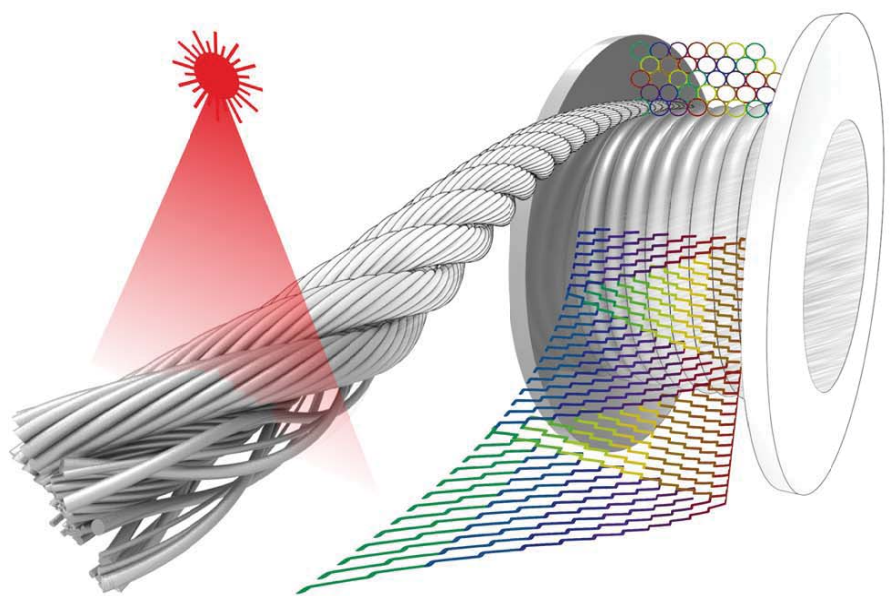




TU Clausthal

Institutsmitteilung 2018



Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 43
(Dezember 2018)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Redaktion und Layout:

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

Anschrift:

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

Tel: (0 53 23) 72-22 70

Fax: (0 53 23) 72-35 01

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

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

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Vermessung von Seil und Seiltrommelwicklung mit Laser-Profil-Scanner und Integration der Ergebnisse in die analytische Berechnung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln.

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

Inhaltsverzeichnis

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

Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

<i>Schulze, M.; Wächter, M.:</i> Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln	5
<i>Schäfer, G.; Korte, T.:</i> Längsstifte als kerbbare Welle-Nabe-Verbindung	23
<i>Jakob, M.; Merz, J.; Schäfer, G.; Scheffe, K.:</i> Höhere Drehmomente bei gleichem Wellendurchmesser – SMS GROUP entwickelt erfolgreich neue Welle-Nabe-Verbindung	35
<i>Mörz, F.:</i> Pressverbindungen mit gerändelter Welle – eine Zusammenfassung zum Stand der Technik	41
<i>Losch, M.:</i> Grundlagen der Rotordynamik.....	47

Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung

<i>Wallat, P.:</i> Konstruktionsunterstützung mit der Simulationssoftware ROCKY DEM für Partikelprozesse, Haufwerkentzerrung und Schüttgutprozesse.....	53
<i>Prumbohm, M.; Wallat, P.:</i> Engineering Design for a Circular Economy – Produktgestaltung für eine Kreislaufwirtschaft: ein internationaler Onlinekurs.....	59
<i>Wallat, P.:</i> Das „House of Quality“ zur Unterstützung im Konstruktionsprozess	69
<i>Scherf, S. C.:</i> Potential und Forschungsbedarf additiv gefertigter Druckgeräte.....	73
<i>Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.:</i> Computergestützte Verdichteroptimierung mit Hilfe von MATLAB – Entwicklung eines Expertentools.....	83

Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Martinewski, V.:</i> Freilauf-Prüfstandssteuerung mit einem Gantner Instruments Q.Gate- Controller (1).....	93
<i>Prumbohm, M.:</i> ZIM-Projekt AZEMA - Ergebnisse des Projektes zur Entwicklung einer An- lage zum Zerlegen von Elektrobauteilen mit metallischer Außenhülle...	99
<i>Rehmet, R.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.:</i> Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Wälz- und Gleitlagern bei stoßartiger Anregung	107

Hochschule und Kontakte

<i>Wächter, M.:</i> Inverted Classroom - Neue Lehrform für Technisches Zeichnen?	115
<i>Rehmet, R.; Wallat, P.:</i> Interdisziplinäres Projekt TUCreate – Süßes gegen Credit Points	121

Ausstattung etc.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwer- punkte des Institutes.....	125
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 01.01.2012	131
Erschienene Institutsmittteilungen seit 2007	141
Autoren	145
Anfahrt	147

Vorwort

Liebe Freunde des Instituts für Maschinenwesen,

normalerweise erinnert uns der erste Schnee zuverlässig an das nahende Weihnachtsfest und das Jahresende. In diesem Jahr hat der Clausthaler Winter jedoch offensichtlich einige Startschwierigkeiten. Die Institutsmitteilung ist trotzdem rechtzeitig fertig geworden und wir möchten uns mit diesem Überblick bei Ihnen herzlich für die Zusammenarbeit bedanken.

Im Rahmen des von der EU geförderten EIT „Raw Materials“ haben wir in diesem Jahr zusammen mit der TU Delft, der Uni Leiden und des schwedischen Forschungsinstituts Sverea einen Internetkurs (MOOC) zum Thema „Engineering Design for a Circular Economy“ erfolgreich durchgeführt. Die Ausarbeitung war arbeitsintensiv aber hat trotz der häufigen Reisen sehr viel Spaß gemacht und wir wurden mit über 1500 Teilnehmern aus allen Kontinenten dieser Erde belohnt. Der in dieser Ausgabe enthaltene Bericht gibt Ihnen einen guten Einblick in die Potentiale.

Gleich mehrere interessante neue Forschungsergebnisse haben wir im Bereich der Welle Nabe Verbindungen erarbeitet. Innovative Profilformen für dünnwandige Hohlwellen und leistungsfähigere Profilstellungen für die klassische Evolventenzahnform zeigen eindrucksvoll, dass die Messlatte immer noch ein Stückchen höher gelegt werden kann.

Auch den Bereich der Systementwicklung haben wir im vergangenen Jahr weiter ausgebaut. Nachdem ein neuer Shredder für Elektroschrott entwickelt wurde, kümmern wir uns aktuell darum, die entstehenden Wertstofffraktionen im weiteren Verlauf in geeigneter Weise zu separieren. Das ist sowohl aus konstruktionssystematischer als auch aus versuchstechnischer Sicht höchst interessant. Dabei gehört es zum guten Ton, neue konstruktive Ideen zunächst mit Hilfe von Simulationen auf Ihre Eignung zu prüfen, bevor wir das klassische Experiment „in Stahl und Eisen“ durchführen und auswerten. Ein Bericht zeigt die Potentiale der Simulation von Trennprozessen auf.

Die Methode der agilen Systementwicklung wird zurzeit in einem laufenden Projekt angewendet und erprobt. Es geht um die methodische Modellbildung des digitalen Zwillings eines neuartigen Verdichtertyps. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Vielzahl der Einflussparameter in diesem Grundlagenprojekt überhaupt abbilden und konstruktive Entscheidungen treffen zu können. Auch dazu finden Sie weitere Informationen im Inneren.

Nicht zuletzt ist unser diesjähriges Titelbild ein weiteres Beispiel für eine innovative Systementwicklung. Moderne Seiltriebe müssen zahlreiche Anforderungen gleichzeitig erfüllen. Die Stabilität des Wickelpakets und das Wickelverhalten sind

zwei davon und werden bei uns erstmals mit Hilfe eines selbst entwickelten optischen Verfahrens beurteilt. Dieses „Röntgengerät“ für den Seiltrieb ist robust einsetzbar, verschafft uns neue Einblicke und ermöglicht zielgerichtet Optimierungen.

Die Lehre im Bereich der Konstrukteursausbildung war und ist uns ein besonderes Anliegen, so auch in diesem Jahr. Im Schwäbischen sagt man: „Wer sälbr gohd, brauchd nedd zoga ond nedd gschoba wärda“. Auf Hochdeutsch heißt das: „Wer selbst geht, braucht nicht gezogen und nicht geschoben werden“. Wissenschaftlich interpretiert heißt das: „Inverted Classroom“. Wir haben’s ausprobiert und finden es gut. Ab sofort erlernen die Studierenden das Technische Zeichnen, indem sie den Weg „selbschd gehn“. Unsere Erfahrungen haben wir in einem Bericht zusammengefasst.

Gerade die ersten Semester sind für viele Studierende schwierig. In Clausthal helfen erfahrene Studenten, die sogenannten „Bärchenführer“, beim Bewältigen dieser vielen kleinen und großen Startschwierigkeiten. Weil das so gut funktioniert, haben wir die Betreuung auf weitere Semester ausgedehnt und man besichtigt nun gemeinsam Firmen, geht in die Kneipe, wandert und lernt natürlich auch zusammen. Wir hoffen, auch diese Maßnahme stärkt zukünftig den „Clausthaler Geist“ des Zusammenhalts und fördert damit auch den Studienerfolg.

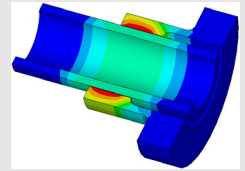
Ein weiteres Highlight ist die neue Studienrichtung „Biomechanik“ im Bachelorstudiengang Maschinenbau. Fächer wie „Anatomie und Physiologie“, „Bewegungswissenschaftliche Grundlagen“ und „Biomechanik“ stehen für Maschinenbauer auf dem Programm, um sich z. B. für Berufsfelder im Bereich Ergonomie, Rehabilitation und Sportgerätebau zu spezialisieren. Für uns ist es noch ungewohnt aber sehr bereichernd, wenn Dr. med. Peterson wöchentlich mit Skeletten, Muskelfaserproben und weiterem medizinischen Anschauungsmaterial am IMW zu seiner Vorlesung erscheint. Demnächst werden wir zusammen mit ihm das Praktikum „Biomechanik“ durchführen. Wir sind gespannt und freuen uns darauf.

Und dann sind da noch die zahlreichen Veranstaltungen, an denen wir teilnehmen oder die wir durchführen. Ein besonderes Ereignis ist das jährlich stattfindende IMW-Ehemaligentreffen des wissenschaftlichen Vereins, das in diesem Jahr vom Kollegen Prof. Garzke organisiert wurde, der uns in die schöne Stadt Jena eingeladen hatte. Wir bedanken uns für den herzlichen Empfang und die rundum gelungene Veranstaltung.

Wir, die Mitarbeiter des IMW, wünschen Ihnen ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes und erfolgreiches Jahr 2019.



Konstruktion und Berechnung von
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte



Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln

Schulze, M.; Wächter, M.

Der vorliegende Artikel stellt die experimentelle Analyse und einen Ansatz zur theoretischen Berechnung des Wickelpaketes von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln vor. Dabei wird auf Übereinstimmungen und Abweichungen zwischen Experiment und Theorie eingegangen und aufgezeigt wie die Ergebnisse praktische Anwendung finden können.



This article presents the experimental analysis and an approach for the theoretical calculation of the winding package of multilayer wound rope drums. It deals with similarities and deviations between experiment and theory and shows how the results can be applied in practice.

Einleitung

Moderne Hochleistungs-Faserseile werden aufgrund der Forderung nach großen Seillängen und Leichtbau verstärkt in der Mehrlagenwicklung eingesetzt. Dabei zeigen sich im Vergleich zu Drahtseilen häufig weniger geordnete Wickelbilder. Dies ist nicht gut für die Lebensdauer der Seile. Durch Wickelfehler wie z.B. Wickellücken kann es zum Einschneiden in untere Lagen kommen, die das Seil auf die Dauer schädigen. Im schlimmsten Fall kann dies auch zum Blockieren des Seils und zur Umkehr der Wickelrichtung mit katastrophalen Auswirkungen auf die Standsicherheit eines Krans führen. Zudem führt dies auch zu unklaren Belastungen der Seiltrommel. Die Berechnung der Seiltrommelbelastung beruht auf einem gleichmäßigen Wickeln der Umwicklungen nebeneinander in einer Lage und übereinander in den verschiedenen Lagen. Nur wenn die angenommenen Positionen durch die Umschlingungen auch tatsächlich eingenommen werden, stellt sich das berechnete Belastungsszenario ein.

Eine der Ursachen für das ungeordnete Wickeln ist die Deformation des Seilquerschnitts.

Beschreibung Seiltrommel – Faserseil

Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen der Mehrlagenwicklung, die relevanten Begriffe und das Zusammenspiel zwischen Trommel und Seil

dargestellt. Zur Motivation der Berechnung des Wickelpaketes wird der aktuelle Zustand des Wickelverhaltens gezeigt.

Grundlagen mehrlagige Seiltrommel und Seil

Zur Verdeutlichung der Situation der Umwicklung auf der Seiltrommel sind in Abbildung 1 die Richtungsangaben bezüglich der Trommel dargestellt.

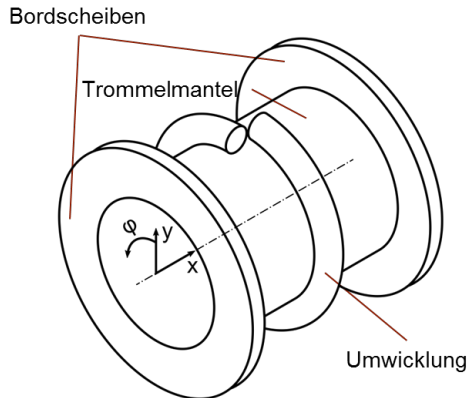


Abbildung 1: Seiltrommel mit Richtungsdefinitionen: x axiale Trommelrichtung, y radiale Trommelrichtung und φ tangentiale Trommelrichtung

Für die Seilführung ist eine Rille auf dem Trommelmantel vorgesehen. Diese führt das Seil in der ersten Lage und ermöglicht auch den folgenden Lagen eine sichere Führung durch die jeweils darunterliegende. Unterschiedliche Bereiche erstrecken sich dabei üblicherweise auf je einem halben Trommelumfang. In den Parallelbereichen wird das Seil parallel zu den Bordscheiben geführt. Durch eine Steigung um einen halben Rillenabstand gelangt das Seil in den Kreuzungsbereichen zum jeweils nächsten Parallelbereich. Die sichere Führung ab der zweiten Lage wird dadurch gegeben, dass sich ein pyramidenartiger Aufbau des Wickelpaketes in den Parallelbereichen ergibt. So liegt die Umwicklung einer höheren Lage immer genau zwischen zwei darunterliegenden (Abbildung 2).

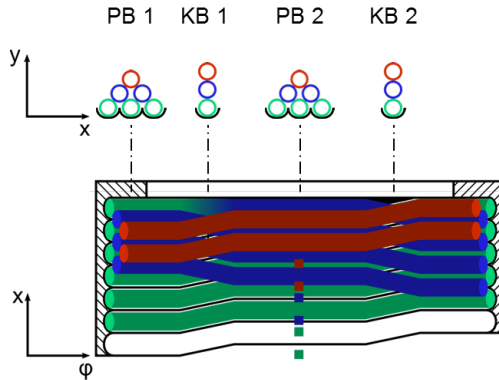


Abbildung 2: Systemrillung (Lebus-Rillung) mit Angabe des Aufbaus des Wickelpaketes in den Parallel- (PB 1 und PB 2) und Kreuzungsbereichen (KB 1 und KB 2)

Durch den beschriebenen definierten Aufbau lässt sich der Wickeldruck jeder Lage und somit auch der Druck auf den Trommelmantel berechnen. Da in der Mehrlagenwicklung auf bereits aufgewickelte Lagen weitere darüber kommen, ergibt sich ein Entlastungseffekt. Durch diesen wird die Seilkraft F_S in bereits auf der Trommel befindlichen Lagen k durch die folgenden reduziert. Insgesamt entsteht dadurch ein geringerer Gesamtdruck als die Summe der Einzeldrücke aller Lagen. Der Entlastungseffekt kann aber nach /1/, /2/ und /3/ wie folgt berechnet werden (Gleichung 1):

$$\Delta F_{sk} = p_r \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot d_{\max} \cdot d_{\min} \cdot f_{\text{real}}} \cdot \frac{E_{SL}}{E_{SQ}} \cdot A_{\text{real}} \quad 1$$

Der Entlastungseffekt wird durch die folgenden Lagen und damit durch deren Wickeldruck p_r verursacht. Wesentliche Kenngrößen des Seils, die ebenfalls Eingang in die Berechnung finden, sind der reale Querschnitt A_{real} des Seils bzw. der daraus abgeleitete Füllfaktor f_{real} (im vorliegenden Fall der textile Querschnitt). Weiterhin sind die Elastizitäten des Seils zu berücksichtigen. In Seillängsrichtung wird das E-Modul E_{SL} ermittelt. In Seilquerrichtung gilt das davon abweichende E-Modul E_{SQ} . Auf diese vier genannten Größen soll in diesem Artikel nicht weiter eingegangen werden. Weitere Informationen dazu finden sich in anderen Quellen /1/ bis /5/.

Bei den weiteren Größen jedoch ergibt sich aus der Deformation des Seilquerschnitts ein direkter bzw. indirekter Einfluss auf den Entlastungseffekt. Die Querschnittsverformung wird direkt durch den als elliptisch angenommenen Querschnitt berücksichtigt. Dabei gibt d_{\max} den größeren Seildurchmesser in axialer Trommelrichtung und d_{\min} den kleineren in radialer Trommelrichtung an.

Zudem verändert sich durch einen Lagenaufbau mit elliptischen Querschnitten der mittlere Wickeldurchmesser der Umwicklungen um die Trommel r_m (Abbildung 3).

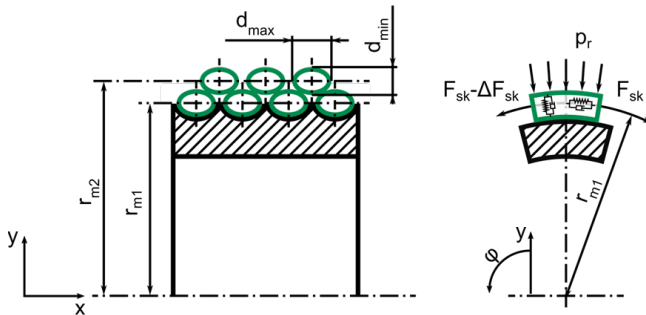


Abbildung 3: Schnitt durch ein Wickelpaket auf einer Seiltrommel mit Angabe der wesentlichen Parameter zur Bestimmung des Entlastungseffekts in der Mehrlagenwicklung

Versuchsaufbau zur Untersuchung des Wickelpaketes

Zur Untersuchung des Wickerverhaltens von Seilen auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln gibt es am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal (IMW) einen Wickelprüfstand. Dieser kann das Seil mit geringer Seilkraft auf der Speichertrommel aufnehmen, da die für den Versuch erforderliche Seilkraft über ein Spill aufgebracht wird. Über eine von der Versuchstrommel entfernte Umlenkscheibe läuft das Seil auf die Trommel auf. Der Abstand zur Umlenkscheibe dient dazu, den Ablenkwinkel, den das Seil zwischen den Bordscheiben durchläuft, in einem zulässigen Rahmen zu halten (Abbildung 4).

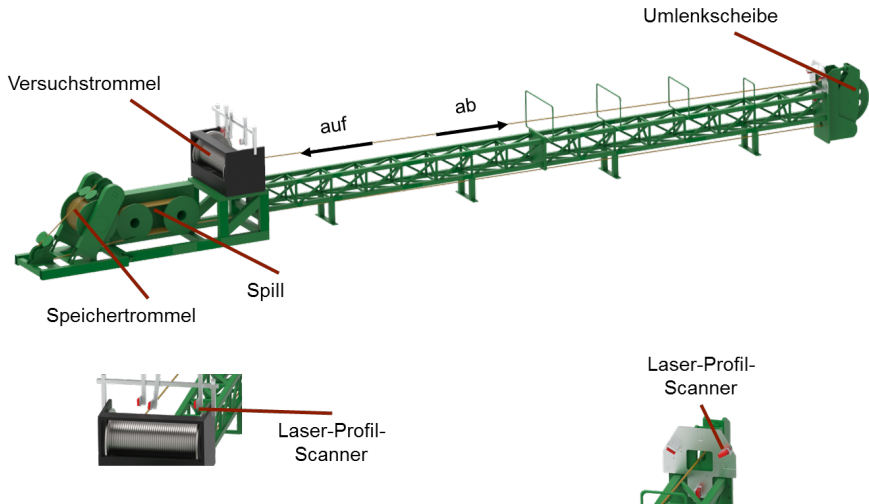


Abbildung 4: Wickelprüfstand mit Laser-Profil-Scannern (oben) zur Untersuchung des Wickelpaketes (unten links) und des Seilquerschnitts (unten rechts)

Über der Versuchstrommel und kurz vor der Umlenkscheibe gibt es Vorrichtungen, um jeweils drei Laser-Profil-Scanner anzubringen. Diese dienen dazu, das Verformungsverhalten des Seils zu untersuchen.

In Abbildung 5 ist die Anordnung der Scanner um das Seil dargestellt. Durch die definierte Anordnung rings um das Seil ist es möglich, einzelne Bilder der Seiloberfläche zu einem Gesamtquerschnitt des deformierten Seils zusammenzusetzen (Abbildung 5, rechts). Mit Hilfe einer Auswertung können daraus die charakteristischen Maße des maximalen und minimalen Durchmessers einer angenäherten Ellipse bestimmt werden. Diese dienen dazu, das deformierte Seil in theoretischen Überlegungen zu beschreiben.

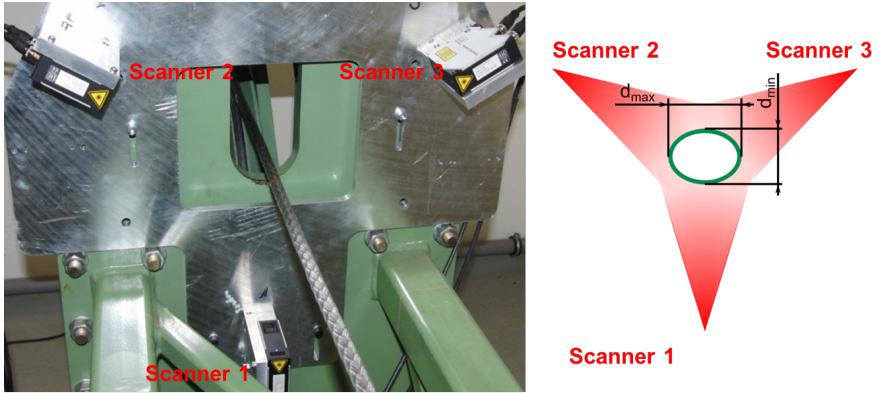


Abbildung 5: Aufbau der Laser-Profil-Scanner zur Untersuchung des Seilquerschnitts (links) und schematischer Aufbau mit Angabe des größten und kleinsten Seildurchmessers (rechts)

Abbildung 6 zeigt den Aufbau der Scanner über der Seiltrommel. In der Ansicht rechts ist dargestellt, wie das Wickelpaket aus einzelnen Bildern der Oberfläche zusammengesetzt werden kann.

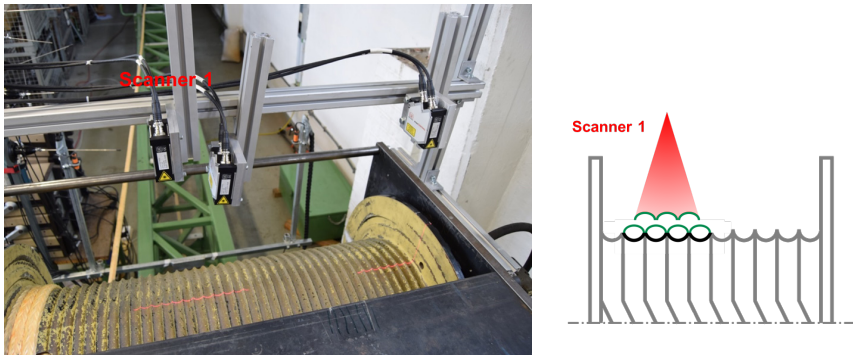


Abbildung 6: Aufbau der Laser-Profil-Scanner zur Untersuchung des Wickelpaketes (links) und schematischer Aufbau mit Angabe eines Schnitts durch das Wickelpaket

Ergebnisse von Wickelversuchen

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen Versuche an zwei verschiedenen Seilen (Abbildung 7 und Tabelle 1). Es handelt sich um vergleichbare Konstruktionen

von Faserseilen in einer 12-fach geflochtenen Konstruktion. Beide Seile sind aus Dyneema Fasern hergestellt.



Abbildung 7: *Abbildung von Seil 1 (links) und Seil 2 (rechts)*

Der Unterschied zwischen den beiden Seilen ist zum einen ein Kern aus Polyethylen den Seil 1 enthält und zum anderen ein Mantelgeflecht aus Dyneema der ebenfalls Seil 1 umgibt.

Tabelle 1: *Kennwerte der untersuchten Seile*

Nr.	d in mm	Material	Konstruktion	Kern	Mantel
1	22	Daneema SK 75	12-fach Geflecht, thermofixiert	Polyethylen	Dyneema
2	23	Dyneema	12-fach Geflecht, thermofixiert	-	-

Der unterschiedliche Aufbau der Seile zeigt sich deutlich in ihrem unterschiedlichen Deformationsverhalten. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass Seil 1 einen annähernd runden Querschnitt am freien Seil nach dem Abspulen aus der Mehrlagenwicklung zeigt. Im Vergleich dazu zeigt die offene Konstruktion von Seil 2 deutlich die einzelnen Litzen. Zudem kann auch deutlich die Deformation zu einem annähernd elliptischen Querschnitt festgestellt werden.

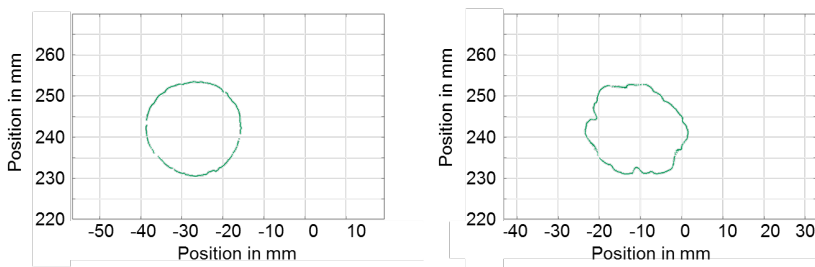


Abbildung 8: *Querschnitte von Seil 1 (links) und Seil 2 (rechts) beim Ablauf von der Trommel*

Dieser unterschiedliche Querschnitt macht sich auch im Wickelpaket bemerkbar. Die Wicklung mit Seil 1 ergibt ein höheres Wickelpaket (Abbildung 9). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund bemerkenswert, dass Seil 1 einen kleineren Nenn-durchmesser hat als Seil 2. Weiterhin kann für Seil 1 ein geordneterer Aufbau des Wickelpaketes in diesem Querschnitt festgestellt werden. Es ist der gewünschte pyramidenförmige Aufbau zu sehen. Im Gegensatz dazu liegen bei Seil 2 die Umwicklungen teils an falschen Positionen. Dies kann zu Wickelfehlern wie Lücken und dem späteren Einschneiden oberer Lagen in die unteren führen.

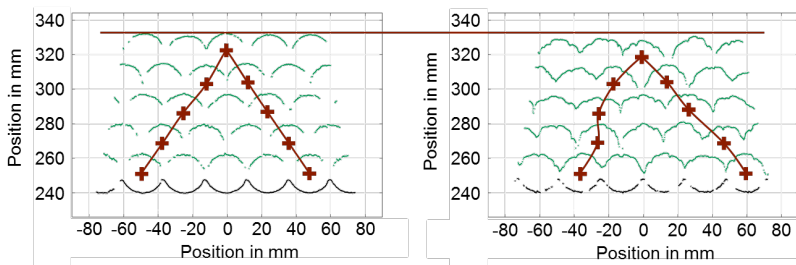


Abbildung 9: Wickelpaket von Seil 1 (links) und Seil 2 (rechts) mit Vergleich der Wickelordnung und der Wickelhöhe

Berechnung des Wickelpaketes

Die im vorangegangenen Kapitel gezeigten Versuchsergebnisse deuten an, dass eine Berechnung des Wickelpaketes aufgrund von kreisförmigen Seilquerschnitten unter Berücksichtigung des Seilnenn-durchmessers nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen wird.

