3-9808659-8-2, S. 451-452

Thoden, D.; Lohrengel, A.; Hilgeramann J.,L.; G. Kruk, R.; Leng, M.; Nsenga, E.,B.: Ansatz zur akustischen Lokalisierung von eingelegten Verstärkungsblechen in Sandwichstrukturen. Fortschritte der Akustik: DAGA 2010, 36. Jahrestagung für Akustik, 15.-18. März 2010 in Berlin, ISBN 978-3-9808659-8-2, S. 451-452

Rolshofen, W.; Schäfer, G.: Drehmomentmessung an Fahrladern als Basis für Optimierungen, Fördertechnik im Bergbau, Kolloquium 27./28. Januar 2010, Clausthal Zellerfeld, ISBN 978-3-86948-057-2

## Veröffentlichungen 2009

Dietz, P.; Lohrengel, A.; Wächter, M.: Leistungssteigerung von Zahnwellenverbindungen durch Neugestaltung des Zahnprofils; Konstruktion, Januar/Februar 1/2-2009, ISSN 0720-5953

Dietz, P.; Lohrengel, A.; Schwarzer, T.; Wächter, M.: Problems related to the design of multi layer drums for synthetic and hybrid ropes; OIPEEC Conference / 3rd International Ropedays; Stuttgart März 2009

Lohrengel, A.; Bessling, S.; Stahr, K.; Wesling, V.; Echtermeyer, P.: Konstruktionssystematik zur Entwicklung hochfester, lokal angepasster Strukturen mit Hilfe des Finite Elemente Design (FED); 7. Industriekolloquium „Potenziale metallischer Werkstoffe lokal nutzen“ (2009) S. 195 –202, ISBN: 3-92360-24-2

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Lau, P.: Gelenkwellenforschung; Ingenieurspiegel, 3/2009, ISSN 1868-5919, S. 56-57

Müller, N.; Bessling, S.; Bormann, E.: Einbindung von kleinen und mittleren Unternehmen in Normungsprozesse; DIN-Mitteilungen + Elektronorm, Ausgabe 04-2009, S. 15-20, Beuth Verlag Berlin 2009, ISSN 0722-2912

Müller, N. (Hrsg.): Normung und Hochschule; Tagungsband Nr. 1, 2009, Clausthal-Zellerfeld, ISSN 1868-730X

Hilgermann, J.L.; Lohrengel, A.: Innenhochdruckfügen - Eine Versuchsparameter Auswahl; Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess (SIMPEP), 18.-19. Juni, Veitshöchheim

Müller, N.; Bessling, S.; Bormann, E.: Normung und Hochschule; DIN-Mitteilungen + Elektronorm, Ausgabe 07-2009, S. 125-126, Beuth Verlag Berlin 2009, ISSN 0722-2912

Rolshofen, W.: Application of acoustic holography for human-computer interaction; 16th International Congress on Sound and Vibration, 5th–9th July 2009, Kraków, Poland

Kruk, R.; Dietz, P.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Thoden, D.: Novel test bed for vibration transmission through rolling and slide bearings; 16th International Congress on Sound and Vibration, 5th–9th July 2009, Kraków, Poland

Lohrengel, A.; Bessling, S.; Stahr, K.; Wesling, V.; Echtermeyer, P.: Finite Element Design (FED) - a new approach for material and manufacturing based design rules; 5th Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2009), 6th-17th July 2009, Cardiff, GB

Dietz, P.; Hilgermann, J.L.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Internal high pressure assembled press fit shaft-hub connections; 5th Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2009), 6th-17th July 2009, Cardiff, GB

Mänz, T.; Lohrengel, A., Schäfer, G.: Optimization of a production machine with the help of numerical simulation tools. 2nd International Researchers Symposium on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2009), July 2009, Ischia

Nagler, N.; Lohrengel, A., Schäfer, G.: Subsurface pumped storage plants – A new approach to store energy. 2nd International Researchers Symposium on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2009), July 2009, Ischia (Veröffentlichung vor. Anfang 2010)

Dietz, P.: 175 Jahre Drahtseil – Das mechanische System Seil-Seiltrommel, Papierflieger Verlag, 1. Auflage 2009, Clausthal-Zellerfeld, ISBN 978-3-86948-004-6

Dietz, P.; Lohrengel, A.; Schwarzer, T.; Wächter, M.: Synthetic and Hybrid Ropes on cranes; Sept. 2009, Crane Hot Line, cranehotline.com

Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Einflüsse der Seileigenschaften von Kunststoffen auf die Trommel; InnoZug 3. Fachkolloquium 23. September 2009, Chemnitz

Thoden, D.; Lohrengel, A.; Dietz, P.: Aktuelle Entwicklungen in der Druckkammauslegung; Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2009, 24. und 25. November 2009, Dresden

Daryusi, A.; Lau, P.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Schlecht, B.: Mehrfachkerbwirkung an Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 mit freier und gebundener Auslaufgeometrie; Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2009, 24. und 25. November 2009, Dresden