Als Ausgangspunkt der Berechnung dient daher die Geometrie einer Ellipse. Gleichung 2 gibt dabei die Ellipsengleichung an (Abbildung 10).

$$1 = \frac{x_E^2}{a^2} + \frac{y_E^2}{b^2} \quad 2$$

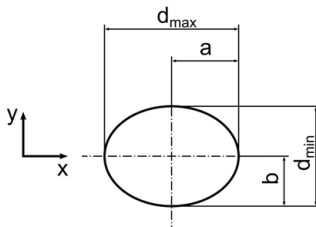


Abbildung 10: Ellipse mit Angabe der relevanten Größen

Der Aufbau des Wickelpaketes kann aus der Geometrie von Seil und Seiltrommel abgeleitet werden. Der Höhenunterschied zwischen zwei Lagen wird durch die Gleichungen 3 für den Parallelbereich und 4 für den Kreuzungsbereich beschrieben (Abbildung 11).

$$\Delta y_{pa} = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\frac{e}{4}\right)^2} \tag{3}$$

$$\Delta y_{kr} = 2 \cdot \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2} \cdot \left(\frac{e}{4} - \Delta x(\varphi)\right)^2} \tag{4}$$

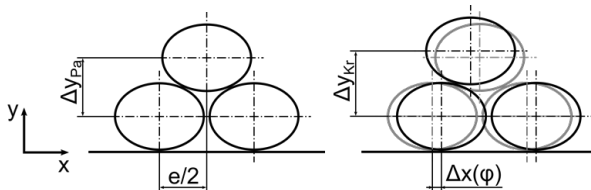


Abbildung 11: Höhenunterschied zwischen zwei Lagen mit ellipsenförmigen Querschnitten im Parallelbereich (links) und Kreuzungsbereich in Abhängigkeit der Trommeldrehung (rechts)

Die Berechnung der Verschiebung des Seils in axialer Trommelrichtung muss abschnittsweise erfolgen, da die Systemrillung diesen Verlauf vorgibt (vgl. Abbildung 2). In den Kreuzungsbereichen liegt dabei jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen der Trommeldrehung und der axialen Bewegung vor (Gleichung 5).

$$\Delta x(\varphi) = 0 \quad \text{für} \quad \varphi = 0 \dots \varphi_{pa} \tag{5}$$

$$\Delta x(\varphi) = \frac{\varphi - \varphi_{pa}}{\varphi_{kr}} \cdot \frac{e}{2} \quad \text{für} \quad \varphi = \varphi_{pa} \dots \pi$$

Durch die Auswertung der Gleichungen 3 bis 5 kann der gesamte Verlauf eines Wickelpaketes mit beliebig vielen Umwicklungen und Lagen angegeben werden.

Vergleich zwischen Berechnung und Experiment

Zur Überprüfung der Berechnungen werden diese mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Ermittlung der Umwicklungen

In der gescannten Oberfläche des Wickelpaketes können Umwicklungen anhand unterschiedlicher Vorgehensweisen ermittelt werden. Eine Vorgehensweise ist lokale Maximal- und Minimalstellen der einzelnen Umwicklungen zu ermitteln (Abbildung 12). Der lokale Suchbereich kann dazu in Relation zum Rillenabstand eingegrenzt werden. Die Interpretation ist in diesem Fall, dass jede Maximalstelle den Mittelpunkt der Umwicklung in axialer Trommelrichtung angibt, und die Minimalstelle zwei Umwicklungen trennt.

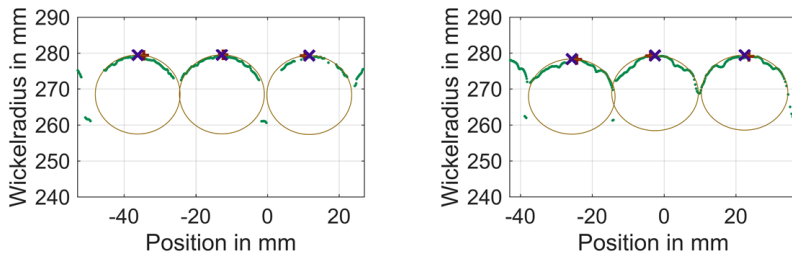


Abbildung 12: Umwicklungen mit Markierung der Maximalstellen (rotes Plus) und Angabe der gefundenen Ellipsen mit deren Maximalstelle (blaues Kreuz): Seil 1 links und Seil 2 rechts

Eine weiterführende Suchmöglichkeit ist es, in jedem Bereich, der durch die Maximalstellensuche einer Umwicklung zugeordnet ist, eine Ellipse mit den aus der Querschnittsmessung bekannten Abmaßen zuzuordnen. Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, zeigen beide Verfahren teilweise eine gute Übereinstimmung (Seil 1 mittlere Umwicklung). Gerade bei der ungleichmäßigeren Oberfläche von Seil 2 ergeben sich jedoch auch erhebliche Unterschiede. Der Vorteil der Methode mit den angenäherten Ellipsen liegt daher zum einen in einer stabileren Ermittlung des Mittelpunktes der Umwicklung in axialer Trommelrichtung, zum anderen ergibt sich jedoch auch der Vorteil, dass ein Wert für die radiale Position der Umschlingung vorliegt.

Ergebnisdarstellung

Da die Aufnahmen alle hintereinander erfolgt sind, sieht die Ergebnisdarstellung entsprechend aus. Theoretisch ist zuerst die Rillung zu sehen. Diese wird jedoch aufgrund der bekannten Geometrie ausgeblendet. Anschließend folgen die Lagen 1, 2 und 3 (Abbildung 13, oben). Der theoretische Verlauf der radialen Position ergibt sich aus Gleichungen 3 und 4 in einem konstanten Verlauf der Umwicklung in den Parallelbereichen und einem lagenweise zunehmenden Ausschlag in den Kreuzungsbereichen (Abbildung 13, unten).

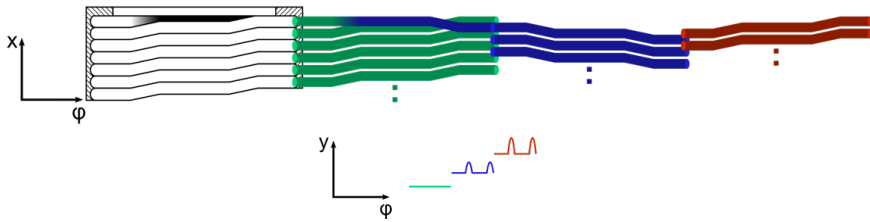


Abbildung 13: schematische Darstellung des axialen Verlaufs (oben) und des radialen Verlaufs (unten) der Umwicklungen während eines Versuchs

In den Abbildung 14 bis Abbildung 18 sind die Verläufe der Seile 1 und 2 in den Lagen 1 bis 5 angegeben. In der ersten Lage zeigen die axialen Verläufe eine gute Übereinstimmung mit dem zu erwartenden Verlauf. Dies ist durch die direkte Führung des Seils in der Rillung begründet. Der experimentelle radiale Verlauf zeigt eine Abweichung vom theoretisch linearen. Grund hierfür ist sowohl eine nicht ideal runde Trommeloberfläche als auch eine nicht ideal glatte Seiloberfläche (Abbildung 14).

1. Lage

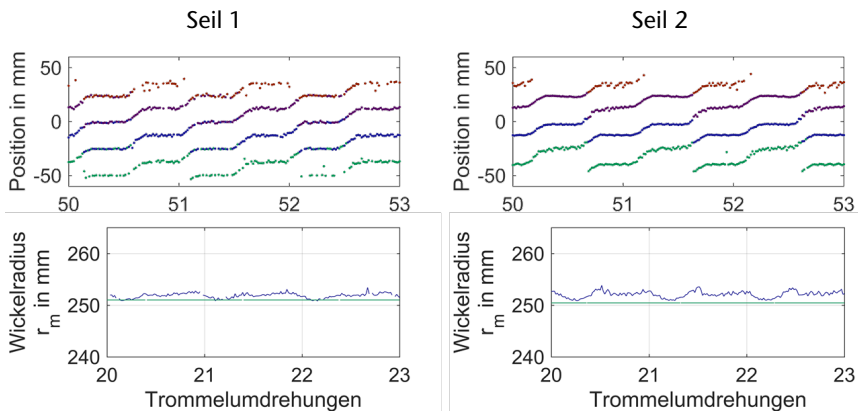


Abbildung 14: Verlauf der Umwicklungen der 1. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer Trommelrichtung und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

In Abbildung 15 ist der Übergang von der ersten zur zweiten Lage zu sehen. Es ist erkennbar, wie der axiale Verlauf von der positiven in die negative Richtung wechselt. Bei Seil 2 liegt in dieser Auswertung auch in der zweiten Lage ein geordneter Verlauf vor. Seil 1 zeigt demgegenüber einen Verlauf, der darauf hindeutet, dass Seildurchmesser (d_{\max}) und Rillensteigung nicht zusammenpassen. Die Umwicklung wird, bevor es richtigerweise in negativer Richtung weitergeht, kurz von dem darunterliegenden Kreuzungsbereich in die positive axiale Richtung gezogen (vgl. Abbildung 15, Seil 1, axialer Verlauf).

Der theoretische radiale Verlauf beider Seile verläuft unter dem gemessenen. Außerdem sind im Experiment die Ausschläge geringer als berechnet. Das niedrigere Grundniveau lässt sich durch die Stützwirkung der Rillung in der 1. Lage erklären. Die Ausschläge werden als zu groß berechnet, da im Modell keine elastische Verformung des Seilquerschnitts angenommen wird. Dieser Effekt wird mit zunehmender Lagenzahl immer stärker.

2. Lage

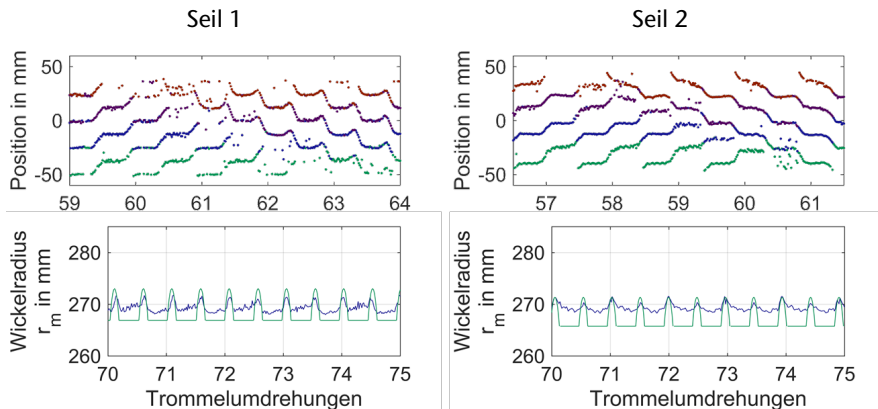


Abbildung 15: Verlauf der Umwicklungen der 1. und 2. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

In der dritten Lage ist nun bei beiden Seilen erkennbar, dass der Übergang zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich immer undeutlicher wird. Die Stützwirkung der Rillung nimmt nun immer mehr ab. Der radiale Verlauf ist noch stärker überzeichnet. Bei Seil 2 ist zudem erkennbar, dass in axialer Richtung der Unterschied zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich nicht mehr deutlich zu erkennen ist (Abbildung 16).

3. Lage

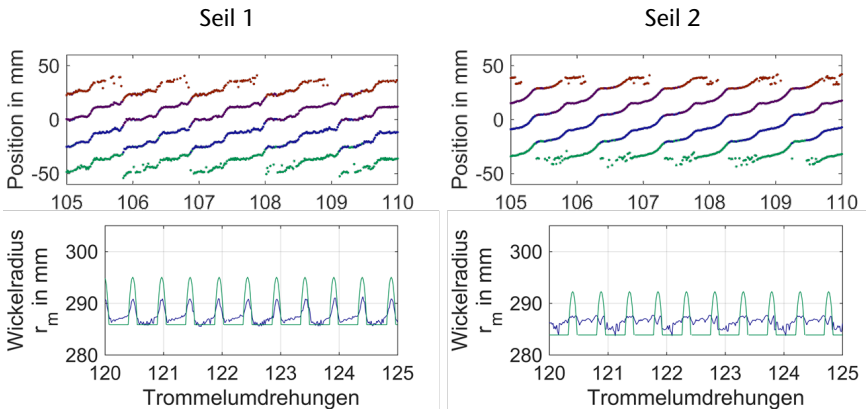


Abbildung 16: Verlauf der Umwicklungen der 3. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

4. Lage

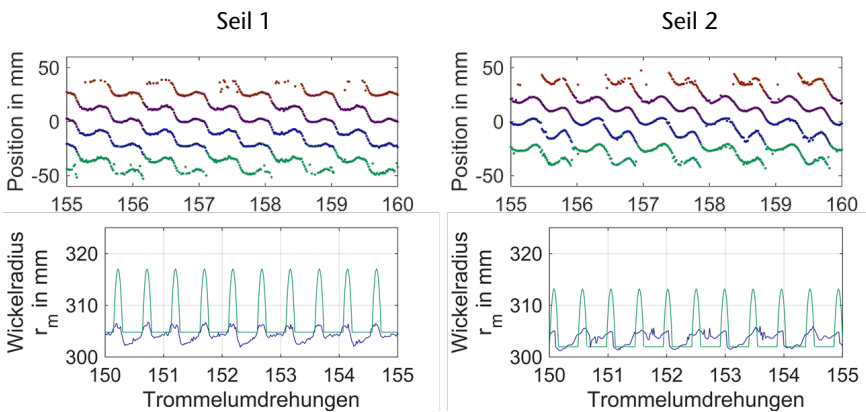


Abbildung 17: Verlauf der Umwicklungen der 4. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

Die vierte Lage zeigt bei beiden Seilen die Wellenbewegung in axialer Richtung. In radialer Richtung ist bei Seil 2 erkennbar, dass die berechnete Wickelhöhe im Parallelbereich recht gut mit dem Experiment übereinstimmt (Abbildung 17).

In Abbildung 18 ist die fünfte und letzte Lage zu sehen. Der axiale Verlauf weist nun keinen ausgeprägten Parallelbereich mehr auf. Beide Seile verlaufen eher mit einer gleichmäßigen Steigung, die nur kurz unterbrochen wird. In radialer Richtung ergibt sich für Seil 1 nach dem Modell ein deutlich zu großer Wickelradius. Bei Seil 2 fällt die Differenz etwas geringer aus. Festzuhalten bleibt jedoch, dass bei beiden Seilen das Modell sowohl für den Parallel- als auch für den Kreuzungsberiech zu große Werte liefert (Abbildung 18).

5. Lage

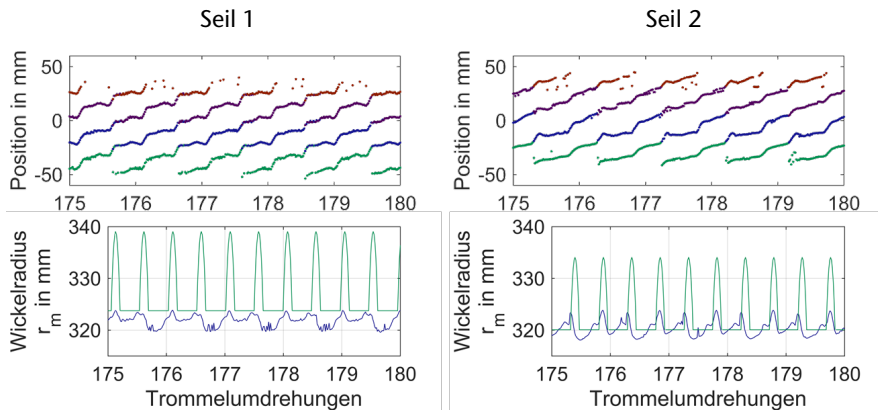


Abbildung 18: Verlauf der Umwicklungen der 5. Lage. Oben die experimentellen Ergebnisse in axialer und unten der Vergleich der experimentellen in blau und der theoretischen Ergebnisse in grün in radialer Trommelrichtung

Kritik am Modell

Insgesamt zeigt sich, dass das Modell vergleichbare Werte wie der gemessene Wickelradius liefert. Soll jedoch eine Trommel auf ein Seil abgestimmt werden, sind nur die gemessenen Werte brauchbar. Es ist somit notwendig, im Modell auch die elastische Verformung der Seilquerschnitte zu berücksichtigen. Zudem wird angestrebt, auch den axialen Verlauf quantifizierbar zu bewerten. Mit diesen beiden Werten ließe sich zum einen eine Trommel auslegen und zum anderen die Spulqualität anschließend objektiv bewerten.

Anwendung

Durch die Kenntnis des Verlaufs der Umwicklungen kann die Geometrie der Seiltrommel auf die Geometrie des Faserseils angepasst werden. Dazu wird die Rillung entsprechend des deformierten Seilquerschnitts geformt. An den Bordscheiben werden Auffüllgeometrien vorgesehen, damit keine Hohlräume zwischen dem Wickelpaket und der Bordscheibe entstehen. Der Übergang zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich wird zusätzlich abgeflacht, um einen gleichmäßigen Übergang zwischen den Bereichen zu erreichen (Abbildung 19).



Abbildung 19: Seiltrommel mit angepasster Rillung und Auffüllgeometrien

In Abbildung 20 sind die Wickelbilder von Seil 1 und Seil 2 zu sehen. Die Seile wurden auf einer Seiltrommel für Drahtseile gewickelt und zeigen daher vor allem im Bereich der Bordscheiben kein optimales Wickelbild. Zum Vergleich ist in derselben Abbildung auf der rechten Seite eine Kombination von einem Faserseil und einer darauf abgestimmten Trommel zu sehen. Es zeigt sich über die gesamte Wickelbreite ein gutes Wickelbild. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich nicht um dieselbe Trommel handelt. Auch die Verhältnisse von Trommellänge zu Trommeldurchmesser unterscheiden sich. Während die Trommel bei den Versuchen mit Seil 1 und 2 ein Verhältnis von ungefähr 2 aufweist, hat die Vergleichstrommel ein Verhältnis von 1,5. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich auch bei anderen Verhältnissen die gleiche Verbesserung des Wickelbildes einstellt.

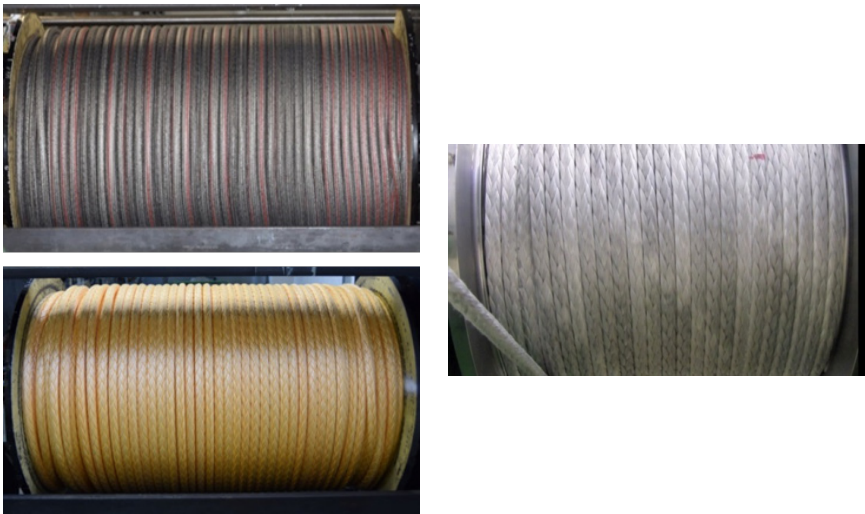


Abbildung 20: Wickelbilder von Seil 1 (oben links) und Seil 2 (unten links) im Vergleich zu einem Wickelbild mit auf das Faserseil abgestimmter Trommelgeometrie (rechts)

Zusammenfassung

Zur Auslegung von mehrlagig mit Faserseilen bewickelten Seiltrommeln ist es zum einen unter Leichtbaugesichtspunkten unerlässlich, den genauen Wickelverlauf zu kennen. Zum anderen muss auch die sich beim Wickeln verformende Seilgeometrie zur Seiltrommel passen um ein optimales Wickelergebnis zu erhalten.

Dies kann durch die Messung mit Hilfe von Laser-Profil-Sensoren und die anschließende Anpassung zwischen Seil und Seiltrommel erfolgen. Die andere Möglichkeit liegt in der Berechnung des Seilpaketes. Das vorgestellte Modell zeigt dabei einen ersten Schritt wie die Deformation des Seilquerschnitts bei der Berechnung des Wickelpaketes berücksichtigt werden kann.

Der vorliegende Artikel war in weiten Teilen auch Beitrag auf dem 8. Fachkolloquium InnoZug 2018 in Chemnitz /6/.

Literatur

- /1/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /2/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, Curvillier Verlag Göttingen, 2001
- /3/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Proceedings OIPEEC 2015, Stuttgart, 2015
- /4/ Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: Safe use of hoisting drums wound with multiple layers of wire, hybrid, fibre and/or large diameter ropes; Proceedings OIPEEC 2011 / 4th International Ropedays, College Station, Texas, 2011
- /5/ Lohrengel, A.; Schulze, M.; Erlendsson, H.; Magnusson, J.A.; Smeets, P.; Tacken, B.: The influence of high performance fibre rope designs on drum load and spooling performance in multi-layer drum equipment; OIPEEC 2017, La Rochelle, France, 2017
- /6/ Schulze M.; Lohrengel, A.; Wächter, M.: Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln, 8. Fachkolloquium InnoZug, 6. und 7. September 2018, Technische Universität Chemnitz

Längsstifte als kerbarme Welle-Nabe-Verbindung

Schäfer, G.; Korte, T.



Für die Optimierung und den Leichtbau im Bereich der Antriebstechnik ist eine kerbarme Gestaltung der im Kraftfluss liegenden Elemente eine ganz wesentliche Voraussetzung. Für die konstruktiv häufig anzutreffende Aufgabe der Verbindung von Wellen und Naben bieten sich Längsstiftverbindungen als Alternative zu Passfedern bei vergleichbar einfacher Fertigung an. Für die Erstellung von Auslegungsgrundlagen wurden in den letzten Jahren am Institut für Maschinenwesen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden. Darüber hinaus wird ein zur Passfeder anschlusskompatibler Geometrieentwurf bewertet.

Longitudinal pin connections for transmission of torque provide a potential to improve drive systems compared to standard feather keys. Systematically variation of parameters in simulation and experiments enable a simple dimensioning of connections with one or more pins. At least a geometrical suggestion is given for a feather key compatible design with reduced notch factor.

Einleitung

Die Verbindung von Wellen und Naben gehört zu den grundlegenden Aufgaben des konstruktiven Gestaltens. Unter den in Frage kommenden stoff-, form- und reibschlüssigen Verbindungen, haben die Formschlüssigen aufgrund Ihrer leichten Montier- und Demontierbarkeit und des zusätzlich verfügbaren axialen Freiheitsgrades eine weite Verbreitung. Nachteil der formschlüssigen Verbindungen ist deren funktionsbedingte Kerbwirkung, die am Beispiel des bekanntesten Vertreters, der Passfederverbindung, immer wieder zu Bruchschäden führt. Der folgende Beitrag stellt eine ebenso einfache, bislang aber nur wenig beachtete kerbarme Alternative, den Längsstift, vor und gibt konstruktive Hinweise speziell auch unter dem Gesichtspunkt geometrischer Kompatibilität. Aus den am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen mit statischen und dynamischen Torsions- und Biegebelastungen werden Grundlagen für die Auslegung und Einsatzgrenzen abgeleitet.

Geometrische Ausführungen

Den prinzipiellen Aufbau der Längsstiftverbindung mit einem Stift zeigt Abbildung 1. Die Drehmomentübertragung erfolgt dabei ähnlich der Passfederverbindung über ein zusätzliches Formschlusselement, den Längsstift.

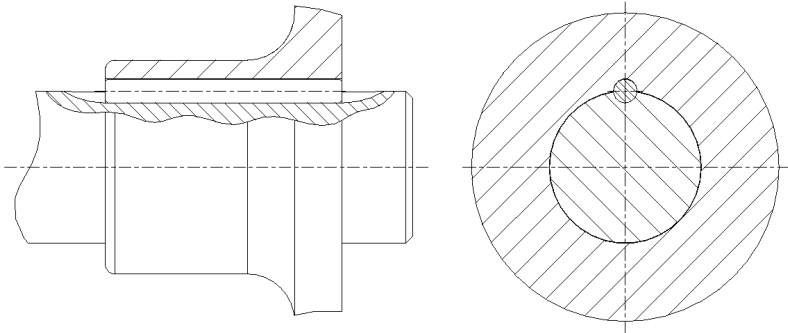


Abbildung 1: Längsstiftverbindung, prinzipieller Aufbau /4/

Der große Vorteil des runden Längsstiftquerschnitts ist der erheblich größere Kerbradius im Vergleich zur Passfeder, siehe dazu Abbildung 3, in der die Vergleichsspannungen beider Verbindungen mit identischem Wellendurchmesser bei gleicher Drehmomentbelastung und jeweils identischem linearelastischem Werkstoffverhalten mit identischer Farbskala dargestellt sind. Der schraffierte Bereich ist dabei höher belastet, als der Maximalspannungswert in der Längsstiftverbindung.

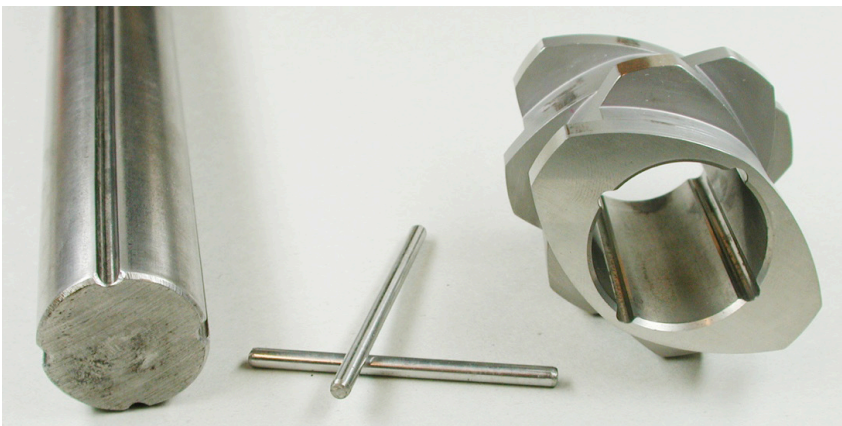


Abbildung 2: Extruderwelle mit Längsstiftverbindung

Neben der Nutzung in untergeordneter Funktion als Positionierelement, gibt es bislang nur vereinzelt Anwendungen als drehmomentleitende Welle-Nabe-Verbindung, eine davon zeigt Abbildung 2. Für die geringe Verbreitung dieses Maschinenelements sind einerseits, die lange Zeit vorhandenen Fertigungsschwierigkeiten (Verlaufen der Bohrung) und andererseits wohl die kaum vorhandenen Auslegungsrichtlinien verantwortlich.

Untersuchungen

Um die in einzelnen Lehrbüchern, wie z.B. /1/, vorhandenen Auslegungsgrundlagen für den Einzelstift bezüglich Flächenpressung und Stiftscherbeanspruchung anwendungsspezifisch zu erweitern, wurden in den letzten Jahren am Institut für Maschinenwesen (IMW) in der Arbeitsgruppe Welle-Nabe-Verbindungen numerische und experimentelle Arbeiten durchgeführt.

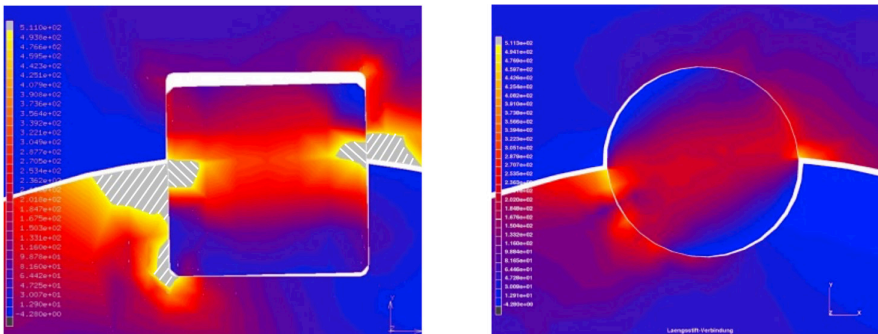


Abbildung 3: Vergleichsspannung nach v. Mises bei gleichem Wellendurchmesser und Drehmoment in einer Passfederverbindung (PFV, links) und einer Längsstiftverbindung (LSV, rechts), gleiche Farbskala, womit die schraffierten Bereiche bei der PFV höher beansprucht sind als der Maximalwert der LSV.

Ausgehend von dem ersten Vergleich in Abbildung 3 wurden zunächst Parameterstudien zur Stiftnzahl n_s , zum Stiftdurchmesser D_s und zu den beiden Außenabmessungen Verbindungsbreite l_f und Nabenaußendurchmesser D_{aA} durchgeführt. Die Längen und Durchmesser wurden jeweils in Bezug zum Fügedurchmesser D_{aI} betrachtet.

Drehmomentbelastung, numerisch

Die zuvor genannten numerischen Parameterstudien wurden von Birkholz /4/ am IMW für eine Spielsitzpassung zwischen Welle und Nabe mit einem Fügedurchmesser $D_{aI} = 32$ mm beginnend durchgeführt. Durch die reibungsfreie

Spielsitzpassung wurde die Aufgabe der Drehmomentübertragung eindeutig den Längsstiften zugewiesen um deren Übertragungsverhalten analysieren zu können.

In Abbildung 4 ist das Verhalten bei unterschiedlichen Stiftanzahlen bei sonst konstanten Bedingungen (Stift-, Wellen-, Nabenaußendurchmesser, Nabenlänge und Drehmoment) anhand der normierten Vergleichsspannung nach v. Mises über der Axialkoordinate der Verbindung dargestellt. Die Drehmomenteinleitung erfolgt von links bei $z/l_w = 0$, mit l_w als Länge der Welle im numerischen Modell. Verbindungen mit einem oder zwei Stiften zeigen hier deutlich erhöhte Spannungswerte. Ab drei Stifte ist die weitere Spannungsreduzierung recht gering, so dass drei oder vier Stifte fertigungsgerecht erscheinen.

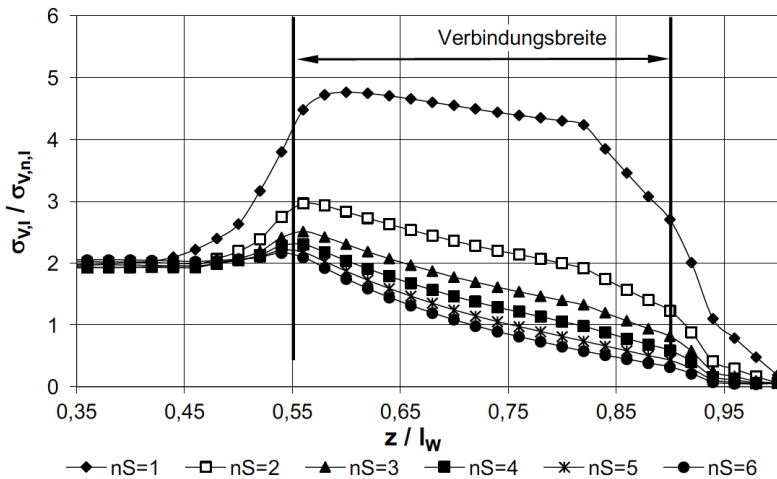


Abbildung 4: Verlauf der bezogenen Vergleichsspannung in der Wellennut für verschiedene Stiftanzahlen n_S . $D_{al} = 32$ mm, $Q_S = 0,125$, $Q_A = 0,5$, $l_f/D_{al} = 0,625/4$

Abbildung 5 zeigt für die günstige Stiftanzahl $n_s = 4$ den Einfluss unterschiedlicher Stiftdurchmesser. Betrachtet man die Spannungsüberhöhung an der lasteinleitungsseitigen Nabenkante ($z/l_w = 0,55$) in Kombination mit der Beanspruchung im freien (genuteten) Wellenquerschnitt ($0,3 < z/l_w < 0,5$), so erkennt man für das Stiftdurchmesserverhältnis von $Q_S = 0,1875$ ein sehr ausgewogenes Verhalten. Damit können drei bis 4 Stifte mit einem Stiftdurchmesserverhältnis von $Q_S = 0,1875$ (bis 0,2) als ideale Auslegung gelten.

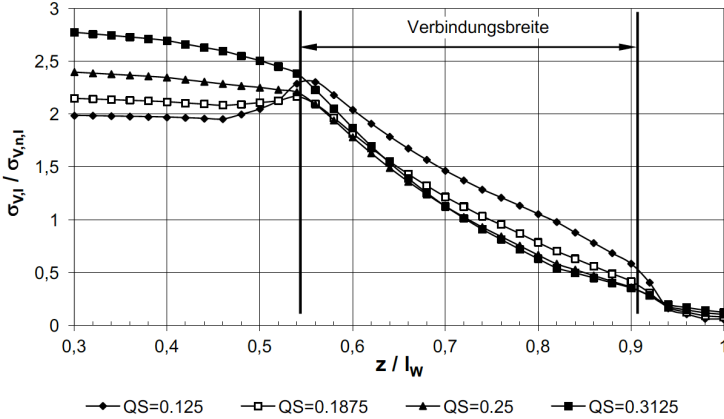


Abbildung 5: Verlauf der bezogenen Vergleichsspannung im Nutgrund der Wellennut für variierende Q_s . $D_{al} = 32$ mm, $Q_A = 0,5$, $l_f/D_{al} = 0,625$, $n_s = 4/4$

In Abbildung 6 sind die Torsionsformzahlen, ausgewertet nach DIN 743 /3/, für unterschiedliche Stiftanzahlen und -durchmesser dargestellt, mit $Q_s = D_s/D_{al}$. Damit gilt bei der empfohlenen Geometriekonstellation eine Torsionsformzahl α_{kt} von 2 bis 2,2 für die Welle. Im Vergleich dazu gilt nach /1/ Tab. 15.3 für die Passfedernut $\alpha_{kt} = 2,8$.

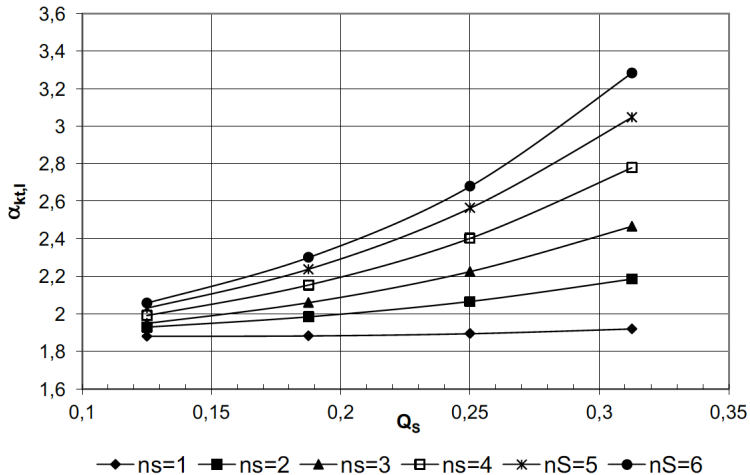


Abbildung 6: Torsionsformzahlen der Welle für verschiedene Q_s und $n_s / 4$

Drehmomentbelastung, experimentell

In einem weiteren DFG-Vorhaben /5/ wurden ergänzende numerische und umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Bauteilen mit einem Fügedurchmesser $D_{aI} = 32$ mm durchgeführt. Die Parametervarianten sind in Tabelle 1 angegeben. Aufgrund des möglichen Reibkorrosionseinflusses wurden die dynamischen Untersuchungen mit $1,5 \times 10^7$ Lastwechseln und in Stichversuchen bis 3×10^7 Lastwechsel gefahren.

Tabelle 1: *Parametervariation für experimentelle Untersuchungen /5/*

Parameter	Ausprägung		
Stifftanzahl n_S	1		3
Stiftdurchmesser D_S	4 mm ($Q_S = 0,125$)		6 mm ($Q_S = 0,1875$)
Außendurchmesser Nabe D_{aA}	45 mm ($Q_A = 0,71$)		64 mm ($Q_A = 0,5$)
Verbindungsbreite l_F	32 mm ($l_F/D_{aI} = 1$)		45 mm ($l_F/D_{aI} = 1,4$)
Passung Welle / Nabe	Spielpassung (0,6‰ bez. Spiel ξ)		Übermaßpassung (1‰ bez. Übermaß ξ)
Ausführung Stift	Zylinderstift		Hohlspannstift
Material Nabe	C45		EN-GJL-250
Verbindungsart	Längsstiftverbindung		Passfederverbindung
Beanspruchung	Dyn. Torsion		Dyn. Biegung
	R = 0,1	R = -1	

Neben den günstigen Parametervarianten ($Q_S = 0,1875$ und $l_F/D_{aI} = 1$) der numerischen Untersuchungen /4/ wurden Vergleichsversuche mit einem Stift oder einer Passfeder, mit Presssitz zwischen Welle und Nabe alternativ zum Schiebeseitz und Hohlspannstiften (DIN 8752 /2/) alternativ zum Vollstift gefahren.

Abbildung 7 zeigt eine Welle aus der Versuchsreihe a in Abbildung 8 mit dem typischen 45° -Bruch unter Torsion, wobei die Reibkorrosionsspuren zu großen Teilen erst als Folgeschaden der Rissentstehung aufgetreten sind.

In Abbildung 8 sind die ermittelten Dauerfestigkeiten nach DIN 743 /3/ in Kerbwirkungszahlen umgerechnet dargestellt. Aus dem Vergleich der Versuchsreihen a und g ist das Potential der Längsstiftverbindung gut zu erkennen, die Kerbwirkungszahl der Längsstiftverbindung mit drei Stiften liegt 37% unter dem Wert der Passfederverbindung. Bei Wechseltorsion ($R = -1$) wurden zwar auch „Dauerfestigkeiten“ bei $1,5 \times 10^7$ berechnet, die beobachteten Reibkorrosionsschäden lassen aber einen solchen Betrieb, zumindest ohne Ölschmierung, nicht nachhaltig erscheinen.

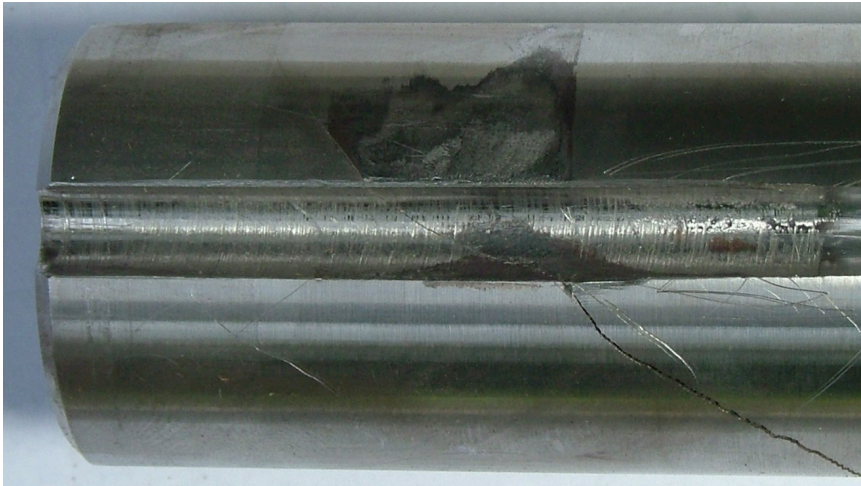


Abbildung 7: Wellenbruch 3_0,1875_0,5_1, $R = 0,1$, 1100 Nm +/- 900 Nm Torsionsbelastung /5/

Vergleich der experimentell ermittelten Kerbwirkungszahlen bei $R = 0,1$ und $R = -1$

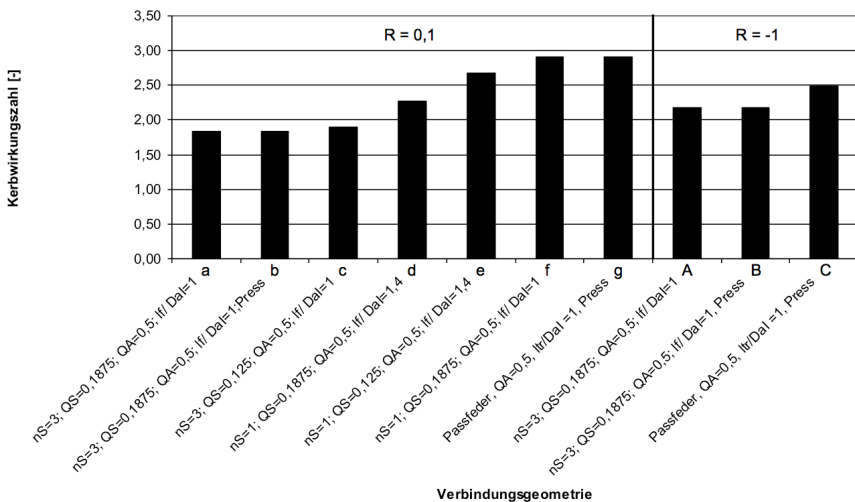


Abbildung 8: Vergleich der in /5/ experimentell ermittelten Kerbwirkungszahlen

Abbildung 9 zeigt das „abgestimmte“ Anrissverhalten der dünnwandigen Stahlhaben mit einem Durchmesser Verhältnis von $Q_A = 0,71$. Die dünnwandigen

Gussnaben waren den Wellen deutlich unterlegen und bestimmend für die Verbindungstragfähigkeit. An dieser Stelle zeigt sich der negative Einfluss der gewölbten Kontaktfläche in der Nabennut, der zu erheblichen zusätzlichen radialen Kraftkomponenten bei Torsionsübertragung führt. Hier ist die klassische Passfeder im Vorteil.

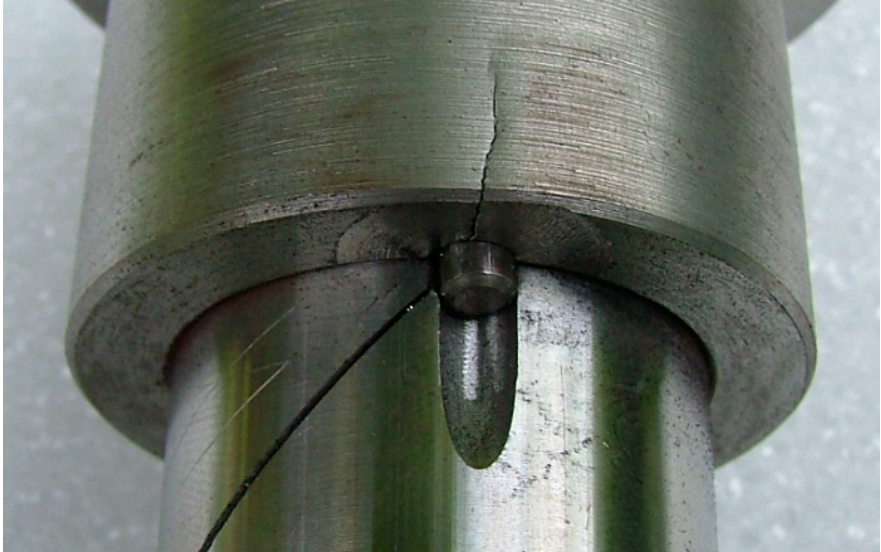


Abbildung 9: Wellenbruch 3_0,125_0,71_1, $R = 0,1$, 770 Nm +/- 630 Nm
Torsionsbelastung /5/

Stiftbrüche wurden bei sämtlichen Untersuchungen mit Vollstiften nicht beobachtet, lediglich bei den Untersuchungen mit Hohlspannstiften nach DIN 8752 /2/ kam es bei Schwellbelastung ($R = 0,1$) und Spielsitz zwischen Welle und Nabe zu massiven bleibenden Verformungen der Hohlspannstifte, siehe Abbildung 10, in deren Folge keine Dauerfestigkeit ermittelt werden konnte. Für den Fall der Presspassung zwischen Welle und Nabe konnte mit den Hohlspannstiften eine Dauerfestigkeit bis 3×10^7 Lastwechsel trotz Reibkorrosionsbildung nachgewiesen werden.

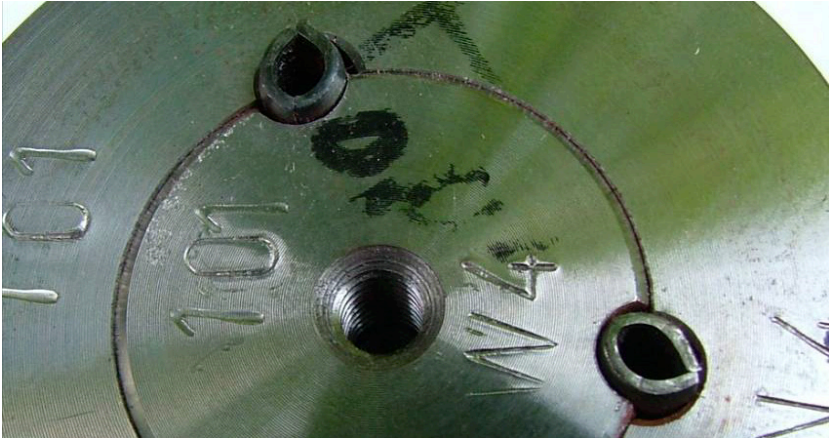


Abbildung 10: Deformation der Hohlspannstifte 3_0,1875_0,5_1_HSP /5/

Kombinierte Drehmoment- und Biegebelastung, experimentell

Die Versuche mit kombinierter Belastung wurden nur mit den Spielsitzpaarungen (0,6‰ bezogenes Spiel) bei $M_{t,m}/M_{b,a} = 0,5$ mit $\sigma_{b,a} = 124$ MPa und $\tau_{t,m} = 32$ MPa gefahren. Als Ergebnis davon versagten in den Versuchen trotz der dreifachen Stiftabstützung alle Verbindungsvarianten mit erheblichen Reibkorrosionsschäden, siehe Abbildung 11, wobei der Bruchort nicht an der Nabenkante, sondern sehr weit unter der Nabe liegt. Analog zu den Passfederverbindungen ist ein überlagerter zylindrischer Pressverband auch für die Längsstiftverbindung bei Querkraft- oder Biegebelastung sehr empfehlenswert.



Abbildung 11: Wellenbruch 1_0,1875_0,5_1,4, kombinierte Belastung (stat. Torsion + Umlaufbiegung) /5/

Passfeder mit halbrundem Fuß, numerisch

Die Ergebnisse zur Kerbreduzierung speziell in der meistens gefährdeten Welle, in Kombination mit dem Wunsch einer möglichst großen Kompatibilität zu gängigen Anbauteilen mit Passfedergeometrie führt zu einer bislang als Sonderform zu bezeichnenden Symbiose aus Rundstiftfuß und Passfederkopf, siehe Abbildung 13. Vor dem Hintergrund der gebrochenen dünnwandigen Naben mit Längsstiften in Abbildung 9 ist hier ebenfalls eine Verbesserung erwartbar. Um die grundsätzlich sinnvolle Mischform bewerten zu können, wurden in /6/ numerische Untersuchungen mit den in Tabelle 2 angegebenen Werkstoffkombinationen dazu angestellt. Der Fügedurchmesser beträgt auch hier $D_{al} = 32$ mm.

Tabelle 2: Werkstoffdaten für die bilineare Simulation

Element	Welle	Nabe	Passfeder
Werkstoff	42CrMo4	C45E	C45E
Streckgrenze Re [MPa]	750	370	430
Tangentenmodul [MPa]	3289	1962	2026

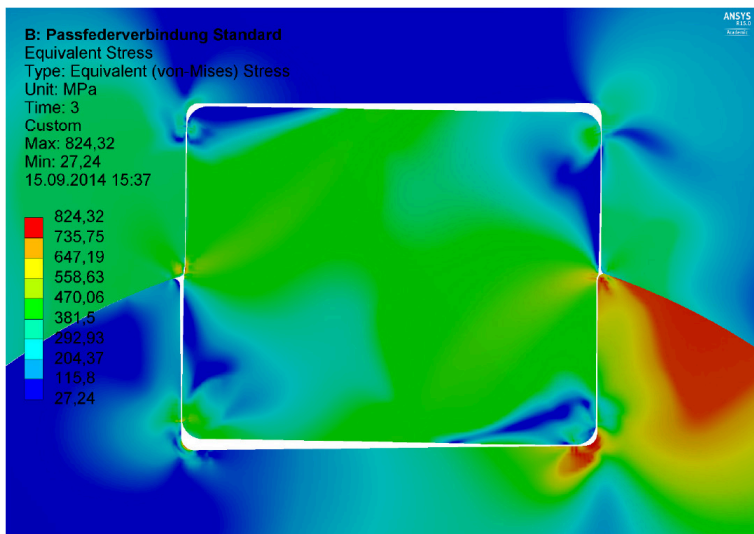


Abbildung 12: Vergleichsspannung nach v. Mises bei einer Torsionsbelastung von 600 Nm /6/

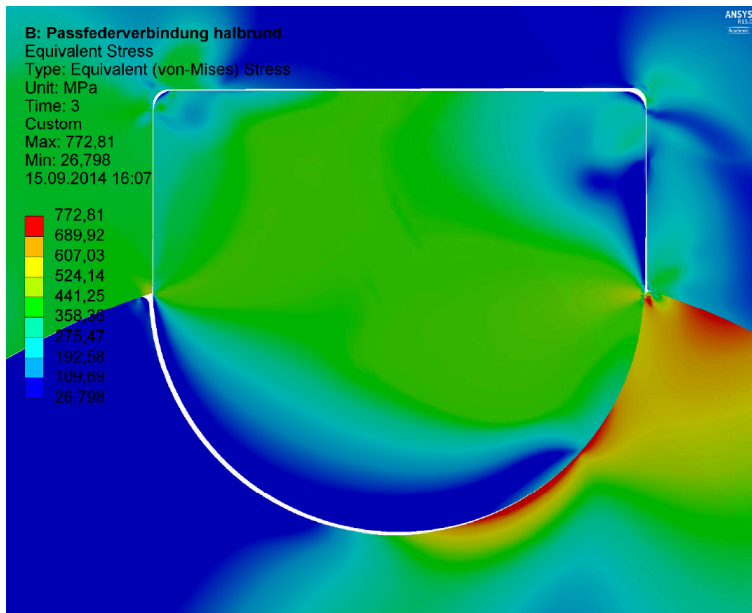


Abbildung 13: Vergleichsspannung nach v. Mises bei einer Torsionsbelastung von 600 Nm /6/

Beide Verbindungen wurden mit nur einem Formschlusselement simuliert, um den Anspruch der Kompatibilität zu erfüllen. Die Mischform zeigt hier eine signifikant niedrigere Vergleichsspannung nach v. Mises. Deutlicher wird dies noch bei der lokalen Auswertung der Hauptspannungen in der Wellennutecke, die bei der normalen Passfeder extrem hohe Zugspannungen aufweist. Im Sinne einer Optimierung und zur Nutzung von Leichtbaupotentialen ist mit der Mischform eine schnittstellenkompatible Lösung verfügbar.

Zusammenfassung

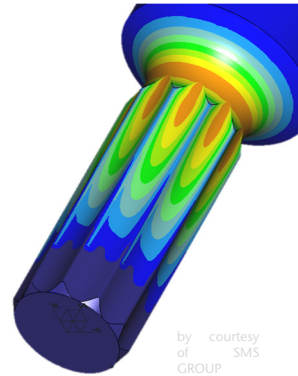
Der Längsstift realisiert mit seinem kreisrunden Querschnitt den ideal großen Kerbradius in den beteiligten Bauteilen und führt damit zu einer wirksamen Kerbspannungsreduzierung. Dieser Effekt konnte sowohl numerisch als auch experimentell nachgewiesen werden. Für eine sinnvolle Auslegung konnte eine Stifanzahl von drei bis vier Stiften mit einem Durchmesser von ca. 0,2 x Wellendurchmesser ermittelt werden. Bei zusätzlichen Biegebelastungen sollte auf spielfreien Sitz zwischen Welle und Nabe geachtet werden. Durch die mit aktuellen Fertigungstechnologien erreichbaren Genauigkeiten sind auch die historischen Probleme der Teilungsabweichungen zwischen den Längsstiftbohrungen und deren Verläufen zwischen Welle und Nabe gelöst.

Speziell für den Fall einer Kundenschnittstelle bietet die abschließend dargestellte Mischform aus Längsstift und Passfeder eine interessante Lösung zur Tragfähigkeitssteigerung an der meist limitierenden Welle.

Literatur

- /1/ Kabus, K.; Rieg, F.; Weidemann, F.; Engelken, G.; Hackenschmidt, R.: Maschinenelemente - Funktion, Gestaltung und Berechnung. 16. Aufl. München: Hanser, 2007. – ISBN 978-3-446-40897-5
- /2/ Norm DIN EN ISO 8752, 10.2009. Spannstifte (-hülsen) – Geschlitzt, schwere Ausführung
- /3/ Norm DIN 743, Teil 1 bis 4, 12.2012. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- /4/ Birkholz, Hagen: Auslegung von Längsstift-Verbindungen mit mehreren Mitnehmerelementen unter Drehmomentbelastung. Dissertation TU Clausthal: Papierflieger, 2005. – ISBN 3-89720-769-9
- /5/ Korte, Thomas; Dietz, Peter; Schäfer, Günter: Gestaltung und Dimensionierung spielbehafteter Längsstiftverbindungen. Abschlussbericht DFG-Vorhaben DI 289/23-2, 2008
- /6/ Runge, Fridtjof: Benchmark Formschlussverbindungen. Bachelorarbeit TU Clausthal, 2014

Höhere Drehmomente bei gleichem Wellendurchmesser - SMS GROUP entwickelt erfolgreich neue Welle-Nabe-Verbindung



Jakob, M.¹; Merz, J.²; Schäfer, G. ¹; Scheffe, K.²

Eine von der Firma SMS GROUP entwickelte und gefertigte neue Verzahnungsform für Welle-Nabe-Verbindungen verspricht signifikant höhere übertragbare Drehmomente bei gleichem Bauraum. Das Institut für Maschinenwesen führte im Auftrag erfolgreich experimentelle Torsionsversuche zur Bestätigung der Auslegungsberechnungen durch.

A new shaft-hub connection was developed and manufactured by the company SMS GROUP. The teeth form based on a trochoid promises significantly higher transmittable torques with the same diameter compared to standardized profiles. The Institute of Mechanical Engineering successfully conducts experimental torsion tests to confirm the design calculations.

Ziel: Gesteigerte Drehmomentübertragbarkeit bei gleicher Baugröße

Die SMS GROUP ist ein weltweit tätiges Unternehmen im Bereich der Metallindustrie mit etwa 14.000 Mitarbeitern. Das deutsche Familienunternehmen ist unter anderem ein führender Systemanbieter von Walzwerken.

Bei Walzwerken oder Richtmaschinen werden Walzen zu Wartungszwecken von den Antrieben getrennt. In der Praxis kommen als Welle-Nabe-Verbindung (WNV) überwiegend Flachzapfenverbindungen oder Zahnwellenprofile nach DIN 5480 /1/ zum Einsatz. Diese Verbindungsarten kommen an ihre Grenzen, wenn - für den Umformprozess vorteilhaft - höhere Drehmomente bei kleinerem Walzen- und damit Verbindungsdurchmesser übertragen werden sollen. Eine neu zu entwickelnde WNV soll mit einem Referenzdurchmesser in der Größenordnung von 100 mm ein Drehmoment von etwa 70 kNm dynamisch übertragen.

¹ Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal

² SMS GROUP GmbH

Neue Verzahnungsform: Profilform auf Basis der Trochoide

Neben der klassisch eingesetzten und nach DIN 5480 genormten Zahnwellenverbindung mit evolventischer Zahnform gibt es weitere denkbare Profilformen. Die in einem ersten Schritt mittels FEM untersuchten P3G- und P4C-Profile erwiesen sich auf Grund eines zu hohen Schlupfes als nicht erfolversprechend. Daraus resultierte letztendlich die Idee für eine neue Verzahnungsform, welche auf Basis einfacher Trochoiden gebildet wurde. Die gewählte Verzahnung kann bereits mit einer Exzentrizität gebildet werden. Die x- und y-Koordinaten des Verzahnungsprofils, vgl. blaue Linie in Abbildung 1, werden beispielhaft über folgende Terme gebildet:

$$x(\varphi) = R_m \cdot \cos\varphi - e \cdot \cos((n+1)\varphi) \quad 1$$

$$y(\varphi) = R_m \cdot \sin\varphi - e \cdot \sin((n+1)\varphi) \quad 2$$

Auf einem Grundkreis R_m rollt ein sogenannter Rollkreis mit dem Radius e ab. Die Profilkontur ist die Wegkurve des Punktes P. Rollt der Kreis außerhalb des Grundkreises ab, so spricht man von einer Epitrochoide (E-Profil), rollt der Kreis im Inneren des Grundkreises ab, so ist es eine Hypotrochoide (H-Profil). Die Mitnehmerzahl kann über die Periodizität n eingestellt werden. Die Gleichungen 1 und 2 können um weitere Exzentrizitäten ergänzt werden, sodass sich komplexere Trochoidenprofile (M-Profil) ergeben, vgl. /2/.