Hartlieb, B.; Kiehl, P.; Müller, N.: Normung und Standardisierung – Grundlagen, Beuth Verlag, 1. Auflage 2009, Berlin, ISBN 978-3-410-17113-3

### **Veröffentlichungen 2008**

Käferstein, B.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Einfluss der Fügestelle auf den Körperschall in Feinblechkonstruktionen; Tagung Fahrzeugunterboden; CTI Augsburg 23./24.01.2008

Müller, N.; Bormann, E.; Kramer, W.; Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards; DIN-Mitteilungen + Elektronorm, Ausgabe 03-2008, S. 15-22, Beuth Verlag Berlin 2008, ISSN 0722-2912

Sambale, B.; Schäfer, G.: Weiterentwicklung dualer Studienan-gebote im tertiären Bereich; Projektgruppe „Innovationen im Bildungswesen“ der Bund-Länder-Kommission; Arbeitsbericht März 2008

Käferstein, B.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Acoustic behaviour of joints in sheet metal; XV Acoustical and Biomedical Engineering Conference; 14.-18.04-2008 Zakopane; Polish Acoustical Society; [www.iab2008.agh.edu.pl](http://www.iab2008.agh.edu.pl)

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.; Kruk, R.: TAI-CHI: Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction; XV Acoustical and Biomedical Engineering Conference; 14.-18.04-2008 Zakopane; Polish Acoustical Society; [www.iab2008.agh.edu.pl](http://www.iab2008.agh.edu.pl)

Rolshofen, W.; Schäfer, G.: Offshore-Verbund-Kraftwerk; Ideen Park Stuttgart; 17.05.-25.05.2008 Stuttgart

Schäfer, G.: Mechanik, Schäden an Großmaschinen, Tagung „Schadensfalluntersuchung“, Haus der Technik, 28./29.05.2008, Essen

Schäfer, G.: Calculation of Splined Shafts; 11.-13.06.2008 Universiti Teknologi MARA, UITM Malaysia

Müller, N.; Verleihung der FTMV-Gütesiegel; Zukunft Ingenieurwissenschaften - Zukunft Deutschland; S.247-249, Springer-Verlag 2008 ISBN 978-3-540-89608-1

Korte, T.: Längsstiftverbindungen als Alternative zur Passfeder. Konferenzband zur 16. internationalen wissenschaftlich-technischen Konferenz TEMAG 2008 Lebensdauer von Konstruktionselementen und -baugruppen in Bergbaumaschinen. Bibliotheka TEMAG 2008, ISBN978-83-61442-04-2

Kruk, R., Kramarczuk, W., Wieczorek, A.: Zastosowanie metody sztywnych elementow skonczonych do wyznaczania obciazen dynamicznych przekladnie zebatej. Konferenzband zur 16. internationalen wissenschaftlich-technischen Konferenz TEMAG 2008 Lebensdauer von Konstruktionselementen und -baugruppen in Bergbaumaschinen. Bibliotheka TEMAG 2008, ISBN 978-83-61442-04-2

Kruk, R., Thoden, D., Backhaus, S.-G.: Neuartiger Prüfstand zur akustischen Untersuchung von Wälz- und Gleitlagern. Fortschritte der Akustik : DAGA 2008 ; 34. Jahrestagung für Akustik, 10. - 13. März 2008 in Dresden, ISBN: 978-3-9808659-4-4

Seitz, T.; Dietz, P.; Lohrengel, A.: Werkstoffauswahl für transportable Zerkleinerungseinrichtungen. ProcessNet Jahrestagung 2008, 09.10.2008, Karlsruhe. In: Chemie Ingenieur Technik 9/2008, S. 1436, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISSN 0009-286X.

## Veröffentlichungen 2007

Müller, N.; Bormann, E.; Kramer, W.; Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards; DIN-Mitteilungen + Elektronorm, Ausgabe 03-2007, S. 11-17, Beuth Verlag Berlin 2007, ISSN 0722-2912

Schäfer, G.: Using manufacturing influences to material properties within design, ICMA '07, Singapore, ISBN: 978-981-05-8089-6

Schwarzer, T.: Die Problematik der Auslegung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln bei der Bewicklung mit Kunststoff- oder Hybridseilen, 15. Internationale Kranfachtagung, Bochum Mai. 2007, ISBN 3-89194-179-X

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Beck, H.-P., et al.: Base Load Power from the North Sea. European Wind Energy Conference (EWEC 2007), Milan, Italy, 7-10 May 2007

Schäfer, G.: Netzintegration von Offshore Großwindanlagen, Vortrag, science.fest 2007, Mannheim

Kramer, W.; Müller, N.: Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards, Vortrag, VDI-VDE-DGQ Gemeinschaftskreis Qualitätsmanagement Hannover, 25.06.2007, Hannover

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Wesling, V.: Iterative loop to include material and manufacturing information in an early design stage, Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2007), The Internet, 2nd-13th July 2007, Whittles Publishing (Scotland) (2007). To be published end of 2007