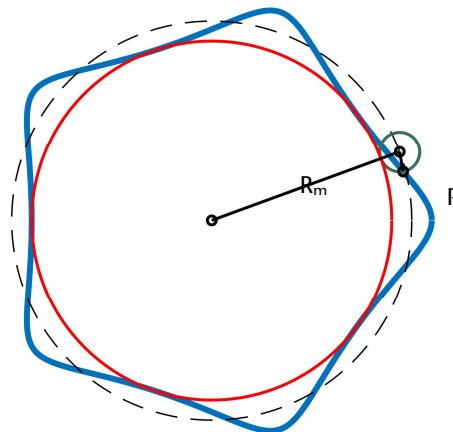


Abbildung 1: Bildungsschema einer einfachen Trochoide

Die SMS GROUP untersuchte mittels FEM verschiedene E-, M- und H-Profile und optimierte die Verbindungen hinsichtlich Drehmomentübertragbarkeit und

geringen Schlupfwerten. Mit einem H-Profil mit der Mitnehmerzahl 10 konnte ein guter Kompromiss zwischen den beiden Zielgrößen gefunden werden.

Dr.-Ing. Schäfer, Akademischer Oberrat, IMW: „Aktuelle Forschungen zeigen, dass bei vorgegeben Bezugsdurchmesser der Welle durch die aktuell in DIN 5480 genormten Profile die möglichen Tragfähigkeiten von Profillwellen nicht konsequent ausgeschöpft werden. Mit numerischen Optimierungen können auf die jeweiligen Anforderungen angepasste Profilformen mit minimalen Kerbwirkungen entwickelt und fertigungstechnisch validiert werden. Die Firma SMS GROUP ist dabei Vorreiter im Bereich großer Wellendurchmesser.“

Eine zusätzliche Steigerung der Tragfähigkeit konnte dadurch erreicht werden, dass das Profil in axialer Richtung ballig ausgeführt wurde. Durch eine lastangepasste Balligkeit ergibt sich ein gleichmäßigeres Tragbild in axialer Richtung und die Lastüberhöhung im Übergangsbereich zwischen Welle und Nabe konnte verringert werden. Diese Innovation konnte mittels eines Patentes /3/ geschützt werden.

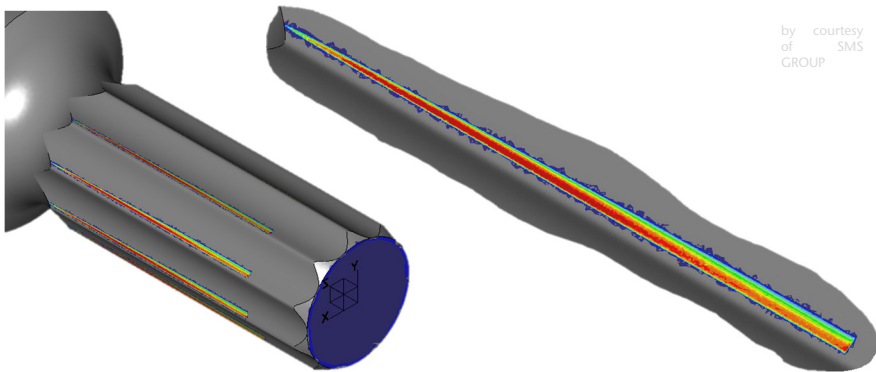


Abbildung 2: Kontaktdruck der Verbindung. Durch eine axiale Balligkeit ergibt sich ein gleichmäßiges Tragverhalten der Verbindung.

Herstellung: Fräsen und Stoßen ist realisierbar und konkurrenzfähig

Die bisher eingesetzten Profile können mittels spezieller Werkzeuge hergestellt werden. Diese stehen für die entwickelte Verbindung hingegen nicht zur Verfügung.

Mit Hilfe einer 5-Achs-Fräsmaschine konnte die komplexe Kontur der Wellen passgenau, einfach und praktikabel hergestellt werden. Die Herstellung der ersten Prototyp-Naben erfolgte anfänglich mittels Senkerodieren. Der sehr langwierige

und damit teure Herstellungsprozess konnte durch ein Herstellungsverfahren mit einer Stoßmaschine und mit - auf das Nabenprofil abgestimmten – Profilschneidplatten ersetzt werden. Damit können sowohl die Welle als auch die Nabe wirtschaftlich und konkurrenzfähig hergestellt werden.

Zusätzlich wurden ein Teil der Wellen plasmanitriert, lasergehärtet oder nitriert, um dessen Einfluss auf die Bauteilfestigkeit und den Verschleiß experimentell untersuchen zu können. Alle Verbindungen wurden mit Fügespigel gefertigt.

Experimenteller Nachweis: Torsionsversuche bestätigen Erwartungen

Seit mehreren Jahrzehnten liegt ein zentraler Forschungsschwerpunkt des Instituts für Maschinenwesen (IMW) im Bereich der Welle-Nabe-Verbindung. Zur Validierung numerischer Berechnungen stehen eine Vielzahl an Prüfständen unterschiedlicher Belastungsarten und -größen zur Verfügung (s. Technische Ausrüstung in dieser Mitteilung). Das IMW bietet als Dienstleistung neben einer fachlichen Beratung auch die technische Durchführung von Versuchen mit anschließender Auswertung und Dokumentation an.

Die in diesem Projekt mittels FEM ausgelegten WNV-Verbindungen sollten mittels dynamischer Torsionsversuche experimentell überprüft werden. Am IMW steht dazu ein hydraulischer Torsionsprüfstand mit bis zu 500 kNm Torsionsmoment /4/ zur Verfügung:

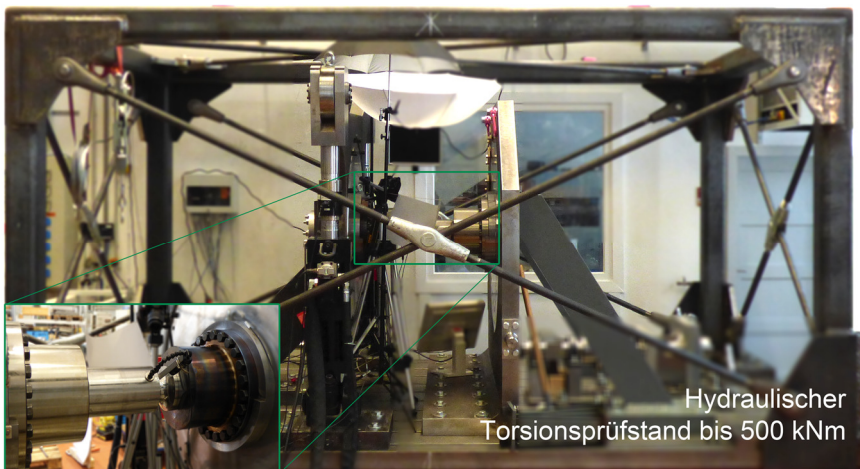


Abbildung 3: Die WNV (li. Bild) wird zwischen einem Festbock und dem drehbar gelagerten Flansch befestigt. Das Torsionsmoment wird daran über zwei Hydraulikzylinder aufgebracht.

Die Welle-Nabe-Verbindungen wurden praxisnah schwellend mit dem vorgesehenen Torsionsmoment belastet. Untersucht wurden neben verschiedenen Oberflächen-Varianten auch Proben mit gebundenem und freiem Auslauf. Die Proben wurden während der Versuche kontinuierlich auf Versagenserscheinungen überwacht und der Zustand der Proben regelmäßig optisch dokumentiert. Die Berechnungsmodelle konnten mit Hilfe der Versuchsergebnisse bzgl. der Übertragbarkeit bestätigt werden. Der auftretende, geringe Reibverschleiß bei Fettschmierung entspricht den ersten Erwartungen.

Kurt Scheffe, Entwickler, SMS GROUP: „Das IMW ist für uns stets ein kompetenter Ansprechpartner, welches die Versuche mit hoher Professionalität und Engagement durchgeführt hat. Der institutseigene Torsionsprüfstand war aus unserer Sicht bestens für die praxisnahen Tests der Welle-Nabe-Verbindung geeignet. Die Ergebnisse der Tests sind überzeugend und offenbaren das große Potential für einen Einsatz der neuentwickelten Welle-Nabe-Verbindung im rauen Walzwerksbetrieb.“

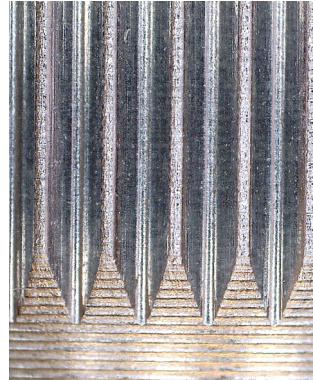
Ausblick: Positive Tests ebnen Weg für einen Probetrieb

Mit Hilfe neuer Herstellungsverfahren und neuer Berechnungsmethoden werden in naher Zukunft neue Verzahnungsformen auf den Markt kommen. Verzahnungsprofile können nun beispielsweise auf höhere Drehmomente, geringe Schlupfwerte oder sogar Leichtbau ausgelegt werden /5/. Die SMS GROUP zeigt mit dem gewählten, berechneten und getesteten Zahnprofil auf Basis der Trochoide die Potentiale neuer Verzahnungsprofile im Schwermaschinenbau und ähnlichen Anwendungsgebieten wie Windkraftanlagen. Ihre internen Vergleichsrechnungen zeigen, dass bei gleichen Hülldurchmessern ein etwa doppelt so hohes Drehmoment übertragen werden kann, gegenüber den bisher eingesetzten Verbindungen. Das Potential der innovativen Verbindung wird sich in Kürze in einer Anwendung in einem ersten Praxistest zeigen.

Literatur

- /1/ DIN 5480 - 1: 2006-03, Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser - Teil 1: Grundlagen (DIN 5480-1:2006)
- /2/ Ziaei, M.: Neue zyklische Profilkonturen-die optimale Alternative für die genormten Zahnprofilverbindungen, in: Konstruktion, 2012, Heft 10, S. 92 – 98.
- /3/ SMS Group GmbH, 2016, Welle und Welle-Nabe-Verbindung, Erfinder: Carsten Andreas Klein, Jürgen Merz, Klaus Pietsch, Kurt Scheffe, 04.01.2018. Anmeldung: 30.06.2016, DE, Patentschrift DE102016211797A1
- /4/ Jakob, M.: Entwicklung eines dynamischen Torsionsprüfstands mit 500 kNm Prüfdrehmoment, in: Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal Nr. 39, 2014, S. 93 – 94.
- /5/ Jakob, M.: Auslegung und Optimierung von Bauteilgeometrien mittels FEM und DoE am Beispiel dünnwandiger Profilwellen, in: Stelzer, R. (Hrsg.): 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2018, Bayreuth, 2018

Pressverbindungen mit gerändelter Welle – eine Zusammenfassung zum Stand der Technik



Mörz, F.

Im folgenden Artikel wird eine Zusammenfassung der Ursprünge und der wichtigsten Arbeiten zum Thema Pressverbindungen mit gerändelter Welle gegeben. Außerdem wird ein Einblick in ein aktuelles Forschungsvorhaben zum Fertigungseinfluss von Pressverbindungen mit gerändelter Welle gegeben.

The following article gives a summary of the origins and the most important works on press-fit connections with knurled shafts. Furthermore, it gives an insight into a current research project on the manufacturing influence of press-fit connections with knurled shaft.

Rändelungen und deren Fertigung

Rändelungen wurden erstmals 1924 in der DIN 82 – Rändel- und Kordelteilungen normativ beschrieben /1/. Der ursprüngliche Zweck dieses Maschinenelements war die Verbesserung der haptischen Eigenschaften von verschiedensten Bedienelementen wie etwa an Bügelmessschrauben oder Kronen von Uhren.

Die Fertigung von Rändelungen erfolgt nach DIN 82 mit Hilfe von sogenannten Rändelrädern. Die Werkzeuggeometrie der Rändelräder ist wiederum in DIN 403 /2/ genormt. Je nach Ausführung der zu fertigenden Rändelung, der Art und Anzahl der Rändelräder selbst und der Ausrichtung beim Fertigen der Rändelung kann der Herstellungsprozess umformend oder spanend erfolgen.

Für die Verwendung von Rändelungen als lastübertragendes Element in Pressverbindungen kommt aufgrund des Fügevorganges üblicherweise die Rändelform RAA mit achsparallelen Riefen in Frage (vgl. Abbildung 1).

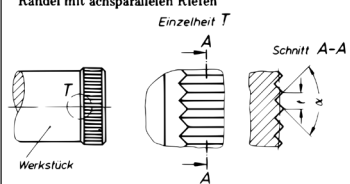
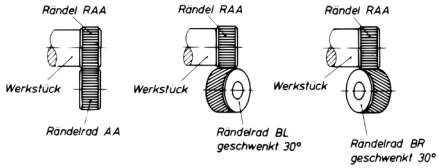
Form	Benennung und Darstellung	Herstellungsmöglichkeiten mit Rändelrädern nach DIN 403
RAA	<p>Rändel mit achsparallelen Riefen</p> 	

Abbildung 1: Auszug aus DIN 82: Rändel /1/

Rändelung als lastübertragendes Element in einer Pressverbindung

Durch die Verwendung von Rändelungen als zusätzliche lastübertragende Elemente in Pressverbindungen wird eine Kombination aus reib- und formschlüssiger Welle-Nabe-Verbindung, eine sogenannte Pressverbindung mit gerändelter Welle oder auch Rändelpressverbindung (RPV) erzeugt. Diese Kombination widerspricht klassischen Auslegungsprinzipien, bei denen das Bauteil bzw. die Verbindung definiert gegen eine Versagensursache ausgelegt wird. Aus diesem Grund sind für die Gestaltung und Auslegung vertiefte Untersuchungen erforderlich, damit eine sichere Anwendung und Auslegung dieser Verbindungen möglich ist.

Prinzipiell muss für eine derartige Verbindung ein recht großer Festigkeitsunterschied zwischen den beiden Verbindungspartnern gegeben sein. Beim Fügevorgang schneiden oder formen (je nach Ausführung der Fasengeometrie an der Stirnseite der Welle) sich die Rändelspitzen des härteren ausgeführten Verbindungspartners in die Geometrie des weicheren Partners ein. Dabei kann sowohl die Welle als auch die Nabe als härterer Verbindungspartner ausgeführt sein und als „Werkzeug“ für die „Verzahnung“ des weicheren Verbindungspartners dienen (vgl. Abbildung 2).

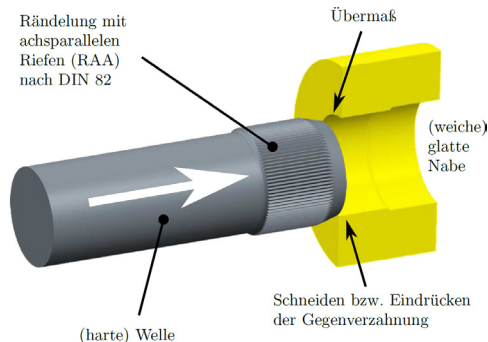


Abbildung 2: Rändelpressverbindung mit gerändelter Welle nach Mänz /3/

Auswahl von wichtigen Arbeiten zum Thema Rändelpressverbindung

Bereits im Jahr 1969 veröffentlichte THOMAS eine Dissertation zu Untersuchungen von Pressverbindungen mit unterbrochener Fuge. Hier wurden Pressverbindungen mit zusätzlichen Elementen zur Lastübertragung (als Stollen bezeichnet) in der Pressfuge untersucht. THOMAS untersuchte neben verschiedenen Werkstoffen achsparallele, schraubenförmige und ringförmige Stollenanordnungen. Weiterhin verschiedene Stollenformen wie Dreieck-, Trapez- und Rechteckstollen. In Abbildung 3 sind Dreieckstollen nach THOMAS dargestellt.

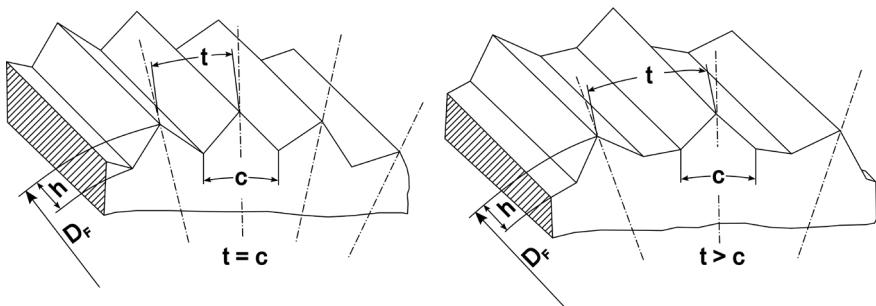


Abbildung 3: Dreieckstollen mit Teilungen t gleich der Basisbreite c (links) und größer der Basisbreite c (rechts) nach THOMAS /4/

THOMAS gibt in seiner Arbeit final Tabellen zur Bestimmung der verschiedenen Geometrie Größen bei unterschiedlichen Werkstoffen und Stollenformen an. /4/

BADER beschreibt in seiner Dissertation vorwiegend schneidende RPV. Neben umfangreichen analytischen Vorbetrachtungen zu möglichen vorhandenen Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Verbindung werden statische und dynamische Torsionsuntersuchungen an RPV durchgeführt. Die Verbindungen werden dazu aus Stahl-Wellen mit unterschiedlichen Naben aus Al-Cu-Legierungen, Cu-Zn-Legierungen, sowie Stahl-Naben gefügt. Außerdem werden Hinweise zur Ausführung von schneidend gefertigten RPV gegeben. Die Ergebnisse seiner Arbeiten stellen die Grundlage für weitere experimentelle und analytische Betrachtungen dieser Verbindungsart dar. /5/

LÄTZER untersucht in seiner Dissertation das Ein- und Auspressverhalten, sowie das Übertragungsverhalten von RPV bei statischer und dynamischer Torsion. Die dabei betrachteten Verbindungen bestehen aus Stahlwellen und Naben aus Aluminiumblech. Ziel der Untersuchungen war es, die für die Verbindung relevanten Parameter, wie etwa Rändelprofil, Wellendurchmesser, Länge der Passfuge, etc. zu untersuchen und deren Einfluss zu bestimmen. Dabei wird auch der Einfluss der Fase auf den Fügevorgang (schneidend oder umformend) beschrieben. Bei der Probenfertigung wurden verschiedene Fertigungsverfahren für die Rändelgeo-

metrie betrachtet. Für die Serienfertigung gerändelter Wellen wird das rekursive Axialumformen empfohlen.

LÄTZER stellt weiterhin ein analytisches Berechnungskonzept vor, welches für die Berechnung der Fügekraft bzw. der Fließkurve des Materials auf dem LUDWIK-Ansatz basiert. Für die Berechnung der Drehmomentübertragbarkeit wurde ein Berechnungsansatz in Anlehnung an die Berechnung von Kerbzahnverbindungen erarbeitet. Final gibt LÄTZER Auslegungshinweise für die Gestaltung von Stahl-Aluminium RPV an. /6/

In der Dissertation von MÄNZ wurden sehr umfangreiche Untersuchungen zum Fügevorgang von RPV durchgeführt. MÄNZ setzte sich dabei sowohl mit schneidend, als auch mit umformend gefügten Stahl-Stahl und Stahl-Aluminium RPV auseinander. Im Anschluss wurden umfangreiche Untersuchungen zum statischen und dynamischen Drehmoment-Übertragungsverhalten von RPV durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Versagensmechanismen ermittelt. Außerdem wurden Versuche unter kombinierter Belastung aus statischer Torsion und dynamischer Biegung, sowie zur Kaltauslagerung der Proben durchgeführt.

Final wird ein Auslegungskonzept für RPV vorgestellt. Der Berechnungsansatz für die Bestimmung der Fügekräfte beruht dabei auf Fertigungs- bzw. Umformtechnischen Ansätzen. Auf Basis des sich einstellenden Passfugendruckes wird in elastische, teil-plastische und vollplastische Deformation der Nabe unterschieden. Der jeweilige Verformungszustand geht dann in die weitere Berechnung der Drehmomentübertragbarkeit ein. Für die dynamische Übertragbarkeit wurden dazu Formzahlen berechnet. Für den Anwender werden Auslegungshinweise für RPV angegeben. /3/

Eine weitere verbreitete Anwendung von RPV ist das Umspritzen von Metallwellen mit Kunststoffen. Die Rändelung dient dabei zur Erhöhung der übertragbaren Lasten oder auch als Formschluss-Element, um eine Lastübertragung zwischen Kunststoffteil und Metallwelle zu ermöglichen. Untersuchungen zu diesem Thema sind z.B. in /7/ beschrieben (vgl. Abbildung 4).

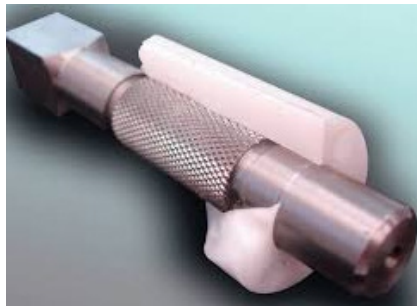


Abbildung 4: Rändelpressverbindung mit Metallwelle und Kunststoffnabe /7/

In den Untersuchungen von BADER, LÄTZER und MÄNZ sind die wichtigsten Grundlagen für die Anwendung von Rändelpressverbindungen als lastübertragende Welle-Nabe-Verbindung im allgemeinen Maschinenbau ermittelt worden. Jedoch sind weitere Untersuchungen etwa zum Fertigungseinfluss erforderlich, damit eine breitere Anwendung in der Industrie erfolgen kann. Für eine allgemeingültige Auslegungsvorschrift ist zudem eine normative Beschreibung der Verbindungsart wünschenswert.

Aktuelle Forschung

In dem aktuellen Forschungsvorhaben FVA 658 II (Aif-Nr. 20172 N/1) soll der Fertigungseinfluss auf Rändelpressverbindungen untersucht werden. Hierzu werden unterschiedliche Verfahren zur Fertigung von Rändelungen gegenübergestellt. Für eine bessere Zentrierung der Verbindungen beim Fügen und für eine Steigerung der Qualität der gefertigten Bauteile wird die Geometrie der Rändelung angepasst. Hierzu wird zunächst die Rändelung mit dem jeweiligen Fertigungsverfahren hergestellt. Anschließend werden in einem zusätzlichen Arbeitsschritt die Zahnköpfe der Rändelung abgetragen (vgl. Abbildung 5, rechts).

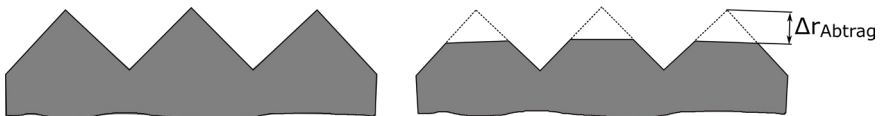


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Rändelung im Ausgangszustand (links) und mit abgetragenen Zahnköpfen (rechts)

Im Rahmen des Vorhabens sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Montage- und Zentrierverhalten der Proben geplant. Weiterhin sind Untersuchungen zur Drehmomentübertragbarkeit unter statischer und dynamischer Torsion vorgesehen. Außerdem sollen Untersuchungen zur Mehrfachverwendung und zum Verschleißverhalten der Verbindungen durchgeführt werden.

Zusammenfassung

In den vorgestellten Arbeiten wurden die wichtigsten Grundlagen von Rändelpressverbindungen erforscht. Dabei wurde sowohl der schneidende als auch der umformende Fügevorgang ausführlich untersucht. LÄTZER und MÄNZ stellen erste analytische Berechnungskonzepte vor.

Für die breitere Anwendung der Verbindung in der Praxis sind jedoch weitere vertiefte Untersuchungen zur Herstellung und Auslegung dieser Verbindungsart nötig. In einem aktuellen FVA-Forschungsprojekt wird aus diesem Grund der Fertigungseinfluss auf Rändelpressverbindungen genauer untersucht.

Literatur

- /1/ Norm DIN 82: 1973-01, *Rändel*
- /2/ Norm DIN 403: 1973-01, *Rändelräder*
- /3/ Mänz, T.: *Auslegung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle*, Technische Universität Clausthal, Diss., 2017
- /4/ Thomas, K.: *Die Presspassung mit unterbrochener Fuge*, Technische Universität Hannover, Diss., 1969
- /5/ Bader, M.: *Das Übertragungsverhalten von Pressverbänden und die daraus abgeleitete Optimierung einer formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung*, Graz, Technische Universität, Diss., 2009
- /6/ Lätzer, M.: *Füge- und Übertragungsverhalten torsionsbelasteter Stahl-Aluminium-Rändelpressverbindungen*, Technische Universität Chemnitz, Diss. 2016
- /7/ Kunz, J; Lukic, D.: *Kunststoff-Metall-Pressverbindungen* in *Kunststoffe*, Heft 12/2006, S. 68-71

Grundlagen der Rotordynamik

Losch, M.

Die Rotordynamik beschäftigt sich mit rotations-symmetrischen Bauteilen, sogenannten Rotoren. Die zentrale Aufgabe der Rotordynamik ist es, die Resonanzen und die daraus resultierenden Eigenfrequenzen der Rotoren bei deren Drehgeschwindigkeiten zu analysieren.



Rotor dynamics deals with rotationally symmetrical components, so-called rotors. The central task of rotor dynamics is to analyze the resonances and the resulting natural frequencies of the rotors at their rotational speeds.

Gleichlauf und Gegenlauf

Durch das Aufbringen einer Drehbewegung auf einen einseitig gelagerten Rotor wird dieser in Rotation versetzt. Die dadurch entstehenden Fliehkräfte bewirken, dass sich der Rotor an der nicht eingespannten Seite in seiner Längsachse biegt. Die Stärke der Biegung ist durch die Drehzahl bestimmt. Steigt die Drehzahl an, so wird sich ebenfalls die Biegung des Rotors erhöhen. Bedingt durch diese Biegung führt der Rotor neben seiner Antriebsbewegung eine zusätzliche Eigenbewegung an der nicht eingespannten Seite aus. Diese kann eine kreisförmige oder elliptische Laufbahn um die Längsachse sein.

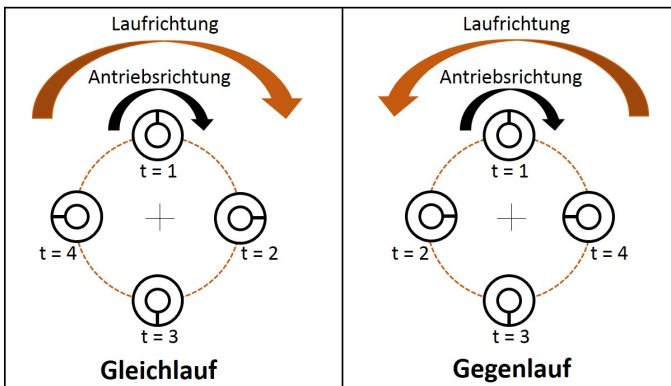


Abbildung 1: Gleich- und Gegenlauf

Es wird hier zwischen dem sogenannten Gleich- und Gegenlauf (Abbildung 1) unterschieden. Beim Gleichlauf (forward Mode) ist die Antriebsrichtung gleich der Laufbahnbewegung. Anders verhält es sich beim Gegenlauf (backward Mode). Hier ist die Antriebsrichtung entgegengesetzt zur Richtung der Laufbahnbewegung.

Kritische Drehzahl

Bei der kritischen Drehzahl handelt es sich um die Drehzahl, bei der die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz des Systems ist. Das System befindet sich daraufhin in einem Zustand der Resonanz. /1/

In diesem Zustand kann die Vibrationsantwort drastisch ansteigen und zum Aufschwingen des Rotors führen. Diese extremen Belastungen führen letztendlich zum Versagen des Bauteils, wenn das System nicht gedämpft wird.

Campbell-Diagramm

Das Campbell-Diagramm stellt die Eigenfrequenz als Funktion der Drehzahl grafisch dar. Mit Hilfe des Campbell-Diagramms (Abbildung 2) lassen sich die kritischen Drehzahlen des Systems abschätzen.

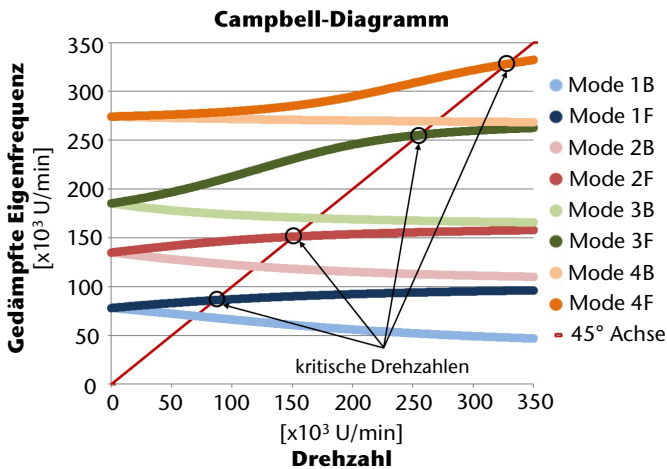


Abbildung 2: Campbell-Diagramm

Beim Stillstand des Rotors (0 U/min) kommen die Eigenfrequenzen doppelt vor. Bei steigender Drehzahl spalten sich die Eigenfrequenzen aufgrund der Kreiselwirkung in einen gleichläufigen und einen gegenläufigen Zweig auf. /2/

Im dargestellten Campbell-Diagramm sind vier Moden abgebildet. Die einzelnen Moden sind farblich unterschiedlich dargestellt. Jeder Mode besteht dabei aus dem gleichläufigen Mode, auch forward Mode genannt und dem gegenläufigen Mode (backward Mode). Der forward Mode ist hier im jeweilig dunklen Farbton markiert. Der sogenannte gyroskopische Effekt sorgt dafür, dass rotierende Systeme mit Hilfe von Kreiselkräften in einen stabilen Zustand zurückgeführt werden, wenn sie durch äußere Einflüsse in einen instabilen Zustand gelangen. In diesem Fall führt der gyroskopische Versteifungseffekt dazu, dass die Eigenfrequenz bei steigender Drehzahl zunimmt /3/. Der gegenläufige Mode (backward Mode) wird hier entsprechend im hellen Farbton dargestellt. Hierbei führt der gyroskopische Entfestigungseffekt, bei Steigen der Drehzahl, zur Abnahme der Eigenfrequenz /3/. Die Laufrichtung wird durch Großbuchstaben gekennzeichnet. Das „B“ bezeichnet den backward Mode und das „F“ steht für den forward Mode. Beide Mode-Anteile starten beim Stillstand des Rotors, sodass sie sich in diesem Punkt überlagern und somit die doppelte Eigenfrequenz erzeugen. Durch das Steigern der Drehzahl gehen beide Anteile, durch den gyroskopischen Effekt, weiter auseinander.

Die Winkelhalbierende (45°-Achse) stellt die drehzahlsynchrone Anregung der Unwucht dar. Der Schnittpunkt zwischen dieser und den gleichläufigen Eigenfrequenzkurven ergibt theoretisch die kritischen Drehzahlen, an denen eine drehzahlsynchrone (nichtlineare) Resonanz auftritt. Diese sind in der Abbildung durch Kreise markiert. Bei linearen rotationssymmetrischen Rotoren führen die gleichläufigen Moden zu einer Resonanz mit Unwuchterregung. Resonanzen mit Gegenlaufschwingungen werden als Scheinresonanz bezeichnet, da diese in der Realität nicht auftreten. /2/

Neben den eindeutig zuzuordnenden forward und backward Moden, gibt es noch gemischte Moden, sogenannte mixed Modes. Diese weisen Anteile von gleich- sowie gegenläufigen Moden auf. Sie entstehen entweder, wenn sich Anteile von Moden kreuzen und somit ein Sprung entsteht, oder wenn Mode-anteile die Laufrichtung wechseln.

Stabilitäts-Diagramm

Das Stabilitätsdiagramm gibt Aufschluss darüber ab welcher Drehzahl sich das System in der Instabilität befindet. Hierfür wird die Drehzahl auf der Abszisse aufgetragen. Auf der Ordinate befindet sich das logarithmische Dekrement (Maß für das Dämpfungsverhalten). Sobald ein Mode in den Bereich des negativen logarithmischen Dekrements kommt, gilt das System als instabil. Bei dem untersuchten System, dargestellt in Abbildung 3, kann bei Mode 3 ab 150.000 U/min von instabilem Verhalten ausgegangen werden.

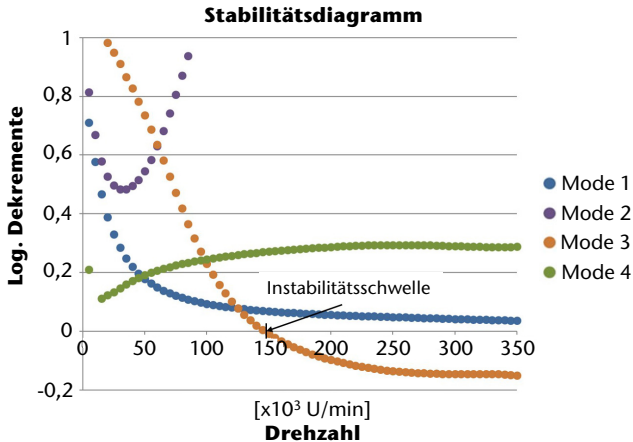


Abbildung 3: Stabilitätsdiagramm

Die Drehzahl, bei der ein Mode in den negativen Bereich eintritt, wird als Instabilitätsschwelle bezeichnet. Bei Geschwindigkeiten oberhalb dieser Schwelle tritt eine selbsterregte Instabilität auf. Überschreitet ein Mode den logarithmischen Dekrementwert von eins, so gilt dieser als gut gedämpft. /3/

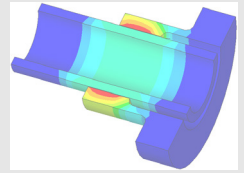
Zusammenfassung

Die Rotordynamik bietet heutzutage eine kostengünstige Alternative, um die Anzahl von Prototypen zu reduzieren. Bereits in frühen Entwicklungsphasen können Eigenschaften und das Verhalten des Prüflings anhand von Simulationen überprüft werden, ohne dass bis zu diesem Zeitpunkt kostenintensive Bauteilprüfungen durchgeführt werden müssen. Anhand dieser Simulationen können unter anderem die kritischen Drehzahlen, sowie die Stabilität des Systems ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Daten lässt sich das Verhalten des Prüflings beim Hochfahren, sowie im Betrieb nachbilden. Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich die Geometrie des Prüflings optimal an seine geforderten Aufgaben anpassen.

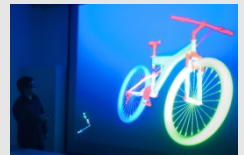
Literatur

- /1/ John M. Vance, Brian Murphy und Fouad Zeidan. Machinery vibration and rotordynamics. Hoboken, N.J: Wiley, 2010. ISBN: 978-0-471-46213-2.
- /2/ Aydin Boyaci. Zum Stabilitäts- und Bifurkationsverhalten hochtouriger Rotoren in Gleitlagern. KIT Scientific Publishing, 2012. ISBN: 978-3-86644-780-6.
- /3/ Dyrobes. Dyrobes Help. 2018

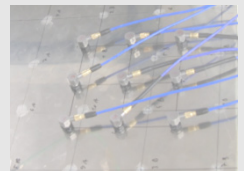
Konstruktion und Berechnung von
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte



Konstruktionsunterstützung mit der Simulationssoftware ROCKY DEM für Partikelprozesse, Haufwerkentzerrung und Schüttgutprozesse



Wallat, P.

Durch vorherige Simulation von Prozessabläufen können Ergebnisse erarbeitet werden, die sich auf die Realität übertragen lassen (vgl. /1/). Die Simulation von verschiedenen Problemstellungen bei Konstruktionsaufgaben unterstützt die Lösungsfindung und kann zu einer gesteigerten Qualität des Endproduktes führen.

By using simulation technics it is possible to generate value adding data for the design process. If this data is gathered early in the process then a higher quality of the final product is more likely.

Hintergrund in der Konstruktion

Im Produktentstehungsprozess (PEP) werden verschiedene Schritte sequenziell und iterativ abgearbeitet. Dabei werden Lösungen und deren Kombinationen gesucht, um ein vorliegendes Problem zu lösen.

Eine Bewertung der vorliegenden Lösungen ist notwendig, um geeignete Lösungen weiter zu verfolgen und ungeeignete Lösungen zu verwerfen. Damit können die Ressourcen im PEP gezielt eingesetzt werden, um den Prozess voranzutreiben. (vgl. /2/, /3/)

Die Partikelgeometrie ist sowohl in Fertigungsprozessen als auch in Recyclingprozessen ausschlaggebend für die Verarbeitung des Materialstromes. Dieser muss mit verschiedenen Verfahren behandelt werden, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten oder das geforderte Material zu extrahieren.

Lösungsbewertung im Entwicklungsprozess

Die Bewertung der erarbeiteten Lösungen ist essentiell, um den Entwicklungsprozess voranzubringen. Ein bekanntes Beispiel für die Bewertung ist das Abtragen der Lösungen in einem Diagramm mit der technischen und wirtschaft-

lichen Wertigkeit. Dabei wird die technische Lösung gleich in einen Kontext zur Betriebswirtschaft gestellt.

In Abbildung 1 sind vier Beispiele in einem Bewertungsdiagramm zu erkennen. Die abgetragene Winkelhalbierende wird als Entwicklungslinie beschreiben. Lösungen auf dieser Linie haben die gleiche Wertigkeit im technischen und im wirtschaftlichen Bereich. Dies gilt in vielen Fällen als erstrebenswert, Abweichungen von der Entwicklungslinie können im Einzelfall auch eine bessere Lösung darstellen. (vgl. /3/)

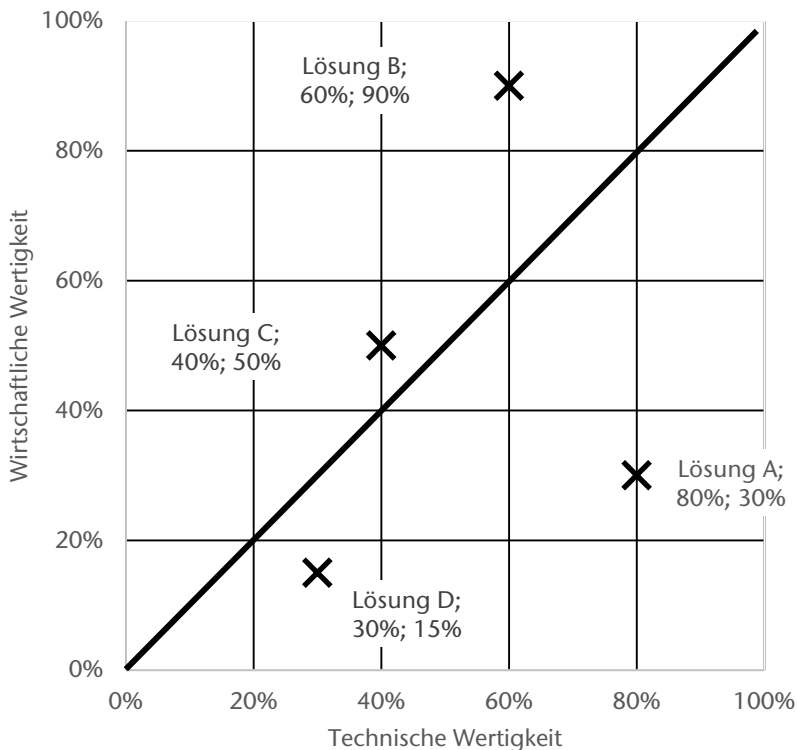


Abbildung 1: Wirtschaftliche und technische Wertigkeit von Lösungen

Bei der Bewertung von Modulen für eine ganze Anlage ist eine Abschätzung der Einzelkomponenten und deren Kompatibilität untereinander für die Funktion entscheidend. Die Leistungsfähigkeit der Komponenten wird dabei als technische Wertigkeit betrachtet. Mit zunehmender Komplexität der Komponenten nimmt die Berechenbarkeit des Systemverhaltens ab. Somit ist auch eine Bestimmung der technischen Wertigkeit immer anspruchsvoller. Gerade bei der Handhabung von Materialströmen von geometrisch nicht näher bestimmten Objekten kann

pauschal keine fundierte Aussage getroffen werden. Zwar kann eine subjektive Rangreihung der Lösung erstellt werden, allerdings spiegelt diese nicht die Güte der Lösungen wieder.

Partikeleigenschaften im Prozess

Bei einer automatisierten Fertigung in hoher Stückzahl werden Einzelteile so konstruiert, dass diese handhabungsgerecht sind /4/. Eine Grundbedingung dafür ist die Beeinflussbarkeit der Einzelteilgeometrie. Diese ist bei der Behandlung von Schüttgütern nicht gegeben.



Abbildung 2: Digitales Beispielpartikel aus einem Recyclingprozesses

Schüttgüter können Erze aus einer Mine oder – wie in diesem Fall genauer betrachtet – Materialströme im Recyclingprozess sein. Diese durchlaufen für eine Aufbereitung etablierten Prozessen Klassier- und Sortierverfahren, um den Materialstrom für eine Aufbereitung handhaben zu können. Er wird nach bestimmten Kriterien aufgeteilt und es entstehen weitere, kleinere Materialströme die beispielsweise eine ähnliche Partikelgröße haben. Damit wird der Materialstrom soweit heruntergebrochen, bis er handhabbar ist. Danach werden die Materialien nach Werkstoff und Typ getrennt und können so als Sekundärmaterial aus einem Recyclingprozess wieder an den Markt gebracht werden. (vgl. /5/)

Der Aufbereitungsprozess und die Software ROCKY DEM

Die Materialströme in Aufbereitungsprozessen sind in ihrer Ausprägung sehr ungleichmäßig. Um die enthaltenen Materialien in der gewünschten Qualität extrahieren zu können, ist in vielen Fällen maschinelle Unterstützung notwendig. Sei es bei einem Aufschluss am Anfang des Prozesses oder beim letzten Prozessschritt bei dem das gewünschte Material hervorgebracht wird.

Für jeden Schritt in diesem Prozess lässt sich eine Vielzahl von Lösungen finden. Diese im Vorfeld zuverlässig zu bewerten fällt angesichts der Zufallsvariablen im Prozess entsprechend schwer. Wie bereits oben angesprochen, ist eine Rangreihung durchaus möglich. Die Reihung beruht dann im Wesentlichen auf Erfahrungswerten des Entwicklungsingenieurs.

Die Software ROCKY DEM von ESSS

Grundsätzlich ist es mit dem Programm möglich, definierte Partikel über Konfigurationen von CAD Geometrien zu leiten. Anschließend kann das Verhalten der Partikel ausgewertet werden. Das DEM-Verfahren (Diskrete-Elemente-Methode) wird dabei angewandt. Damit sind die Partikel als geometrisch diskretisierte Objekte definiert.

Bei der Partikelgeometrie können Vorlagen in ihren Parametern variiert werden. In den Vorlagen sind runde, aber auch kantige Partikel vorhanden. Durch die Parametervariation lassen sich diese auf verschiedene Arten anpassen, beispielsweise die Dichte. Es können mehrere verschiedene Partikel in einer Simulation definiert werden. Zusätzlich lassen sich gleich definierte Partikel über Siebklassierungen in verschiedenen Größen in den Prozess einbringen. Das Verhalten der Partikel zu gleichen oder anderen Partikeln lässt sich ebenso definieren, wie das zu anderen Gegenständen im Prozess. So können Reibwerte definiert werden, damit sich die Partikel auf verschiedenen Oberflächen entsprechend verhalten. Für Aufschlussprozesse ist es möglich ein Zerbrechen der Partikel zuzulassen. Dadurch werden neben den Partikeln auch Fragmente erzeugt.

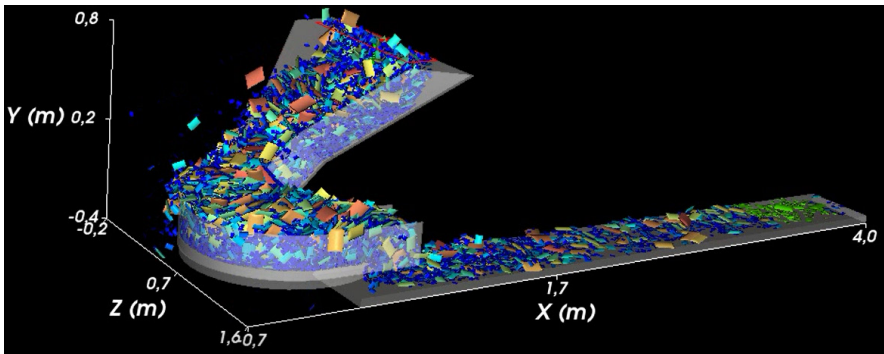


Abbildung 3: Simulation in ROCKY DEM mit einer großen Anzahl von Partikeln. Die grünen Partikel rechts befinden sich im Auswertebereich. Weitere Farbgebung sind abhängig von der Partikelgröße

Die Simulationssoftware ermöglicht das Einladen von CAD Geometrien im STL-Format (Standard Triangulation Language). Ebenso ist das Einladen von Zusammenbauzeichnungen bei gleichzeitiger Erkennung der einzelnen Teile möglich. Die Anzahl der STL-Facetten auf den Geometrien beeinflusst die Rechen-dauer der Simulation. Sollten schnelle, grobe Ergebnisse gefordert sein, so sollte gleichzeitig die Anzahl der Facetten gering sein.

Die geladenen Geometrien können im Programm bewegt werden. Diese Bewegungen üben Kräfte auf die Objekte aus, mit denen Sie in Kontakt kommen. Ebenso können zur Vereinfachung Oberflächen als „sich bewegend“ definiert werden. Dies spart beispielsweise bei der Definition von Fließbändern eine Menge Aufwand, da hier lediglich eine ebene Fläche als sich bewegend definiert werden muss. Kombinationen von Bewegungen, die Geschwindigkeit sowie der Start und Endzeitpunkt können frei definiert werden.

Für eine spätere Auslegung der Bauteile können die Ergebnisse aus ROCKY an Ansys übergeben werden. Ansys kann die Beanspruchungen der Bauteile durch FEM (Finite-Elemente-Methode) ermitteln. Die Belastung der Bauteil ergibt sich aus der Simulation in ROCKY. Für einen hohen Detailgrad muss hierbei wiederum die Anzahl der STL-Facetten möglichst hoch sein.

Zur Auswertung kann eine Vielzahl von Variablen herangezogen werden. Für eine Vergleichbarkeit der Lösungsansätze muss hier eine einheitliche Auswertung definiert werden. Die Vielzahl der möglichen Variablen muss dabei mit Vorsicht betrachtet werden, da es allzu schnell zu einer unüberschaubaren Überfrachtung kommen kann. Eine überlegte Auswahl der Variablen führt hingegen zu guten Erkenntnissen über den Prozess. Auswertbare Parameter für Partikel sind beispielsweise: Geschwindigkeit, Ort, Auftreffenergie, Rotation um alle Achsen. Weiterhin kann ein Bereich für die Auswertung definiert werden. Hier können unter anderem die Anzahl der ein- und austretenden Partikel und die Gesamtmasse der Partikel im Bereich ausgewertet werden.

Diese Daten können in einem Diagramm gegeneinander abgetragen werden. Die Datenpunkte sind in den vorher definierten Zeitintervallen ebenfalls in einer Tabelle hinterlegt. Diese Daten können direkt mit Formel ausgewertet werden oder durch Exportieren in anderen Programmen weiter untersucht werden.

Einbindung in den Entwicklungsprozess

Durch die Simulation kann die Leistungsfähigkeit der Prinziplösungen nicht nur subjektiv abgeschätzt werden, sondern auch qualitativ voneinander abgegrenzt werden. Durch hochwertige Bewertung kann schon früh im Entwicklungsprozess eine fundierte Aussage zu der Qualität der Lösung getroffen werden, welche belastbar ist. Dies macht die Lösungen soweit vergleichbar, dass weniger gute Ansätze nicht weiterverfolgt werden. Für die besseren Lösungen müssen aber zur Verifikation reale Versuche durchgeführt werden.

Bei automatisierten Prozessen werden häufig Stationen aneinandergereiht. Folglich ist eine Verkettung notwendig. Durch die Simulation kann dieses Systemverhalten untersucht werden. Die Einzelstationen können einzeln ausgewertet werden und anschließend kombinierte Gesamtsysteme aufgestellt und überprüft werden. Dabei können entweder Schnittstellen für die Material-

übergabe definiert werden oder gleich die ganze Anlage simuliert werden. Es sollte jeweils die gesteigerte Rechenzeit beachtet werden.

Die erweiterten Möglichkeiten zur Lösungsuntersuchung bringen demnach viele wertvolle Möglichkeiten in den Entwicklungsprozess ein. Allerdings bleibt dabei zu beachten, dass dies mit einem Mehraufwand verbunden ist. Je nach Komplexität der zu erstellenden Geometrie und Lösungsvielfalt, verbunden mit der Rechenzeit, kann dies einiges an Zeit und anderen Ressourcen in Anspruch nehmen.

Zusammenfassung

Die Produktentwicklung kann ohne Entscheidungen nicht voranschreiten. Einer Entscheidung liegen Bewertungen zugrunde, wobei diese mit steigender Komplexität immer schwerer festzulegen sind. Durch Simulation in verschiedenen Bereichen kann die Entscheidungsfindung unterstützt werden. Bei einer Anlagenkonstruktion zur Handhabung von Schüttgütern kann das Programm ROCKY DEM einen Beitrag dazu leisten. Allerdings ist zu beachten, dass diese Simulationen nicht die Realität widerspiegeln. Die Ergebnisse aus der Simulation sind aufgrund der eingegebenen Parametern entstanden. Diese vorher festzulegen obliegt der Verantwortung des Entwicklungsingenieurs. Sind diese sorgfältig erarbeitet, leistet die Simulation einen wertvollen Beitrag zur Konstruktion.

Literatur

- /1/ VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, Beuth Verlag, Dezember 2014
- /2/ VDI Norm VDI 2221; Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*
- /3/ Feldhusen, J. u. Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013
- /4/ Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag 2013
- /5/ Martens, H. u. Goldmann, D.: Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016

Engineering Design for a Circular Economy – Produktgestaltung für eine Kreislaufwirtschaft: ein internationaler Onlinekurs

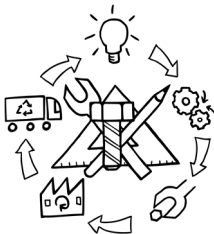
Prumbohm, M.; Wallat, P.

Unter Leitung des IMW wurden in Zusammenarbeit mit namhafter Experten von europäischen Universitäten und Institutionen erstmals Gestaltungsregeln für die Anwendung in Geschäftsmodellen für eine Kreislaufwirtschaft eingeordnet und in Zusammenhang mit diesen gestellt. Beispiele aus der Praxis und die Prüfung hinsichtlich der globalen „Resource Challenge“ runden die Arbeit ab, die in Form eines Onlinekurses weltweit für Interessierte unter www.edx.org/course/engineering-design-for-a-circular-economy verfügbar ist.

Under the direction of the IMW and in cooperation with renowned experts from European universities and institutions, design rules for the application in business models for a circular-flow economy were for the first time classified and placed in connection with these. Examples from the practice and the examination regarding the global resource Challenge round the work off, which is available in form of an on-line course world-wide for interested ones under www.edx.org/course/engineering-design-for-a-circular-economy



Hintergrund Kreislaufwirtschaft



Die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft, im englischen Circular Economy, kurz CE, genannt, rückt bei immer mehr Menschen, Organisationen und inzwischen auch Regierungen in den Fokus. So hat sich die britische Ellen MacArthur-Foundation die Entwicklung einer solchen auf die Fahnen geschrieben /2/ und die niederländische Regierung hat den Plan, bis 2050 die Wirtschaft des Landes vollständig in Kreisläufe umzuwandeln /3/.

Stichworte wie Rohstoffknappheit, zunehmendes Umweltbewusstsein, Sharing Economy, Urban mining, usw. hängen mit der Motivation die eigentlich schon viele Jahre /4/ alte Idee der Kreislaufwirtschaft umzusetzen, zusammen. Hinter dem Begriff steht die Idee, weg von einem linearen Verlauf des Wirtschaftens mit

dem Abbau immer neuer Ressourcen zum Herstellen von Produkten und dem Verlust dieser Ressourcen am Ende des Produktlebenszyklus. Auch die Wiederverwertung von Stoffen mit hoher Verlustrate zählt zu dieser Art des Wirtschaftens. Eine Kreislaufwirtschaft bzw. die Idee einer „Circular Economy“ (CE) zielt hingegen auf vollständig geschlossene Kreisläufe ab. Eine solche Entwicklung benötigt im Kern andere Wirtschaftsmodelle, um Umsatz und Wachstum zu generieren.

Wertschätzung der Wertschöpfung

So gehört zu einer Kreislaufwirtschaft bzw. CE ein möglichst langer Produktlebenszyklus, der durch Wiederverwendung (Reuse), Reparaturen (Repair) und Aufbereitung (Remanufacturing) geprägt ist. Einer einmal geschaffenen Wertschöpfung kommt damit eine deutliche höhere Wertschätzung entgegen, als in klassischen Modellen. Schlussendlich kommen aber alle Produkte einmal an das Ende des Lebenszyklus und müssen mit möglichst geringen Verlusten stofflich mittels Recycling wiederverwertet werden. So wenig wie möglich soll den Kreislauf verlassen. Für diese Wirtschaftsmodelle, die sich verschiedenen Formen in den letzten Jahren bereits begonnen haben, zu entwickeln, verschiebt sich entsprechend auch der Fokus der Produktentwicklung. So ist der Begriff der Recyclinggerechten Konstruktion schon lange Bestandteil der Literatur, rückt in der Praxis jedoch meist in den Hintergrund. Im Zusammenhang mit Entwicklungen für eine CE eröffnen sich neue, umfassendere Ausrichtungen, als lediglich „recyclinggerecht“. Im englischen Sprachgebrauch wird dies bereits mit den Begriffen des „Design for R“ bzw. „Design for a CE“ bezeichnet und schließt dabei Reuse, Repair, Remanufacturing und Recycling mit ein.



Universiteit
Leiden

swerea
swedish research

TU Delft Delft
University of
Technology

Abbildung 1: Logos der Partner im Projekt zum Erstellen eines MOOC zum Thema "Engineering Design for a Circular Economy"

Hintergrund MOOC

Im vergangenen Jahr hat das IMW gemeinsam mit ausgewiesenen Experten auf dem Feld der CE-Forschung aus den Niederlanden (TU Delft und Univ. Leiden) und Schweden (Forschungsinstitut Swerea) einen Online-Lernkurs erarbeitet. Die Wahl fiel auf ein Massive-Open-Online-Course, kurz MOOC. Diese Art von Lehrveranstaltung wird seit einigen Jahren überwiegend an englischsprachigen Universitäten angeboten. Es gibt dabei verschiedene Anbieterplattformen, die neue Kurse prüfen, einer großen Personenzahl überall auf dem Globus via Email

anbieten und online jedermann zugänglich machen. Neben Coursera ist EdX einer der größten Plattformen, beide stammen aus den USA. Der vorgestellte Kurs wird im Portfolio der TU Delft auf der Plattform EdX angeboten. Die Kurse lassen sich als digitale Vorlesungen beschreiben, der Lernstoff wird aufbereitet mit Videos und kurzen Skripteinheiten präsentiert. Die Diskussion mit Lehrenden und anderen Teilnehmern ist über ein fest implementiertes Forum ausdrücklich erwünscht. Es müssen Aufgaben erledigt und gelöst werden, wenn man ein Zertifikat für die Teilnahme erhalten möchte. Dieses ist kostenpflichtig, die Teilnahme davon abgesehen in vollem Umfang und kostenfrei möglich.

Kernelemente einer CE – Zielsetzungen des Kurses

Einer der Hauptaufgaben des MOOCs besteht darin, die Vielzahl der bestehenden Gestaltungsrichtlinien mit Blick auf eine CE zu strukturieren und dem Konstrukteur eine Art roten Faden für die Produktentwicklung in einer Kreislaufwirtschaft zu geben. Entsprechend werden bekannte Gestaltungsrichtlinien auf ihre Tauglichkeit für die verschiedenen R-Richtungen (Reuse, Repair, Reman. und Recycling) hin untersucht. Diese erste Gliederung bildet zugleich den Rahmen für den Aufbau des Kurses.



Abbildung 2: Blick in das Studio des New Media Center der TU Delft

Dieser gliedert sich in sechs Wocheneinheiten und beginnt mit einer Einführungswoche zur Beschreibung der Kursziele und einer kurzen Einführung in die Begrifflichkeiten und Bedeutung einer CE. Es folgen vier Themenwochen, in denen die vier R: Reuse, Repair, Remanufacturing und Recycling erläutert werden, mit geeigneten Gestaltungsrichtlinien verknüpft werden. Mögliche Umsetzungen dieser und entsprechende Businessmodels die geeignet für eine CE sind, werden in jeder dieser Wochen anschließend in Form von Case Studies präsentiert. Es folgt eine Auswertung der Bedeutung der einzelnen Rs hinsichtlich der „resource challenge“ – also der rohstofflichen Bedeutung. In der Abschlusswoche werden

die vorangegangenen Themen zusammengebracht und im Zusammenhang bewertet und ein Ausblick gewagt.