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Wesling, V.: Design strategies for the development of high strength coupling elements from requirement optimized composite materials, Creation of High-Strength Structures and Joints by Setting up Local Material Properties, trans tech publications, Stafa-Zurich, 2007, ISBN: 978-0-87849-455-2

Lohrengel, A.; Ostertag, W.; Sprick, R.: An innovative device for the manufacture of disposable medical- and healthcare products. Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2007), The Internet, 2nd-13th July 2007, Whittles Publishing (Scotland) (2007). To be published end of 2007

Schäfer, G.: Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen. VDI-Berichte 2004, VDI Tagung Wiesloch Okt. 2007, ISBN 978-3-18-092004-7

Korte, Th.: Dimensionierung und Gestaltung von spielbehafteten Längsstiftverbindungen. VDI-Berichte 2004, VDI Tagung Wi-esloch Okt. 2007, ISBN 978-3-18-092004-7

Dietz, P.; Kruk, R.; Lohrengel, A.; Wieczorek, A.: Stanowisko do badan wlasnosci dynamicznych lozysk. XV Jubileuszowa Miedzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna TEMAG 2007, S. 25-29. Gliwice – Ustron Oktober 2007, ISBN 978-83-917265-6-3.

Dietz, P.; Kruk, R.; Lohrengel, A.; Wieczorek, A.: Wyniki obliczen parametrow dynamicznych lozysk tocznych. XV Jubileuszowa Miedzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna TEMAG 2007, S. 31-39. Gliwice – Ustron Oktober 2007, ISBN 978-83-917265-6-3.

Dietz, P.; Lohrengel, A.; Schwarzer, T.: Charakterystyka naprezen w linach hybrydowych wykonanych z tworzyw w trakcie wielo-warstwowego ich nawijania na beben. XV Jubileuszowa Miedzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna TEMAG 2007, S. 139-151. Gliwice – Ustron Oktober 2007, ISBN 978-83-917265-6-3.

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.: Application of Tangible Acoustic Interfaces in the Area of Production Control and Manufacturing. J. Jacko (Ed.): Human-Computer Interaction, Part II, HCII 2007, LNCS 4551, pp. 920–925, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN: 978-3-540-73106-1





## Erschienenene Institutsmittellungen seit 2007



TU Clausthal

Institutsmittellung 2007



TU Clausthal

Institutsmittellung 2008



TU Clausthal

Institutsmittellung 2009



TU Clausthal

Institutsmittellung 2010



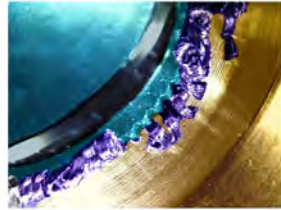
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2011



 TU Clausthal

Institutsmittellung 2012



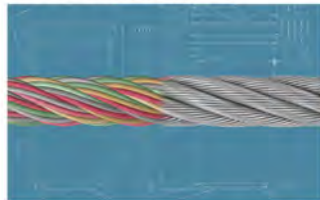
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2013



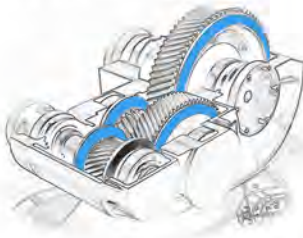
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2014





**Institutsmitteilung 2015**





## Autoren

**Heß, Marcel:** Jahrgang 1984, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 15.10.2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. hess@imw.tu-clausthal.de

**Hofmann, Sebastian:** Jahrgang 1988, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.06.2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. hofmann@imw.tu-clausthal.de

**Jakob, Marius:** Jahrgang 1989, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.12.2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. jakob@imw.tu-clausthal.de

**Kasüschke, Lucy:** Jahrgang 1989, studiert Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.10.2014 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. kasueschke@imw.tu-clausthal.de

**Langenbach, Joachim:** Jahrgang 1984; studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Dresden, seit 01.04.2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. langenbach@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

**Martinewski, Viktor:** Jahrgang 1989, studiert Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.04.2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. martinewski@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

**Müller, Norbert:** Jahrgang 1949, studierte allgemeinen Maschinenbau an der FH Frankfurt und TH Darmstadt, Leiter Zentralaufgaben Konstruktion der Pittler AG, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion 1990 über rechnergestützte Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen am Beispiel von Zentrifugentrommeln, Bereichsleiter Informationstechnik der Pittler GmbH, seit 01.11.1997 Professor für Rechnerintegrierte Produktentwicklung am IMW. mueller@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

**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

**Schmelter, Rico:** Jahrgang 1984, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Dresden, seit 15.01.2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. schmelter@imw.tu-clausthal.de

**Schulze, Martin:** Jahrgang 1984, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Clausthal, seit 09.09.2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. m.schulze@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

**Wild, Jochen:** Jahrgang 1981, studierte Maschinenbau an der DHBW Mannheim sowie an der TU Clausthal, seit 01.10.2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. wild@imw.tu-clausthal.de

## 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.