Case studies - Fallbeispiele

Basis einer CE sind Wirtschaftsmodelle, die von geschlossenen Kreisläufen profitieren. Um dem Leitsatz „Wertschöpfung wertschätzen“ zu folgen, muss es beispielsweise für Unternehmen lohnenswert sein, das Produkt während des gesamten Lebenszyklus zu besitzen und dessen Erhaltung anzustreben. In einem solchen Modell hat das Unternehmen im Idealfall ein natürliches Interesse an einem oder allen der folgenden Punkten: der Haltbarkeit, (für das Unternehmen) einfache Instandhaltung und Wartung, eine Möglichkeit zur Aufbereitung nach langem Gebrauch und eine möglichst großen stofflichen Verwertbarkeit zur Rückführung in die eigene Produktion. Entsprechend gewinnt ein „Design for a CE“ im Konstruktionsprozess wesentlich an Bedeutung. Bei der Frage nach günstigen Gestaltungsregeln stößt man, wie überall in der Konstruktionslehre üblich, auf stark fallbezogene Antworten und Restriktionen. Die Regeln sind nicht „blind“ auf einzelne Konstruktionen anwendbar, ebenso wie die Gliederung keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben kann. Über die Zuordnung der einzelnen Regeln zu den einzelnen R-Ausrichtungen lässt sich und sollte auch in jedem Einzelfall diskutiert werden.

Tabelle 1: Zuordnung wesentlicher Gestaltungsregeln zu den einzelnen R-Ausrichtungen für ein „Design for a CE“, weitere Gestaltungsregeln sind im Kurs zu finden

<u>Demand upon the design</u>	<u>Reuse</u>	<u>Repair</u>	<u>Reman.</u>	<u>Recycling (Shred.)</u>	<u>Recycling (manual)</u>
Durable Design	x				
Modular structure	x	x	x		
Easy to disassemble		x	x		x
Documentation		x			
Wear indication		x	x		
cleaning			x		
Choice of materials				x	x

Speziell auf dieses zukunftsweisende Thema ist bisher jedoch, besonders im deutschen Sprachgebrauch, noch kein solcher Versuch bekannt, die bestehenden Gestaltungsregeln hinsichtlich einer CE einzuordnen.

Als Ergebnis der gemeinsamen Arbeit werden im MOOC für die einzelnen R-Maßnahmen eine Reihe von Case studies, also Fallbeispielen aus Industrie und

Wirtschaft vorgestellt. Die vier Ausrichtungen lassen sich hinsichtlich der Gestaltung und auch in ihrer Definition nicht immer klar voneinander abgrenzen. Anforderungen wie Gestaltungsregeln, die gut für ein „Reuse“ sind, können auch gut für „Repair“ oder ein „Remanufacturing“ sein.

Design for Reuse



Das „Design for Reuse“ zielt auf haltbare Konstruktionen ab, die möglichst lange im Gebrauch sind und für die vorgesehene Nutzung nach Möglichkeit dauerhaft ausgelegt sind. Das lineare Gegenmodell besteht aus der bewussten Obsoleszenz, also dem Unbrauchbarmachen und Ersetzen noch intakter Produkte. Die Möglichkeit zum Austausch von Teilen bildet den Übergang zum „Design for Repair“ und „Design for Remanufacturing“. Dazu zählen beispielsweise Verbrauchs- bzw. Verschleißteile, aber auch ein einfacher Tausch von Batterien und auch die Möglichkeit von „Upgrades“ durch den Kunden. Damit ist der Austausch bestimmter Komponenten, wie zum Beispiel der Hülle, bilden den Übergang zum „Design for Repair“ und „Design for Remanufacturing“. Zwischen „Design for Reuse“ und „Design for Repair“ besteht dabei ein besonders enger Zusammenhang. Als Wirtschaftsmodelle kommen besonders Sharing- oder Leasingmodelle in Frage, die damit eine Basis für CE-Modelle stellen. Der Unterschied zwischen diesen beiden ist der Verbleib des Produktes beim Kunden. Sharing meint das Teilen der Dinge zwischen verschiedenen Nutzen. Das Leasing-Modell meint den Verbleib bei einem Kunden für eine bestimmte Nutzungsdauer. Bei beiden bleibt das Produkt im Besitz des Herstellers, der während einer langen Lebensdauer von den Miet- bzw. Leasingbeiträgen profitiert.

Als Beispiele werden im MOOC zwei Beispiele aus der Praxis exemplarisch präsentiert:

- Green Village Delft : Reuse of building parts. Gebäude und deren Teile werden für die Möglichkeit des Abbaus und Wiederaufbaus an anderer Stelle speziell entworfen.
- OV Fiets: Bike sharing in den Niederlanden mit speziell konstruierten Fahrrädern



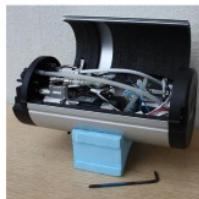
Design for Repair



Je nach Auslegung kann ein „Design for Repair“ Bestandteil der Reuse-Ausrichtung sein, die Wirtschaftsmodelle sind für beide Ausrichtungen identisch. Wesentlich ist die Aufteilung der Geschäftsmodelle in ein „Repair by companies“ und ein „Repair by customers“, ein zunehmend wachsender Markt. Konstruktiv geht es vor allem darum, beschädigte Bestandteile einfach und kostengünstig austauschen zu können. In Zusammenhang mit Wirtschaftsmodellen und der Industrie 4.0 bekommt der Begriff einer „Predictive Maintenance“ eine besondere Bedeutung für die Umsetzung einer CE. Dabei bietet der Hersteller beispielsweise im Rahmen des Leasingvertrages den Austausch von verschlissenen oder beschädigten Teilen an, über deren Zustand er per Fernüberwachung informiert ist. Der Hersteller profitiert von einer, klassisch „instandhaltungsgerechten Konstruktion“ genannten Gestaltung der Produkte, indem der Kundendienst wenig Zeit zum Austausch benötigt oder sogar vom Kunden selbst, beispielsweise durch den einfachen Tausch von Modulen, erfolgen kann. Die Instandhaltung durch den Kunden selbst ist eine zunehmend wachsende Entwicklung, bei der der einfache Produktaufbau, die einfache Montage- und Demontagemöglichkeit sowie verständliche Produkt-dokumentationen und –anleitungen gefordert sind.

Als Beispiele werden im MOOC einige Beispiele aus der Praxis exemplarisch präsentiert:

- 3Temp Coffeemachines aus Schweden.
Kaffeemaschinen, die speziell für den gastronomischen Einsatz mit einem Predictive-Maintenance-Ansatz entworfen sind. Die wesentlichen Bestandteile wie die Brühgruppen lassen sich einfach demontieren, öffnen und reparieren. Der Ersatzteilversand erfolgt frühzeitig, im Idealfall bevor es zu einem Ausfall der Maschine kommt.

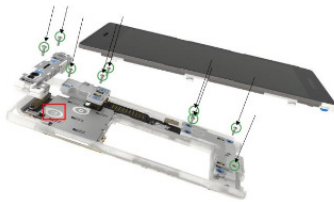


Main Guidelines for a Design for Repair:

- ✓ **Non-destructive Disassembling:**
Opening one tool
Only a few screws
- ✓ Easy access to functional modules
- ✓ **Modules that are easy to replace**
- ✓ **Documentation:**
Pictograms on the modules
- ✗ **No wear indication** (only for moving parts possible)

Abbildung 3: Kaffeemaschine gemäß der wesentlichen Anforderungen an ein „Design for Repair“. Die Anmerkungen rechts entstammen der Zusammenarbeit der Projektpartner, mit dem Ergebnis einer Guidelinelist. Diese ist im MOOC vollständig einsehbar /5/

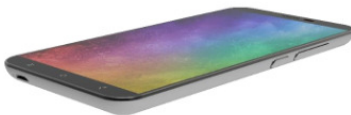
- Fairphone entworfen in den Niederlanden
 Ein modulares Smartphone, deren Bestandteile vom Kunden in wenigen Sekunden demontier- und austauschbar sind. Durch den Aufbau, die lange Lebensdauer und dem Unternehmensmodell des Absatzes von Ersatzteilen gilt das Produkt als Paradebeispiel eines „Design for a CE“. Es ist eindeutig ein „Design for Repair by customers“, wobei das Herstellerunternehmen davon profitiert.



Picture 1: A Fairphone in an exploded view [Source: Fairphone]

Main Guidelines for a Design for Repair:

- ✓ **Non-destructive Disassembling:**
 Opening without tools
 One sort, and size of screws
 One mounting direction
- ✓ **Modules that are easy to replace**
- ✓ **Documentation:**
 Pictograms on the modules
- ✗ **No wear indication** (only for moving parts possible)



Picture 1: A classical designed smartphone – Repair is possible but difficult and often not economically [Source: TU Clausthal based on <https://grabcad.com/library/concept-smartphone-2>]

Main Guidelines for a Design for Repair:

- ✗ **Non-destructive Disassembling:**
 Often special tools are needed, often glue, special screws, rivets..
- ✗ **Modules** are often covered, glued or very fragile to disassemble
- ✗ **Documentation:**
 No repair instructions
- ✗ **No wear indication** (only for moving parts possible)

Abbildung 4: *Eigenschaften des Fairphones im Vergleich mit herkömmlichen Smartphones eines beliebigen Herstellers.*

Design for Remanufacturing



Im Lauf eines Produktlebens kommt es naturgemäß zu Verschleiß, Abnutzung oder auch zu einem Absinken des Wirkungsgrades. Um funktionierende und langlebige Bestandteile systematisch von den auszutauschenden Teilen zu trennen und das Produkt mit neuen Bestandteilen aufzuwerten, kommt ein Remanufacturing bzw. Refurbishing in Frage. Dabei werden die Produkte vollständig zerlegt, nach Zustand sortiert, gereinigt, aufbereitet und mit neuen Bestandteilen wieder zusammengesetzt. Hier kommt unter anderem eine Demontagegerechte Gestaltung zum Tragen.

Als Beispiele werden im MOOC einige Beispiele aus der Praxis exemplarisch präsentiert:

- Volvo Remanufacturing
Aufbereitung von Motoren in den Werken von Volvo.
- Svelitus: Aufbereitung von elektrischen und elektronischen Altprodukten aus dem skandinavischen Raum im Baltikum und Verkauf der aufbereiteten Ware für den osteuropäischen Raum.

Design for Recycling



Auch unter Berücksichtigung aller R-Ausrichtungen zur Verlängerung des Produktlebenszyklus, kommt jedes Produkt früher oder später an das Ende des Produktlebens. Um die verbauten Materialien und Wertstoffe zurück in den Kreislauf zu bringen, bedient man sich verschiedener Recyclingprozesse. Diese stellen das letzte Mittel zum Erhalt der einmal geschaffenen Wertschöpfung dar und unterliegen in der Regel einem Materialverlust. Aus Sicht des Konstrukteurs ist für ein „Design for Recycling“ die Materialauswahl ausschlaggebend, wenn man von einer vollständigen Zerkleinerung des Produktes ausgeht, die für die weiteren Recyclingprozesse häufig unerlässlich sind.

Als Beispiele werden im MOOC einige Beispiele aus der Praxis exemplarisch präsentiert:

- Kickpack aus Braunschweig: Kickertisch aus Pappe und Holz, der vollständig im Altpapier entsorgt und stofflich wiederverwertbar ist.
- 3D-gedruckte Brillen der Fa. Projekt Samsen aus Berlin: voll funktionale Brillengestelle aus einem additiv gefertigten Werkstoff, der im Kunststoffrecycling einfach wiederverwertbar ist.



/6/



/7/

Zusammenfassung

Im Rahmen eines offenen Online-Kurses (MOOC) wurde unter der Leitung des IMW das Thema der Produktgestaltung für Wirtschaftsmodelle einer Kreislaufwirtschaft erstmals hinsichtlich der Gestaltungsrichtlinien und praktischer Umsetzungen strukturiert. Der Kurs ist über eine Internetplattform frei verfügbar und hat im ersten Durchgang im Jahr 2018 über 2000 Menschen weltweit erreicht.

Many thanks and special greetings to our european colleagues!



Abbildung 5: *After work is done in the New Media Center, TU Delft. From left: Sylvia Marinova (Leiden); Juan Azcarate-Aguerre (Delft), Max Prumbohm (IMW), David Peck (Delft), Phillip Wallat (IMW), Ester van der Voet (Leiden), Anna-Karin Jönbrink (Swerea), Armin Lohrengel (IMW). Hans-Lennart Norbloom (Swerea) is missing on the picture.*

Many thanks to our project sponsor!



EIT RawMaterials is supported by the EIT, a body of the European Union

Besonderer Dank gilt Frau Katharina Sophia Ungermann für Ihre Unterstützung und die tollen Zeichnungen!

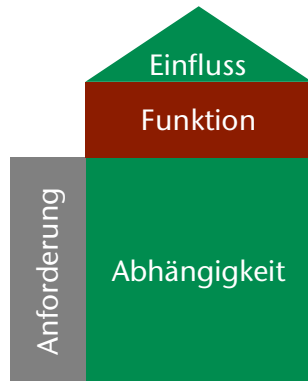
Literatur

- /1/ <https://www.edx.org/school/delftx>; abgerufen 11/2018
- /2/ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>; abgerufen 11/2018
- /3/ <https://www.government.nl/documents/policy-notes/2016/09/14/a-circular-economy-in-the-netherlands-by-2050>; abgerufen 11/2018
- /4/ Nickel, W. (Hrsg.): Recyclin-Handbuch – Strategien, Technologien, Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996
- /5/ https://www.instagram.com/p/BENwQepvJXU/?hl=nl&taken-by=ns_online; abgerufen 11/2018
- /6/ <http://3temp.com/product/hipster-brewer-2group/> abgerufen; 11/2018
- /7/ <http://www.kickpack.de/>; abgerufen 11/2018
- /8/ <http://www.projekt-samsen.de/>; abgerufen 11/2018

Das „House of Quality“ zur Unterstützung im Konstruktionsprozess

Wallat, P.

Das „House of Quality“ entspringt der Qualitätssicherung. Eingesetzt im Entwicklungsprozess hilft es dabei, den Überblick zu behalten. Weiterhin unterstützt es bei der Kommunikation mit weiteren Akteuren im Entwicklungsprozess



The House of Quality is originated in quality control area. If used in the design process it supports to keep the overview. In addition it is easy to communicate with other people in the process.

Das „House of Quality (HoQ)“

Die folgende Beschreibung soll einer Einführung dienen und spiegelt damit nicht den vollen Umfang des HoQ wider. In Literaturquellen wie /1/ gibt es eine Vielzahl von weiteren Elementen und Ableitungen aus dem Grundmodell.

In Abbildung 1 ist das Grundmodell zu erkennen. Auf der linken Seite sind Anforderungen abgetragen, oben Funktionen. Die Ursprungsmöglichkeiten können Vielfältig sein. Ebenso ist der Umfang beider Kategorien nicht begrenzt.

Die Anforderungen

Die Anforderungen können der Auffassung des Entwicklers entspringen, aus der Anforderungsliste des Auftraggebers oder auch aus einer Marketingtechnischen Umfrage der anvisierten Kundenzielgruppe. Dabei muss keine der Quellen exklusiv sein, ein Anforderungsmix aus verschiedene Quellen trägt zu einer fundierten und umsichtigen Entwicklung bei. Zusätzlich zu den Anforderungen können selbstverständlich auch Wünsche abgetragen werden.

Die Anforderungen haben jeweils unterschiedliche Gewichtung. Eine sehr grobe Unterteilung wäre in Anforderung und Wünsche. Genauer könnte ein paarweiser Vergleich herangezogen werden, um die Funktionen abzustufen. Je nach Herkunft der Anforderungen wäre auch eine Aussage vom Auftraggeber oder Kunden denkbar und sinnvoll.

Die Skalierung der Gewichtungen kann ordinal sein, allerdings hilft eine Intervallskala bei den späteren Arbeitsschritten, die Ergebnisse feiner zu differenzieren. Allerdings ist die Intervallskalierung mit zusätzlichem Aufwand verbunden, um die Präferenzen messbar zu machen. Weiterhin ist sie somit auch nicht immer anwendbar.

Die Funktionen

Die Funktionen stehen in einem engen Zusammenhang mit den Wünschen. Diese müssen dazu in der Lage sein, die Anforderungen zu erfüllen. Demnach wird im Gegensatz zu den Anforderungen die Gewichtung nicht abgetragen, sondern erarbeitet.

		Gewichtung der Anforderungen	Aus Funktionsstruktur					
			Funktion A	Funktion B	Funktion C	Funktion D	Funktion E	
Aus Anforderungsliste	Anforderung 1	1	9		3			9%
	Anforderung 2	2		9			1	18%
	Anforderung 3	4	3			9		36%
	Anforderung 4	1			9	1		9%
	Anforderung 5	3		3			9	27%
Gewichtung der Funktionen			21	27	12	37	29	
			17%	21%	10%	29%	23%	

Abbildung 1: Kleines Beispiel zum House of Quality

Die Funktionen entspringen einer vorher aufgestellten Funktionsstruktur. Die Wahl der Funktionstiefe, welche den Detailgrad der Funktionen beschreibt und damit die Anzahl der bewerteten Funktionen im „HoQ“ ausmacht, obliegt dem Ersteller der Matrix. Es ist nicht zwingend notwendig, Funktionen zu wählen, welche bis ins Detail ausdefiniert sind. Im Gegenzug darf die Funktion auch nicht zu Grob gewählt sein. Die Tiefe der Funktion kann sich jedoch in der Matrix unterscheiden. Eine Auflistung in Anlehnung an die Funktionsstruktur ist hilfreich bei der Kommunikation mit weiteren Akteuren.

Die Bewertung

Bei der Bewertung wird für jede Funktion geprüft wie gut diese geeignet ist, die Anforderungen zu erfüllen. Die Zahlenwerte im zentralen Bereich von Abbildung 1 weisen in diesem Beispiel darauf hin, wie gut die Funktion die Anforderung erfüllt. Für dieses Beispiel wurden lediglich die Bewertungen 1, 3 und 9 gewählt. Dies ist für einen ersten Vergleich sinnvoll. Die Einteilung ist nicht fix und kann dem Prozess angepasst werden.

Je nach Höhe des Zahlenwertes ist auch der Zusammenhang zwischen Funktion und Anforderung größer oder kleiner. Bei einem Wert von 1 gibt es einen geringen Zusammenhang, bei einer 3 eine normalen und bei eine 9 einen starken Zusammenhang. Wird keine Eintragung in dem Kästchen vorgenommen, liegt keiner vor. Ein leeres Kästchen entspricht damit einer 0, für die weitere Rechnung.

Nach Abbildung 1 besteht zwischen „Anforderung 1“ und „Funktion A“ ein starker Zusammenhang. Weiterhin hat die „Funktion A“ noch einen Einfluss auf die „Anforderung 3“. Um die Gesamtbewertung und damit die Einflussnahme von Funktion A ($m_{f,j}$) auf das Produkt oder Erfüllung der Anforderungen festzustellen, werden nun die Faktoren miteinander multipliziert. Die Gewichtung der Anforderung ($m_{A,i}$) wird mit dem Wert des Zusammenhangs multipliziert (Z_{ij}). Demnach hat „Funktion A“ in diesem Beispiel einen Gesamteinfluss von 21. Es gilt:

$$m_{f,j} = \sum_i m_{A,i} \cdot Z_{ij} \quad 1$$

Die weiteren Gesamteinflüsse im „HoQ“ für die Funktionen werden analog berechnet. Hierbei wird ersichtlich, dass auch bei einem hohen Zusammenhang ein kleinerer Wert erreicht werden kann als bei einem geringeren Zusammenhang, wenn die Anforderung eine geringere Gewichtung hat.

Nutzen im Entwicklungsprozess

Für den Entwicklungsprozess ist das „HoQ“ ein Werkzeug, das einen Überblick verschafft, in welche Funktionen die meisten Entwicklungsressourcen fließen sollen. In Abbildung 1 ist rechts und unten jeweils der prozentuale Anteil an dem Prozess abgetragen. Dabei ist ersichtlich, dass „Funktion D“ einen starken Zusammenhang mit der gewichtigsten „Anforderung 3“ hat. Damit müssen die Ressourcen vorzugsweise in die Entwicklung dieser Funktion fließen. Als Beispiele kann man den Motor in einem Sportwagen oder die Energieaufnahme eines Kühlschranks nennen.

Anhand dieser kurzen Beispiele wird bereits klar, dass eine Änderung der Anforderungsprioritäten schnell berücksichtigt werden kann. Betrachtet der Kunde nun das Fahrwerk als wichtiger als den Motor, lässt sich dies zügig einarbeiten und es

sind sofort Information mit sonst gleicher Datenbasis vorhanden. Ähnlich wie die Anforderungsliste muss das „HoQ“ als lebendiges Dokument behandelt werden.

Schnittstellen zu weiteren Bereichen im Entwicklungsprozess

Vor- und nachgelagerte Arbeiten zum Entwicklungsprozess liefern oder beziehen Informationen aus oder in das „HoQ“. Die Marketingabteilung kann Information zu den Anforderungspräferenzen liefern. Diese stammen entweder aus Sekundärforschung oder direkter Primärforschung. Setzt die Finanzbuchhaltung „Target Costing“ ein, sind schnell Information zu den Funktionen und deren Gewichtung bekannt. Der Vertriebs kann aus der Struktur schnell die Stärken des Produktes erfassen und bewerben.

Durch weiteres „anbauen“ an das „HoQ“ kann der Informationswert noch gesteigert werden, allerdings steigt damit der Aufwand und die Komplexität der Matrix. Der Anbau, der das „HoQ“ zum Haus macht ist das „Dach“. Dort kann der Einfluss der Funktionen untereinander betrachtet werden. Bei dem Beispiel des Sportwagens hat die Funktion „Leistung bereitstellen“ einen negativen Einfluss auf die Emissionen.

Zusammenfassung

Das House of Quality kann bei anfänglich überschaubarem Aufwand eine gute Grundlage für den Entwicklungsprozess bereitstellen. Die Pflege ist mit Aufwand verbunden, dies muss beim weiteren Vorgehen berücksichtigt werden. Änderungen bei den Anforderungen oder den Funktionen lassen sich schnell berücksichtigen und die Informationen zum neuen Sachstand werden umgehend ausgegeben.

Bei einer Weiterentwicklung des Hauses oder des Produktes muss stets der Aufwand berücksichtigt werden. Eine überlegte Anwendung des House of Quality führt fast immer zu einer Qualitätssteigerung des Produktes.

Literatur

/1/ Ehrlenspiel, K; Meerkamm, H; Integrierte Produktentwicklung Hanser 2017

Potential und Forschungsbedarf additiv gefertigter Druckgeräte

Scherf, S. C.

Metallverarbeitende additive Fertigungsverfahren, wie die der Prozesskategorie „laserbasiertes Pulverbett-schmelzen“, bieten durch die schichtweise Herstellung von Bauteilen viele Formgebungsfreiheiten. Diese bieten auch für die chemisch-verfahrenstechnische Prozessindustrie eine Vielzahl an Nutzenversprechen. Für das rechtssichere Inverkehrbringen bedarf es gesicherter Methoden und entsprechende technische Normen.



Metal-working additive manufacturing (AM) processes, such as those of the process category "Laser-based Powder Bed Fusion" (LB-PBF-M), offer a wide range of design freedom due to the layer-by-layer production of components. It offers a large number of value-added benefits for the chemical process industry. For legally compliant placing on the market, reliable methods and corresponding technical standards are required.

Grenzen konventioneller Fertigungsverfahren für die Herstellung von chemisch-verfahrenstechnischen Apparaten

In der chemischen Verfahrenstechnik im Allgemeinen aber auch in der Forschung und Entwicklung, ist die Verwendung von Druckgeräten und druckführenden Reaktoren in allen Druckbereichen erforderlich. Insbesondere im Labor- und Technikumsmaßstab führen steigende Anforderungen an Apparate, Reaktoren und Prozesse zu immer größeren Herausforderungen in der Konstruktion. Fertigungstechnische Restriktionen behindern dabei die funktionsgerechte Ausführung.

Chemische Prozesse werden häufig bei erhöhten Druckbedingungen durchgeführt, um Gleichgewichte in die gewünschte Richtung zu verschieben oder Reaktionsgeschwindigkeiten zu erhöhen und so eine Intensivierung des Prozesses zu erhalten [1]. Um großindustrielle Anlagen zu entwickeln, müssen in der Prozesssynthese bzw. Forschung und Entwicklung diese erhöhten Drücke auch in Versuchsanlagen verwendet werden. Während die Niederdruckanwendungen

beim sog. „Scale-Up“¹ weniger problematisch sind, kommt es in den Mittel- und Hochdruckanwendungen oft zu großen Herausforderungen in der Konstruktion und Fertigung /2, 3/. Die Auswahl von kommerziell erhältlichen Rohformen und Druckbehältern ist groß, kann aber nicht immer den funktionsgerechten Betrieb bewerkstelligen (konfektionierte Größen und Geometrien). Zudem erfordert die Montage von zertifizierten Bauteilen der jeweiligen Druckstufe, insbesondere bei Querschnittsänderungen der Druckbehälter, viele Adapter (siehe Abbildung 1). Die daraus resultierenden vielen Verbindungen führen zu einer hohen Leckageempfindlichkeit der gesamten Apparatur. /2/



Abbildung 1: Produktabscheider mit vielen Adaptern (ICVT²)

Exotherme Reaktionen erfordern Reaktoren, die ausreichend gekühlt werden. Üblicherweise werden Reaktorrohre mit Doppelmantel und Feststoffschüttung oder für stark exotherme Reaktionen, Schlitzgeometrien mit aufgebrachten Strukturen in Plattenwärmetauscher-Bauweise verwendet. Das Zusammenpressen der Reaktor- und Kühlräume bei der Plattenwärmetauscher-Bauweise erfordert einen sehr hohen technischen Aufwand und kann den Anforderungen der Reaktoren aufgrund von Fertigungsrestriktionen nur eingeschränkt gerecht werden. Insbesondere bei den Reaktorrohren mit Feststoffschüttung kann es aufgrund der geringen radialen Leitfähigkeit der Feststoffschüttung zur Bildung von Hot-Spots (bzw. Cold-Spots) kommen. Dabei steigt (bzw. fällt) die Temperatur im Inneren

¹ Scale-Up ist ein klassischer Ansatz der chemischen Reaktionstechnik um im Labormaßstab aufgebaute Prozesse durch Maßstabsvergrößerung auf großindustrielle Anlagen zu übertragen /2/.

² Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik der TU Clausthal.

der Katalysatorschüttung um 100°C oder mehr. Der Hot-Spot stellt sicherheitstechnische Risiken wie z.B. die Wärmeexplosion aber auch eine Verschlechterung der Ausbeute durch die Begünstigung von unerwünschten Reaktionen dar. /2, 4/

Potentiale des laserbasierten Pulverbettsschmelzens

Insbesondere die Additive Fertigung (AM) mit ihren metallverarbeitenden Fertigungsverfahren der Prozesskategorie „laserbasierte Pulverbettsschmelzen“ (engl. Laser-based Powder Bed Fusion, kurz LB-PBF-M³) bieten durch die schichtweise Herstellung von AM-Bauteilen viele Formgebungsfreiheiten (siehe Abbildung 2).

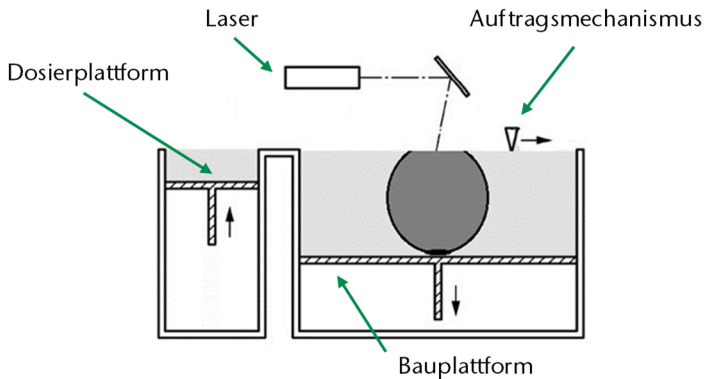


Abbildung 2: Prinzip des LB-PBF-M-Prozess mit Bauteil (Hohlkugel). Folgende Prozessschritte werden sukzessiv wiederholt um AM-Bauteile herzustellen: 1. Anheben der Dosierplattform mit pulverförmigen Ausgangswerkstoff. 2. Auftragen der bauteilspezifischen Schichtdicke mit Auftragsmechanismus. 3. Belichten (Aufschmelzen) der (selektiven) Ausgangswerkstoffschichten mit Laser. Abbildungselemente aus der Norm DIN EN ISO 17296-2:2016-12.

Diese Freiheiten können genutzt werden um z.B. sehr funktionsgerechte chemisch-verfahrenstechnische Apparate herzustellen. Dabei sind der Komplexität kaum Grenzen durch fertigungstechnische Restriktionen (wie z.B. den zuvor beschriebenen) gesetzt. Sogenannte Form-folgt-Funktion-Geometrien können dabei gezielt z.B. an die mechanische Belastung, Strömung und Wärmeübertragung

³ Die verschiedenen Prozessausgestaltungen werden von den verschiedenen Herstellern als engl. „Direct Metal Laser Sintering“ (DMLS, geschützt durch EOS), Laser Beam Melting (LBM), „Direct Metal Printing“ (DMP, geschützt durch 3D Systems), „Laser Metal Fusion“ (LMF, geschützt durch Trumpf), „LaserCUSING“ (geschützt durch ConceptLaser), oder Phenix-Process (Phenix Systems) bezeichnet.

angepasst werden. Die Funktion (Konstruktion) bestimmt die Fertigung und ermöglicht damit einen (engl.) „design-driven manufacturing process“ (dt. Design- bzw. Konstruktions-gesteuerter Herstellungsprozess). Mehrere Funktionen bzw. Bauteile können durch Integralbauweise bzw. als sog. monolithische Baugruppe zusammengefasst und damit Montage- und Fügevorgänge, sowie die Leckageempfindlichkeit reduziert werden. In diesem Zusammenhang wird auch von Prozessintegration, also der Verkürzung von Produktionsprozessketten gesprochen /5/.

Durch die metallverarbeitende Additive Fertigung ergeben sich neue revolutionäre Konzepte zur großindustriellen Produktion chemisch-verfahrenstechnischer Produkte, wie sie vor einigen Jahren der Mikroverfahrenstechnik vorhergesagt wurden, aber u.a. aufgrund von Fertigungsproblemen ausgeblieben sind /4, 6/. Anders als beim Scale-Up werden beim sog. „Numbering-Up“ viele kleine parallel geschaltete Mikro-Strukturapparate verwendet. Dadurch kann das volle Potential der einzelnen chemischen Reaktionen ausgeschöpft und gleichzeitig das gewünschte Produktionsvolumen hergestellt werden. Diese Prozessintensivierung kann insbesondere bei den zuvor beschriebenen stark exo- oder endothermen aber auch bei mischsensitiven Reaktionen zum Einsatz kommen. Durch diese auf die Funktion(en) fokussierte Auslegung von verfahrenstechnischen Apparaten kann die Produktnutzung sicherer und durch die Effizienzsteigerung kostengünstiger (Reduktion von Betriebs- und Verbrauchskosten) und nachhaltiger (Reduktion von Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen) gestaltet werden. Darüber hinaus kann der Transportaufwand durch viele kleine Produktionsanlagen direkt beim Kunden (engl. Production-on-site) verringert werden. /7, 8, 4, 7, 9/

Weiterhin ermöglicht die Additive Fertigung dem Ingenieur die gezielte Verarbeitung von hochwertigen Materialien. Dadurch und auch weil die Ausgangswerkstoffe formlos als z.B. Pulver verwendet werden, können Ressourcen und damit Kosten in der Produktion bestehend aus Fertigung und Liefernetz⁴ (u.a. Lagerhaltung und Transport) gespart und auch die Nachhaltigkeit verbessert werden. Zudem erlaubt die additive Fertigung auf Abruf eine flexible und automatisierte Herstellung individueller Bauteile ab Losgröße 1 vor Ort /10/. Durch die digitale und direkte Fertigung kann zudem die Herstellungs- (engl. Time-to-Product) und Produkteinführungszeit (engl. Time-to-Market) reduziert und gleichzeitig Kosten in deren Herstellung reduziert werden. Während die Kosten für die Herstellung geringer Stückzahlen, aber auch komplexer Bauteile in der konventionellen Fertigung tendenziell sehr hoch sind, können additive Fertigungstechnologien insbesondere bei der Herstellung von Bauteilen kleiner Stückzahlen und hoher Komplexität von Vorteil sein. Dies ist auch auf die werkzeuglose bzw. generische Fertigung, also dem Entfallen produktspezifischer Werkzeuge zurückzuführen. Insbesondere für die chemische Verfahrenstechnik im Labor- und Technikumsmaßstab mit tendenziell kleinen Stückzahlen und individualisierten komplexen Apparaten

⁴ Auch als Lieferkette bezeichnet.

und Reaktoren kann die Additive Fertigung gegenüber der konventionellen Fertigung Kostenvorteile bieten. Die hohen Herstellungskosten für Großserien von Numbering-Up-Apparaten, können durch Ressourcen- und Kosteneinsparungen in der Produktnutzung kompensiert oder sogar übertroffen werden, wie Beispiele aus der konventionellen Mikroapparatetechnik zur Herstellung von Farbpigmenten zeigen /11/.

Die Vielzahl an Potentialen der Additiven Fertigung macht deutlich, dass die verschiedenen additiven Technologien mehr als nur Fertigungsverfahren sind und das Potential haben, Produktentwicklung (und Konstruktion), Prozessketten, Liefernetz, Fertigung (z.B. Fabrikstrukturen /12/) und vor allem Produkte und dessen Nutzung zu revolutionieren. Die Potentiale versprechen zusammenfassend als „Mittel zum Zweck“ Nutzen wie z.B. höheren Produktnutzen, Kostenreduktion, Nachhaltigkeitsverbesserung und Verkürzung von Time-to-Product und Time-to-Market. /5, 13/

Forschungsbedarf von AM-Druckgeräten

Additive Fertigungsverfahren wie die der Prozesskategorie „laserbasierte Pulverbettsschmelzen“ (LB-PBF-M) zeigen dort Stärken, wo konventionelle Fertigungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. Bedingt durch die Vielzahl an Formgebungsfreiheiten und guten mechanischen Eigenschaften der Bauteile sind die Fertigungsverfahren prädestiniert für die Herstellung chemisch-verfahrenstechnischer Apparate. Neben den Vorteilen und tiefgreifenden Potentialen, gibt es aber auch eine Vielzahl an Herausforderungen, die im Hinblick auf die Fertigung von inhärent sicherheitskritischen Druckgeräten zu klären sind.

So haben auch die LB-PBF-M-Fertigungsverfahren Prozessgrenzen und Funktionsflächen müssen i.d.R. konventionell mechanisch nachbearbeitet werden. Aufgrund der Schichtbauweise entstehen anisotrope Materialeigenschaften die von der Fertigungsrichtung, aber auch von dem verwendeten AM-System, bestehend aus AM-Maschine, Ausgangswerkstoff und Prozessparameter (wie z.B. Laserleistung und Schichtdicke) abhängig sind. Die Auswahl an qualifizierten Ausgangswerkstoffen (und dessen Prozessparameter) ist zudem eingeschränkt /14–16/. Neben den anisotropen mechanischen Eigenschaften und einer geringen Porosität (<1 %), weisen die AM-Bauteile, u.a. abhängig von der Schichthöhe, den sog. Treppenstufeneffekt auf, welcher i.d.R. eine nicht additive mechanische (Post-Prozess-) Nachbearbeitung erfordert. Fertigungstechnische Herausforderungen wie Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit, Schwindung und thermisch induzierte Eigenspannungen und in Folge dessen die erreichbaren Genauigkeiten, erschweren darüber hinaus die bauraumgebundene Herstellung /16–24/.

Die Bauteilstückkosten von LB-PBF-M-Prozessen setzen sich größtenteils aus Fix- und nur geringen variablen Bauteilkosten zusammen. Die Stückkosten sind daher

mit zunehmender Stückzahl dennoch nahezu konstant. Dies ist auf die geringe Bauraumgröße bzw. Baugeschwindigkeit und hohen Maschinenkosten sowie den niedrigen Automatisierungsgrad der Nachbearbeitung (Post-Prozess) zurückzuführen. Die Nachbearbeitung aber auch die fehlende Integration der AM-Maschinen in bestehende Fertigungsabläufe führt zu hohen Personalkosten. Zudem liegt der Ausgangswerkstoffpreis ein Vielfaches über den Werkstoffpreisen anderer Fertigungsverfahren /25–28/. Bauteilserien großer Stückzahlen sind somit im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren oft mit hohen Fertigungskosten verbunden. Andererseits sind die additiven Fertigungsverfahren (LB-PBF-M) auch nur dann wirtschaftlich (in Großserien) einzusetzen, wenn die Funktions- bzw. Bauteilkomplexität ausreichend hoch bzw. nicht konventionell gefertigt werden können (s.o.) und/oder während der Produktnutzung ein finanzieller Mehrwert erzeugt werden kann. /14, 15, 26, 30–32/

Die Potentiale, aber auch die spezifischen fertigungstechnologischen Prozessgrenzen müssen in der Produktentwicklung und Konstruktion berücksichtigt werden. Zur konstruktiven Gestaltung von Bauteilen der Prozesskategorie LB-PBF-M gibt es eine Vielzahl von Gestaltungsrichtlinien, -regeln oder -empfehlungen. Das häufig als „Design for Additive Manufacturing“ (DfAM) /5, 33/ bezeichnete junge Forschungsfeld, besteht allerdings aus hauptsächlich isolierten Methoden und Regeln. In der Industrie mangelt es daher und auch weil die LB-PBF-M-Verfahren vielfach nach wie vor als reines Prototypenverfahren stigmatisiert werden, an Konstruktionswissen, Richtlinien und geeigneten CAE⁵-Werkzeugen /5/.

Aktuelle Regelwerke zur Auslegung von chemisch-verfahrenstechnischen Apparaten oder Druckgeräte berücksichtigen die Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren nicht. Da sich die Bauteileigenschaften und auch die (Fertigungs-) Prozesskette erheblich von den in den restriktiven Regelwerken (wie AD-2000 Regelwerk oder Normenreihen wie die DIN EN 13445 für unbefeuerte Druckbehälter) zur Auslegung von Druckgeräten verwendeten Fertigungsverfahren unterscheiden, ist eine sichere und standardisierte Herstellung aktuell nicht möglich. Zudem berücksichtigen auch Rechtsvorschriften wie die Druckgeräteverordnung (14. ProdSV und Druckgeräterichtlinie, 2014/68/EU, kurz DGRL) die vergleichsweisen neuen additiven Fertigungsverfahren nicht. Hierdurch ist auch das rechtssichere in Verkehr bringen von Mittel- oder Hochdruck-Apparaten (Gefahrenkategorie II bis IV nach DGRL) nicht realisierbar.

Bemühungen von Vereinen wie der DECHEMA e.V.⁶, des DIN e.V. und dem VDMA e.V. aber auch die verschiedener Forschungsinstitute und Industrieunternehmen zeigen, dass das Potential erkannt und entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden, um zukünftig additiv (LB-PBF-M) gefertigte Druckgeräte herzustellen. Im DIN-Normenausschuss „Maschinenbau“ (NAM) wurde im Fachbereich

⁵ Engl. Computer-aided Engineering (CAE), dt. rechnergestützte Entwicklung.

⁶ z.B. im Rahmen des Praxisforum zu additive Fertigungsverfahren im Apparate- und Anlagenbau im September 2015

„Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate“ Ende 2016 der Arbeitskreis „Additive Manufacturing für Druckgeräte“ gebildet. Die Mitglieder Arbeitsgemeinschaft beim VDMA wollen im Rahmen des Geltungsbereichs der Druckgeräterichtlinie (DGRL) additiv gefertigte Bauteile und Druckgeräte auf EU⁷-Ebene normen. Der Arbeitskreis betrachtet zwei additive Fertigungsverfahren und hat entsprechend zwei Arbeitsgruppen für die additiven Prozesskategorien „Laserbasiertes Pulverbettsschmelzen“ (AG „Pulverbettverfahren“) und „Gerichtete Energieeinbringung“ (AG „Auftragsschweißen“) gebildet. Neben führenden Herstellern von Pumpen und Armaturen sowie Anlagenbauer und -betreiber aus der chemischen Industrie, arbeiten hier auch Experten von Überwachungsorganisationen, Vertretern des DIN-Normenausschusses Maschinenbau und Forschungsinstitute auch wie das IMW zusammen. /29/

Um die additiven Fertigungsverfahren der Prozesskategorie laserbasiertes Pulverbettsschmelzen für die Herstellung von AM-Druckgeräten (der DGRL-Gefahrenkategorie II bis IV) zu qualifizieren, müssen die an die Herstellung von Druckgeräten gestellten Anforderungen (z.B. der Normenreihe DIN EN 13445) und die Besonderheiten der LB-PBF-M-Prozesse/-Bauteile zusammengeführt werden (vgl. Abbildung 3). Dies kann in Anlehnung an die Qualifizierung von (konventionellen) Schweißverfahren und den Methoden zur Untersuchung von Gussbauteilen forciert werden.

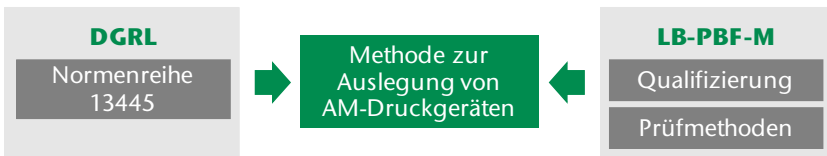


Abbildung 3: Aufbau der Methode zur Auslegung von AM-Druckgeräten mit Hilfe von LB-PBF-M-Prozessen

Für die Herstellung von AM-Druckgeräten wird dazu entsprechend der Anforderungen an die Bauteileigenschaften (Werkstoff) von der DGRL und Normenreihe DIN EN 13445 ein potentiell geeignetes AM-System festgelegt. Anschließend muss das spezifische AM-System in Anlehnung an die Qualifizierung von Schweißverfahren untersucht werden. Dazu werden Testkörper zur Untersuchung der systemspezifischen Prozessgrenzen (und Aufmaße), geometrischen Genauigkeiten und Oberflächenrauheit gefertigt und untersucht. Für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte im Sinne einer Werkstoffeinzelpfung (PMA⁸) und Quantifizierung der Einflussfaktoren sind eine Vielzahl von Proben notwendig. Um entsprechende Materialsicherheiten im Sinne der restriktiven Normenreihe zu definieren, ist eine umfassende Qualitätssicherung (u.a. In-Prozessüberwachung) und

⁷ Europäische Union (EU)

⁸ PMA, engl. Particular Material Appraisal.

Prüfung notwendig. Die dazu notwendigen Prüfverfahren können in Anlehnung an die Prüfmethoden von Gussbauteilen (Norm DIN EN 13445-6) orientiert werden. Entsprechend der Potentiale des Fertigungsverfahrens ist eine Auslegung mit Analyseverfahren (Norm DIN EN 13445-3 Anhang C) auf Basis der Restriktionen zu bevorzugen.

Eine entsprechende Methodik zur Auslegung von AM-Druckgeräten soll im Rahmen eines Institutsübergreifendes DECHEMA-AiF-Projekt zwischen ICVT und IMW der TU Clausthal erarbeitet und erprobt werden.

Zusammenfassung

Die Potentiale der metallverarbeitenden LB-PBF-Verfahren bieten eine Vielzahl an Nutzenversprechen für die chemisch-verfahrenstechnische Prozessindustrie. Damit AM-Druckgeräte hergestellt werden können, müssen eine entsprechende Methodik und technische Normen erarbeitet werden.

Literaturverzeichnis

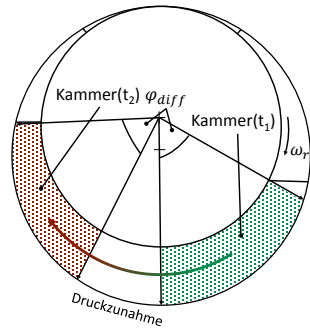
- /1/ KURZWEIL, Peter ; SCHEIPERS, Paul: *Chemie : Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. 9., erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag /Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012 (Naturwissenschaftliche Grundlagen)
- /2/ ZLOKARNIK, Marko: *Scale-up*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2012
- /3/ EMIG, Gerhard ; KLEMM, Elias: *Technische Chemie : Einführung in die Chemische Reaktionstechnik ; mit 47 Tabellen*. 5, aktualisierte und erg. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch)
- /4/ KRALISCH, Dana ; WEYELL, Peter: *Ressourceneffizienz im Maschinen- und Anlagenbau : Potenziale der Miniaturisierung*. Berlin, August 2015 (VDI ZRE Publikationen Kurzanalyse Nr. 14)
- /5/ KUMKE, Martin: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- /6/ WEINER, Monika: *Chemiebaukasten für Profis*. In: *Fraunhofer Magazin* (2004), Nr. 01.2004
- /7/ FACHBEREICHSTAG VERFAHRENSTECHNIK: *Zukunft: Mikroverfahrenstechnik*. URL <http://www.vt-fh.de/index.php?id=6>. – Aktualisierungsdatum: 2017-07-26
- /8/ *Mikro-Verfahrenstechnik : μ VT*. Darmstadt, TU Darmstadt, Institut für Thermische Verfahrenstechnik. Vorlesungsskript. 2016. URL http://www.tvt.tu-darmstadt.de/forschung_tv/mikroverfahrenstechnik/index.de.jsp – Überprüfungsdatum 2016-04-22

- /9/ WATERKAMP, Daniel Armin: *Zur Prozessintensivierung von Alkylierungsreaktionen in dispersen Systemen durch Mikroreaktionstechnik*. Bremen, Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik. Dissertation. 2012-01-25
- /10/ VDI-Richtlinie 3405. Dezember 2014. *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*
- /11/ KIRSCHNECK, D. ; MARR, R.: *Anlagenkonzepte in der Mikroverfahrenstechnik*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (2006), 1-2, S. 29–38
- /12/ MÖHRLE, Markus: *Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung*. Berlin : Springer Vieweg, 2018 (SpringerLink Bücher)
- /13/ BALDINGER, Matthias ; LEUTENECKER, Bastian ; RIPPEL, Manuel: *Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren : Strategic relevance of additive manufacturing*. In: *Industrie Management* 29 (2013), Nr. 2, S. 11–14. URL <https://www.tib.eu/de/suchen/id/tema%3ATEMA20130401328/Strategische-Relevanz-generativer-Fertigungsverfahren/>
- /14/ VDI-GPL FACHAUSSCHUSSES FA 105 „ADDITIVE MANUFACTURING“ UND GREMIUM: *Statusreport : Additive Fertigungsverfahren*. September 2014
- /15/ WOHLERS, Terry T.: *WOHLERS REPORT : 3d printing and additive manufacturing state of the industry*. FORT COLLINS : Wohlers Associates, 2018
- /16/ HUANG, Yong ; LEU, Ming C. ; MAZUMDER, Jyoti ; DONMEZ, Alkan: *Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137 (2015), Nr. 1, S. 14001
- /17/ GAO, Wei ; ZHANG, Yunbo ; RAMANUJAN, Devarajan ; RAMANI, Karthik ; CHEN, Yong ; WILLIAMS, Christopher B. ; WANG, Charlie C.L. ; SHIN, Yung C. ; ZHANG, Song ; ZAVATTIERI, Pablo D.: *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. In: *Computer-Aided Design* 69 (2015), S. 65–89
- /18/ MARTHA, Alexander Matthias: *Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung*. Universität Duisburg-Essen. Dissertation. 2015-11-23
- /19/ KAHNERT, Markus: *Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)*. München, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation. 2014-01-22
- /20/ GEBHARDT, Andreas (Hrsg.): *Additive Fertigungsverfahren*. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016
- /21/ WEGNER, Andreas; WITT, Gerd (Mitarb.): *Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen*. In: GEBHARDT, Andreas (Hrsg.): *Newsletter : RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*. Aachen : RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 2013
- /22/ JAHN, Simon ; KAHLENBERG, Robert ; STRAUBE, Christian ; MÜLLER, Marco: *Empfehlungen zur Steigerung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschmelzen*. In: WITT, Gerd; WEGNER, Andreas; SEHRT, Jan T. (Hrsg.): *Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung : Beiträge aus der wissenschaftlichen Tagung der Rapid.Tech 2015*. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2015, 127-
- /23/ INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND BETRIEBSWISSENSCHAFTEN (Hrsg.); ZÄH, Michael (Mitarb.): *Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen von metalli-*

- schen Bauteilen durch thermographische Schichtüberwachung : IGF-Vorhaben 17.911 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS (DVS-Nr. 13007)*
- /24/ TÖPPEL, Thomas ; MÜLLER, Bernhard ; HOEREN, Karlheinz P.J. ; WITT, Gerd: *Eigenspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen : Fachbeitrag Eigenspannungen und Verzug bei additive Fertigung*. 20.05.2016
- /25/ ABELE, Eberhard ; REINHART, Gunther: *Zukunft der Produktion : Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011
- /26/ ATZENI, Eleonora ; SALMI, Alessandro: *Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62 (2012), Nr. 9, S. 1147–1155. URL <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
- /27/ KRANZ, J. ; HERZOG, D. ; EMMELMANN, C.: *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4*. In: *Journal of Laser Applications* 27 (2015), S1, S14001
- /28/ PETRICK, Irene J. ; SIMPSON, Timothy W.: *3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition*. In: *Research-Technology Management* 56 (2013), Nr. 6, S. 12–16
- /29/ VDMA E.V.: *Additive Manufacturing für Druckgeräte*. URL <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/15507169>. – Aktualisierungsdatum: 2017-01-20
- /30/ *Additive Manufacturing : A game changer for the manufacturing industry?* München, November 2013. URL <https://www.rolandberger.com/de/Publications/Additive-manufacturing-2013.html>
- /31/ ADAM, Guido: *Konstruktionsregeln für Additive Fertigungsverfahren : Eine Grundlage für die Ausbildung und Lehre*. OptoNet-Workshop. Paderborn, 06.11.2013
- /32/ LINDEMANN, C. ; JAHNKE, U. ; MOI, M. ; KOCH, R.: *Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing*. 2012
- /33/ VAYRE, B. ; VIGNAT, F. ; VILLENEUVE, F.: *Designing for Additive Manufacturing*. In: *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 632–637

Computergestützte Verdichteroptimierung mit Hilfe von MATLAB – Entwicklung eines Expertentools

Kaczmarek, D.; Lohrengel, A.



In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner DEWA Engineering und Anlagenbau GmbH entwickelt das Institut für Maschinenwesen ein Expertentool in MATLAB für eine neuartige Verdichtertechnik. Das Expertentool soll im ersten Schritt ermöglichen, verschiedene Baugrößen des Verdichters simulativ in Bezug auf unterschiedliche Betriebsgrößen abzubilden. Im zweiten Schritt soll die Software so konzipiert werden, dass ideale geometrische Zusammenhänge gefunden und darauf aufbauend eine Baureihenentwicklung entstehen soll. Neben der programmtechnischen Entwicklung entsteht parallel ein Prüfstand, welcher zur Verifizierung der Software dienen wird.

In cooperation with the industrial partner DEWA Engineering und Anlagenbau GmbH, the Institute of Mechanical Engineering is developing an expert tool using MATLAB for a new compressor technology. In the first step, this expert tool should make it possible to simulate various sizes of the compressor. In the second step, the software is to be designed to find ideal geometrical relationships and based on this, a series development is to be developed. In addition to the software a test bench will be created, which will be used to verify the software.

Vorgehensweise

Agile Softwareentwicklung

Das grundlegende Vorgehen bei der Softwareentwicklung für den neuartigen Verdichter, ist an die „agile Softwareentwicklung“ angelehnt. Die „agile Softwareentwicklung“ verfolgt das Prinzip der vollständigen Flexibilität sowie der praxisnahen Entwicklung von Programmmodulen. Erreicht werden die Flexibilität und die praxisnahe Entwicklung durch ständigen Kontakt mit dem Industriepartner und frühzeitigen „Beta“ Bestandteilen der Software zu Testzwecken. Durch den ständigen Kontakt und den Testzyklen wird ein wertvoller Informationsfluss von bedarfsgerechten Programmbestandteilen kommuniziert, um so eine anforderungserfüllende Software programmtechnisch umzusetzen. In dem Zusammenhang gestaltet der Partner die Software maßgeblich mit und kann so

auch bewährte Vorgehensweisen, praxistaugliche I/O-Dateien, technische Abbildungen/Graphen, Hinweisdialoge oder auch weitergehende Zukunftsideen in die Softwareentwicklung integrieren. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist das problemlösende Tool.

Bedarfsanalyse

Die computergestützte Produktentwicklung beginnt mit einer Bedarfsanalyse, hier wird hinsichtlich des Produktes und der Software eine Anforderungsliste erstellt. In diesem Dokument stehen so die wichtigsten zu erfüllenden Anforderungen sowie weitere Hinweise, welche zur programmtechnischen Modellbildung wichtig sind. Eine besondere Wertstellung besitzt die klare definierte Funktion des neuen Produktes, um so die Funktionalität in der Modellbildung zu berücksichtigen. Dabei sind zusätzlich Informationen bezüglich der Betriebsparameter, geometrischen Abmaße, Systemcharakteristiken (wie zum Beispiel die Effizienz, der kinematische Zusammenhänge, der Leistungsbedarf sowie der Verschleiß) oder aber auch bestimmte Voraussetzungen für die Software (wie zum Beispiel der erforderlichen Schnittstellen, unterstützte Betriebssysteme, Erzeugung von temporären Dateien) und weiteres zu notieren. Das Ergebnis dieses Arbeitspunktes sollte eine Auflistung der wichtigsten Details sowie die zu erreichenden Leistungskriterien des Produktes hervorbringen.

Strukturierung der Inhalte

Nach der Bedarfsanalyse erfolgt die Strukturierung der Software. Bewährt hat sich das Vorgehen über das systematische Analysieren des Gesamtkomplexes. Dabei sind die Teilbereiche des Systems zu sortieren und die Grundlagen zu diesen Themen aufzuarbeiten. Mit Hilfe des Grundverständnisses kann anschließend ein guter Überblick der Subsysteme erstellt und somit die Strukturierung des groben Programmablaufes durchgeführt werden. Eine gute Hilfestellung bietet zum Beispiel ein Flussdiagramm, in dem die Zusammenhänge festgehalten, kommentiert und geordnet werden. Ebenso sollten Gedanken zu möglichen Prüfstandsaufbauten und der Sensorik erfolgen. Dadurch sollen in den jeweiligen Subsystemen die Rechenansätze so angepasst werden, dass die Sensorgrößen ausschlaggebend für das Ergebnis des Subsystems sind. Hierdurch lässt sich im weiteren Verlauf eine schnelle Realisierung der Systemverifizierung sowie -validierung ermöglichen. Darüber hinaus sollte in diesem Arbeitspaket geklärt werden, wie die interne Datenablage realisiert, in welcher Form Ergebnisse ausgegeben und welche Dokumentationsvorgehensweise, bezüglich der Software, verfolgt werden. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die Generierung einer klaren Struktur der Software.

Erstellung des Rechenkerns

Sobald die Struktur der Software feststeht, kann mit dem Programmieren des Inhaltes angefangen werden. Als Voraussetzung für die Programmierung gilt es die Grundlagen, zu den verschiedenen technischen Zusammenhängen, zu beherrschen. Zeitlich kinematische Abläufe müssen bekannt sein, Randbedingungen aus der Anforderungsliste, Rückkopplungen und Wechselwirkungen des Gesamtkonstrukts müssen berücksichtigt werden. Bewährt hat sich das Beginnen mit der Programmierung der kinematischen Zusammenhänge. Ausgehend von diesem Standpunkt, werden die Grundlagen für alle weiteren technischen Aspekte des Systems betrachtet. Sofern gewisse Randbedingungen unklar sind, müssen sinnvolle Annahmen oder Idealisierungen getroffen werden. Die Grundaufgabe dieses Arbeitspaketes besteht in der programmtechnischen Aufbereitung des zu simulierenden Gesamtsystems, mit tiefgreifendem Verständnis. Neben der Systemanalyse und Rechenkernprogrammierung, ist es zudem notwendig, Bestandteile der programmtechnischen Organisation auszuarbeiten. Hierzu zählen das Programmieren von Kommunikationsmodulen, für die interne Verwendung der Ergebnisse, eine Fehler- und Hinweishandhabung, die Aufbereitung der Schnittstellendaten, für die interne Verrechnung im System, die Erstellung von nützlichen Abbildungen zum eigenen Verständnis (zum Beispiel programmtechnisch gebildete Punktwolken inklusive Plot), die Graphen von Betriebsgrößen, die Schaffung einer Bedienoberfläche, zudem sind Überlegungen für ergänzende Programmbestandteile durchzuführen und Maßnahmen für die Anbindungen zu treffen. Die Visualisierung der Daten sollte bereits in einem sehr frühen Stadium der Softwareentwicklung erfolgen, um bereits bei der Beta-Versionsausgabe mögliche fehlerhafte Bestandteile in der Software ausfindig zu machen. Mit Abschluss dieses Arbeitspaketes steht der fehlerfreie Rechenkern.

Testphase

Nun folgt die kritische Betrachtung des Gesamtsystems, was auch als die Testphase der Software bezeichnet werden kann. Viele Bestandteile des Programms wurden bereits auf ihre Funktion überprüft, doch im Verbund des gesamten Systems können diverse Fehler auftreten. Beispiele hierfür wären das Überschreiben von Variablen, ein unzulässiger Input für eine Funktion, das Auftreten von ungewollten imaginären Zahlen oder Teilungen durch Null sowie Datentypprobleme. Diese unzulässigen Probleme müssen in den nächsten Schritten abgearbeitet werden. Die Software sollte ab diesem Zeitpunkt fehlerfrei laufen, oder bei unzulässigen Eingaben, Hinweise beziehungsweise Fehler ausgeben. Ein Abstürzen des Programms ist nicht mehr zulässig und muss programmtechnisch abgefangen werden. Weiter gilt es, die erstellte Software mit einem realen Modell zu verifizieren sowie zu validieren. Dazu sollte im besten Fall ein Prüfstand bereits parallel im Arbeitspaket „Erstellung des Rechenkerns“ entwickelt und gefertigt werden. Anhand des Prüfstandes sollten dann fertigungstechnische, praxistaug-

liche sowie konstruktive Maßnahmen überprüft und gegebenenfalls Anpassungen an bestimmten Funktionselementen durchgeführt werden. Sobald der Prüfstand gefertigt und montiert ist sowie die Software fehlerfrei funktioniert, sind Abgleichtests durchzuführen. Das Ergebnis dieser Phase sollte die fertige Software mit einem praxisnahen Parameterabgleich sein. Im Anschluss können an diesen Rechenkern noch weitere programmtechnische Inhalte angefügt werden.

Aktuelles Forschungsprojekt

Zielsetzung

Hintergrund des Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer Baureihenentwicklung für einen neuen Verdichtertyp. In der *Abbildung 1* ist der Verdichter exemplarisch abgebildet.

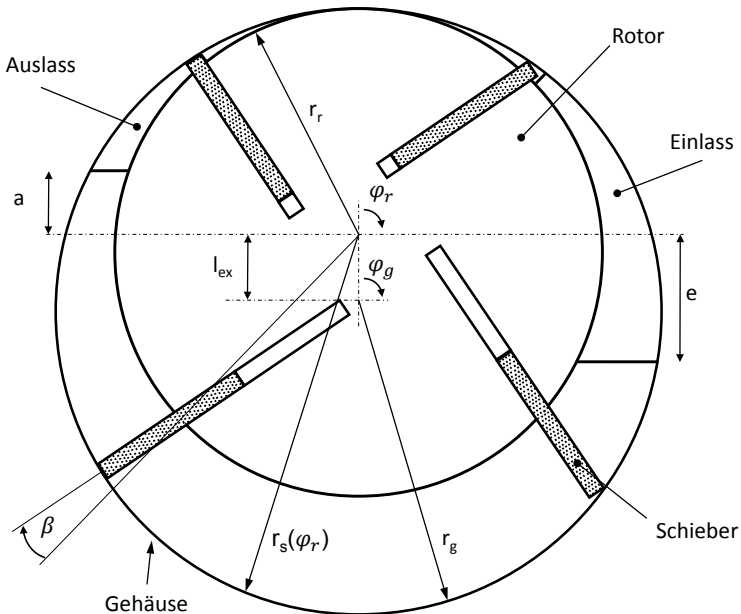


Abbildung 1: Aufbau des Drehschieberverdichters

Das am IMW verfolgte Forschungsprojekt befindet sich im Aufbau des Rechenkerns der Simulationssoftware - „Erstellung des Rechenkerns“. Es ist ein Simulationsmodell entstanden, welches über die grundlegenden konstruktiven Parameter des Drehschieberverdichters einstellbar ist. Dieses Simulationsmodell bietet die Freiheit, verschiedenste Variationsrechnungen in einem großen

Parameterfeld durchzuführen. Dadurch ist es möglich, einen bestimmten Betriebspunkt des entwickelten Modells simulativ abzubilden. Die Ergebnisse der jeweiligen Simulationen ermöglichen eine genaue Analyse des Verdichters, welche eine Auslegung in definierten Betriebszuständen gestattet.

Die Betriebsgrößen des Verdichters werden innerhalb des Programms aufbereitet und passende Abbildungen in Abhängigkeit des Winkels erstellt. Aus diesen Abbildungen können wichtige Kenngrößen oder qualitative Verläufe direkt abgelesen und abgeschätzt werden. Somit stellt die erste Version des Programms eine gute Möglichkeit für Überschlagsrechnungen des Drehschieberverdichters dar. Durch die simulativ ermittelten Ergebnisse kann zum Beispiel die optimale Einlassgeometrie in Abhängigkeit der Schieberanzahl ermittelt werden. Die optimierte Geometrie ermöglicht ein besseres Verdichtungsverhalten zu erzielen, sodass der maximal mögliche Enddruck und Volumenstrom erreicht werden kann. In der *Abbildung 2* ist das Verdichtungsverhältnis in Abhängigkeit der Einlassgeometrie abgebildet.

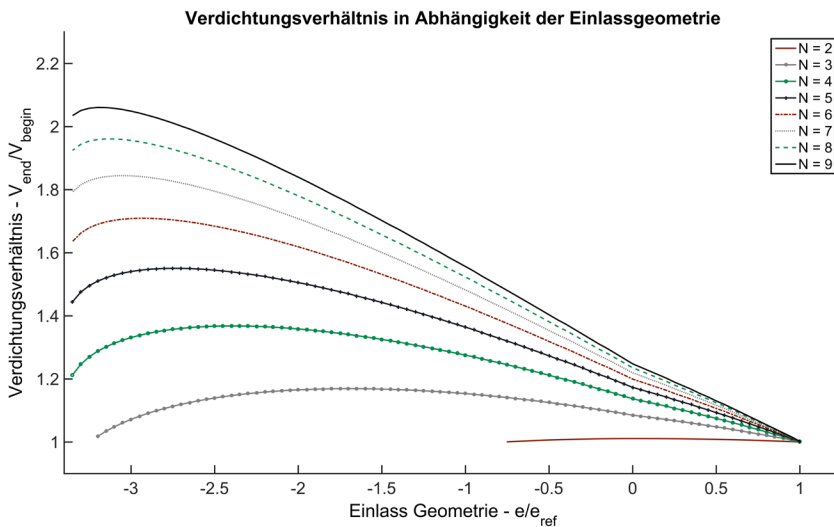


Abbildung 2: Verdichtungsverhältnis in Abhängigkeit der Einlassgeometrie

Die *Abbildung 2* wurde mit einem geometrisch gleichbleibenden Verdichter entwickelt, variiert wurden ausschließlich die Schieberanzahl N sowie die Einlassgeometrie e . Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass mit Variation der Schieberanzahl, auch die Extremwerte des maximalen Verdichtungsverhältnisses variieren. Demnach existiert für jede Schieberkonfiguration eine andere optimale geometrische Beziehung von e .

Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungen an dem Drehschieberverdichter durchgeführt. Als eine beispielhafte Ausgabe sei hier das Schiebersystem genannt. In der *Abbildung 3* ist die Lastsituation des Schiebers im Rotor gezeigt.

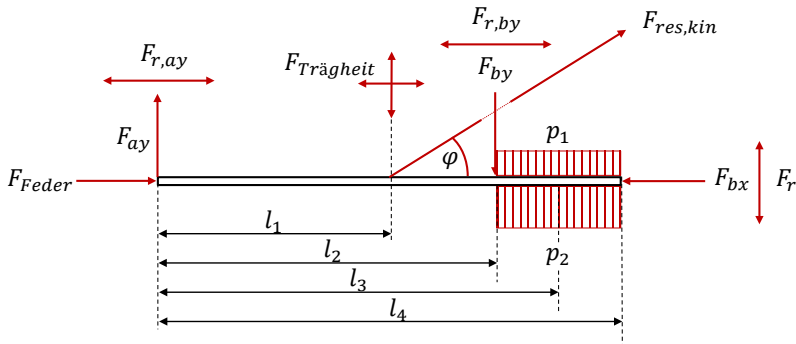


Abbildung 3: Belastungssituation des Schiebers im Gesamtsystem

Die eingetragenen Belastungen sowie Längenverhältnisse sind aus den kinematischen Zusammenhängen, des Zusammenspiels der Eingabeparameter sowie des thermodynamischen Subsystems entstanden. Dieses Teilsystem des Schiebers ermöglicht es, die Belastungssituation des Schiebers numerisch in allen Zeitschritten abzubilden und somit Einflussanalysen durchzuführen. Als beispielhafte Analyse ist in *Abbildung 4* die Variation der Schieberanzahl und deren Einfluss auf die Schiebergleitbuchsenkräfte F_{ay} und F_{by} abgebildet.

Aus der *Abbildung 4* geht hervor, wie eine Erhöhung der Schieberanzahl zum einen die Dynamik der Schieberbelastung verbessert und zum anderen die sich einstellenden Grundbelastungsverläufe beeinflusst. Eine größere Schieberanzahl führt demnach zu einer gleichmäßigeren Belastung. Im Konflikt steht diese Belastungsoptimierung jedoch mit der Effizienz des Drehschieberverdichters, denn die Erhöhung der Schieberanzahl führt zu einer Zunahme der Reibkontakte. Zu erwähnen ist, dass für bestimmte Massendurchsätze ideale Konfigurationen existieren.

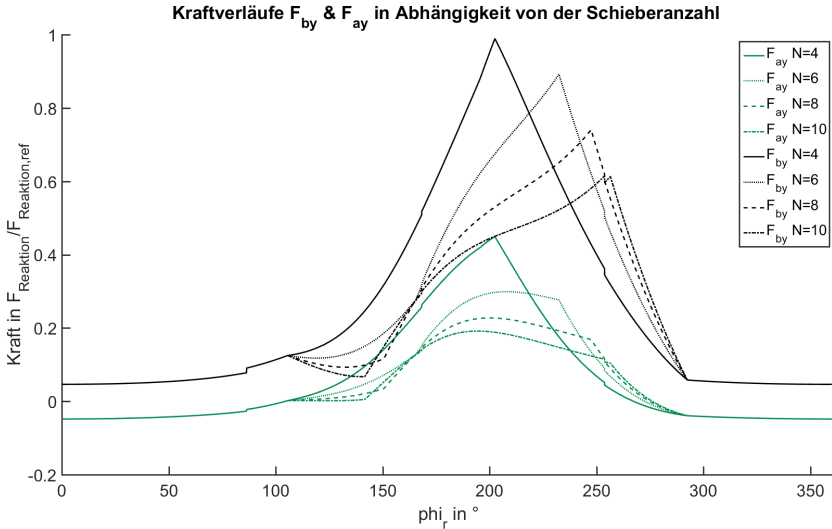


Abbildung 4: Schieberbelastungsgrößen in Abhängigkeit des Rotorwinkels

Dadurch, dass der Informationsgehalt der Ergebnisse sehr umfassend ist, kann nicht aus einfachen Variationen der Eingabeparameter auf die Idealgeometrie geschlossen werden. Somit ist es notwendig, diese Variationsrechnungen im Gesamtsystem zu betrachten und das Wechselwirken der Parametervariationen im System zu berücksichtigen. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes wird eine Optimierungsaufgabe an das Simulationsmodell angefügt. Hierdurch wird es ermöglicht, durch Vorgabe von gezielten Präferenzen im Bereich der Ergebnisse, eine Extremwertaufgabe zu lösen.

Als beispielhafte Extremwertaufgabe kann die Reibleistung als Optimierungsparameter gewählt werden. Hierzu wird ein Datensatz an den Rechenkern übermittelt, dieser rechnet die zu erwartenden Belastungen, Temperaturen, Drücke, Reibleistungen, Pressungen, Kräfte usw. aus. Diese Ergebnisse werden mit einer Kostenfunktion bewertet, dabei werden den relevanten Parameter Gewichtungsfaktoren zugeteilt und fließen folglich in die Summe der Kostenfunktion ein. Das Ergebnis der Kostenfunktion soll letztlich optimiert werden, um so die Einflüsse weiterer Betriebsgrößen zu berücksichtigen. Dieser Ablauf wird so lange wiederholt, bis die Kostenfunktion einen Extremwert erreicht. Eine Visualisierung der Abläufe ist in *Abbildung 5* gezeigt.

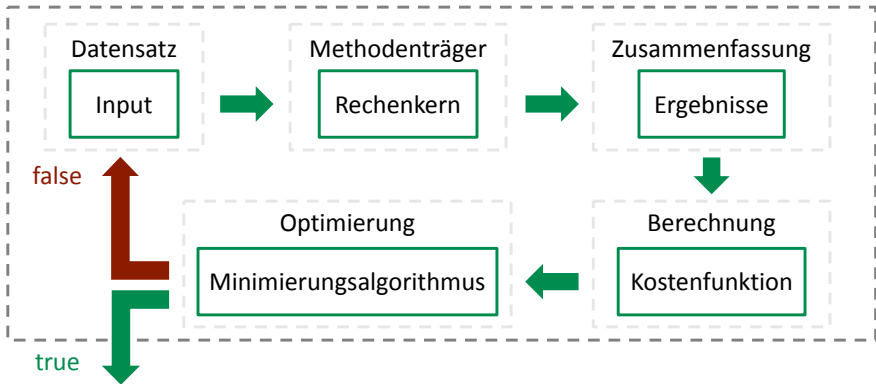


Abbildung 5: Optimierungsablauf

Mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus soll im nächsten Schritt eine Baureihenentwicklung entworfen werden. Dazu sollen die idealen Inputparameter für die jeweiligen Optimierungsfälle, unter Vorgabe von Druck und Massestrom, als Funktionen erstellt werden. Diese Funktionen sollen genutzt werden, um mit Hilfe einer Optimierungsgröße wie beispielsweise der Festigkeit und unter Vorgabe der Betriebsgrößen wie Druck sowie des Massestromes einen idealen Verdichter zu ermitteln.

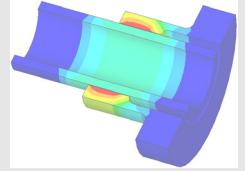
Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind bisher ein Simulationsprogramm und Empfehlungen für Geometriekombinationen entstanden. Das Simulationsprogramm erlaubt Überschlagsrechnungen zu dem neuartigen Verdichter. Im weiteren Verlauf des Projektes ist eine Baureihenentwicklung des Verdichters mit optimalen Geometrien geplant. Dadurch sollen zum einen Empfehlungen für die Konstruktion des Verdichters entstehen und zum anderen weiterhin Überschlagsrechnungen für spezifische Konstruktionsparameter innerhalb des Simulationsprogramms ermöglicht werden. Nach Abschluss des Forschungsprojektes steht dem Industriepartner eine als stand-alone lauffähige Software zur Verfügung.

Kooperationspartner



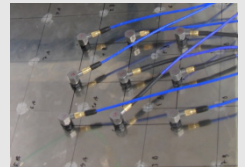
Konstruktion und Berechnung von
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



Hochschule und Kontakte



Freilauf-Prüfstandssteuerung mit einem Gantner Instruments Q.Gate-Controller (1)

Martinewski, V.

Neu zu untersuchende Bauteilbelastungen erfordern angepasste oder neu konstruierte Prüfstände. Im Bereich der Freiläufe wurden am IMW bereits Prüfstände zur Berücksichtigung von Axial- und Radiallasten zusätzlich zum Sperrmoment aufgebaut. Die Prüfstände bestehen aus einer Antriebseinheit und einer Messeinheit, die jeweils mittels Computer bedient werden. Der Prüfablauf erfolgt derzeit größtenteils manuell. Um die Bedienung zu erleichtern und damit den Kreis potentieller Nutzer zu vergrößern, wird exemplarisch ein Steuerprogramm entwickelt, welches die Anforderungen an die durchzuführenden Schaltversuche berücksichtigt. Genutzt wird hierfür der PAC (Programmable Automation Controller) des verwendeten Q.Gate-Messverstärker-Controllers.



For the examination of individualized loads, new test rigs are constructed. Regarding freewheel clutches, different test rigs already have been set up considering axial or radial loads in addition to the clamping torque. The test procedure is currently mostly manual. In order to simplify the operation and thus increase the circle of potential users, a control program is developed. For this, the PAC of a Q.Gate-Controller is used.

Einleitung

Die am Institut für Maschinenwesen aufgebauten Freilauf-Prüfstände wurden von den Mitarbeitern eigens konstruiert und an die zu realisierenden Belastungszustände individuell angepasst. Da sowohl die Auswahl der Antriebs- und Messeinrichtungen, sowie die Erstellung der Steuerprogramme in Eigenregie erfolgte, liegt die Kenntnis zur richtigen Bedienung nur bei einigen wenigen Personen. Die an Forschungsinstituten gängige hohe Fluktuation der Mitarbeiter verstärkt diesen Effekt. Mit der Erstellung eines automatisierten Prüfablaufs soll diesem Zustand entgegengewirkt werden, indem ein automatisierter Prüfablauf für Freilauf-Schaltversuche programmiert wird. Um die Anzahl benötigter Software auf einem Minimum zu halten, wird die gesamte Steuer- und Messeinheit mit Hilfe des Ganter Instruments Q.Gate (T-Version) Messcontrollers erstellt, welcher über digitale Ein- und Ausgänge mit dem Servomotor-Umrichter kommuniziert.

Um die volle Performance auszunutzen, wird in der Regel eine wegbasierte Steuerung gewählt. Dies hat den Effekt, dass bei Vorliegen erster Ermüdungserscheinungen das resultierende Drehmoment bei gleichem Verdrehweg sinkt. Das automatische Nachjustieren des Verdrehwegs, sowie das Erkennen einer Grenzwertvorgabe sind zentrale Elemente des zu realisierenden Prüfprogramms.

Die Realisierung soll aufbauend in drei Schritten erfolgen:

1. Lastwechselzähler und Drehmomentmittelwertbildung
2. Automatische Nachjustierung der Verdrehwegsteuerung
3. Vollautomatischer Prüfbetrieb nach Lastvorgabe und Grenzwertdefinition

Anforderungen

Die Lastgröße für die Untersuchung von Freilaufen stellt stets ein Drehmoment dar. Dieses wird im Freilauf durch die spezielle Klemmgeometrie erzeugt, sobald ein Verdrehweg zwischen dem Innen- und Außenring des Freilaufs vorliegt. Dieser Verdrehweg wird derzeit hauptsächlich über Servomotoren realisiert, indem ein Vorgabebeweg alternierend angefahren wird. Um das vollständige Entklemmen zu gewährleisten, ist der Rückfahrweg einige wenige Grad größer zu definieren als in Lastrichtung. Ist durch Ermüdungserscheinungen eine Abnahme des Drehmomentwerts zu vernehmen, sind Verdrehwege in Last- und Leerlaufrichtung anzupassen.

Sind die Freilauf-Prüfkammern mit Schmieröl gefüllt ($\frac{1}{3}$ -Teilfüllung) ist für die sichere Gewährleistung einer vollständigen Schmierleistung je Kontakt eine Lastwechselzahl zu definieren, in der der Prüfstand in Leerlaufrichtung einige Umdrehungen verfährt, um eine Durchmischung des Schmiermittels zu erzeugen.

Weitere Anforderungen an das Prüfprogramm sind:

- Grenzwertüberwachung - Drehmoment und Verdrehweg (Lastrichtung)
- Reset-Funktion für Zähler
- Vorgabe versuchsspezifischer Daten
 - Auftrags-/Projektbezeichnung
 - Versuchsnummer
 - Prüflingsdetails
- Berücksichtigung der Einbaurichtung (Rechtslauf/Linkslauf)
- Einfache Bedienung (Erstellen eines Bedienfelds)

Programmablauf

Das Zusammenspiel der Komponenten und die benötigten Vorgabe- und Ausgabegrößen ist der nachfolgenden Abbildung und Tabelle zu entnehmen.

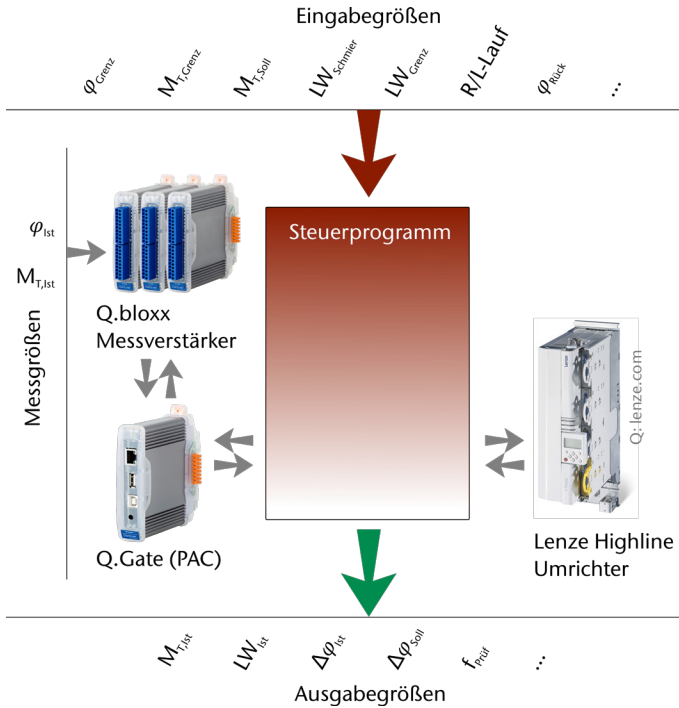


Abbildung 1: Übersicht beteiligter Komponenten und zu berücksichtigender Größen.

Die Eingabegrößen (φ_{Grenz} , $\varphi_{Rück}$, $M_{T,Grenz}$, $M_{T,Soll}$, $LW_{Schmier}$, LW_{Grenz} , R/L-Lauf, ...) sind vom Bediener zu definieren. Diese resultieren aus den Einbaubedingungen des Prüfkörpers, der Laststufe, sowie den Abbruchkriterien und werden als Vorgabewerte vom Prüfprogramm aufgenommen. Die für die Freilauffunktion relevanten Messgrößen (φ_{Ist} , $M_{T,Ist}$) werden von Messverstärkern aufgenommen und stehen zur Verarbeitung im Q.Gate zur Verfügung. Abhängig der Messgrößen wird über Entscheidungen des Steuerprogramms mit dem Umrichter kommuniziert. Dieser wiederum meldet Zustandssignale an das Steuerprogramm zurück. Die Kommunikation einzelner Komponenten erfolgt über verfügbare digitale und analoge Ein- und Ausgänge.

Ein PC ist nur für die Definition der Vorgabegrößen notwendig, das System läuft nach der dritten Realisierungsstufe völlig autark.

Tabelle 1: Übersicht zu berücksichtigender Vorgabe, Mess- und Ausgabe-größen

$M_{T,Soll}$	Sollmoment	φ_{Grenz}	Grenzverdrehwinkel
$M_{T,Grenz}$	Grenzmoment	$\varphi_{Rück}$	Rückstellverdrehwinkel
$M_{T,Ist}$	Ist-Moment	φ_{Ist}	Ist-Verdrehwinkel
$LW_{Schmier}$	Schmierlastwechsel	$\Delta\varphi_{Ist}$	Ist-Verdrehwinkelabweichung
LW_{Grenz}	Grenzlasterwechsel	$\Delta\varphi_{Soll}$	Soll-Verdrehwinkelabweichung
LW_{Ist}	Ist-Lastwechsel	$f_{Prüf}$	Prüffrequenz
R/L-Lauf	Rechts-/Linkslauf		

Realisierung Lastwechselzähler

Der Lastwechselzähler erfolgt derzeit über eine Drehmomentüberwachung in dem Umrichter des Antriebs. Dieser hat den Nachteil, dass bei geringen Momenten und hohen dynamischen Schaltvorgängen eine Zählung der Lastwechsel teilweise nur ungenau stattfindet. Die Zählung bereits durchgeführter Schaltungen soll daher über das tatsächlich wirkende Moment erfolgen. Das Signal der Drehmomentmessstelle wird von den Q.bloxx-Messverstärkern erfasst und steht für die Verarbeitung zur Verfügung.

Um eine Unabhängigkeit der Einbausituation und des Drehmomentvorzeichens zu gewährleisten und dem Nutzer damit Entscheidungen abzunehmen wird zunächst der Absolutwert des Drehmoments gebildet. Dieser wird anschließend mehrfach weiterverarbeitet und ausgewertet.

Erreicht der Drehmomentaufbau seinen Peak-Wert, wird dieser als Max-Wert gehalten. Fällt das Drehmoment wieder ab (Größer-Kleiner-Vergleicher), wird ein Statussignal an einen Zähler gesendet, welcher die Anzahl der Positiv-Flanken des Größer-Kleiner-Vergleichs zählt. Definiert werden insgesamt zwei Zähler: ein Zähler für die Messung der bereits durchgeführten Schaltungen, ein weiterer Zähler für die Messung der Schmier-Lastwechselzahl. Letztere wird nach Erreichen eines Vorgabewerts wieder zurückgesetzt und startet die Zählung von vorn.

Das weitere Unterschreiten eines prozentual fest definierten Drehmoments (20% der Vorgabelast) setzt die Maximalwertbildung zurück und startet den Abfragezyklus erneut.

Realisierung Drehmoment-Mittelwertbildung

Bei weggesteuertem Prüfablauf kann aufgrund von Ermüdungserscheinungen das resultierende Drehmoment über der Zeit sinken. Zur Nachjustierung ist daher das Erkennen dieses Abfalls zwingend notwendig.

Während einer Lebensdaueruntersuchung von Freiläufen schwankt das Drehmoment in einem gewissen Bereich aufgrund von ggf. abweichenden Schmierzuständen, Toleranzfehlern oder einem schlupfbedingt verzögerten Eingriff. Um nicht für jeden Lastwechsel eine Justage durchzuführen, wird ein Zeitbereich definiert, in dem die Mittelwerte der Peaks gebildet und mit der Sollvorgabe abgeglichen werden. Liegt der Mittelwert in einem Toleranzbereich erfolgt keine Nachjustierung. Überschreitet der Mittelwert das Toleranzband, wird der Verdrehweg vorzeichengerecht angepasst. Eine Online-Datenverarbeitung, wie sie mit potenten Auswerteprogrammen möglich ist, kann der Q.Gate-Controller leider nicht mit der gleichen Performance bieten. Zur Realisierung der Mittelwertbildung des Drehmoments und der Anzeige eines abweichenden Verhaltens wird daher im ersten Schritt ein zielführender Umweg gewählt.

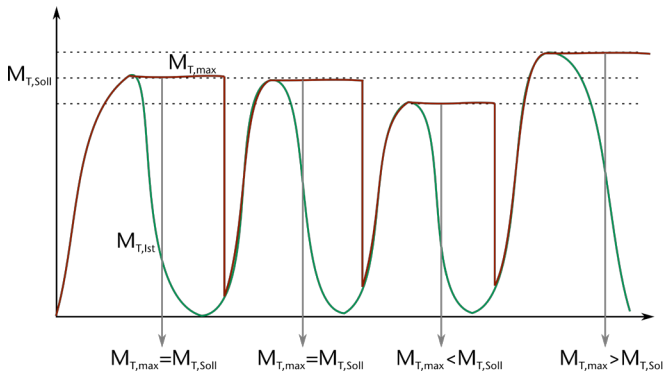


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Drehmoment-Mittelwertbildung

Zur Mittelwertbildung wird je Schaltzyklus der Vergleich zwischen Vorgabe- und Maximalwert gebildet. Liegt der Maximalwert über dem der Sollvorgabe, wird ein Statussignal an einen Zähler geleitet. Nach einer fest definierten Anzahl an Schaltungen (derzeit $LW_{\text{Mittelwert}} = LW_{\text{Schmier}}$) erfolgt ein Vergleich des Zählerwerts mit dem Zählervorgabewert. Beträgt der Zählerwert genau die Hälfte des Vorgabewerts, schwankt das Drehmoment genau um das Sollmoment. Liegt der Zählerwert unter der halbierten Vorgabe wird das Sollmoment nicht mehr erreicht und es erfolgt ein Signalfluss vom Controller zum Umrichter, um einen Justagevorgang anzustoßen. Im umgekehrten Fall (Zählerwert $> \frac{1}{2}$ -Vorgabewert) ist das Ist-Moment zu groß (z.B. Verspannung des Systems durch Erwärmung) und muss ebenfalls angepasst werden. Zum Abgleich wird ein Toleranzband von $\pm 5\%$ des Sollmoments definiert.

Zusammenfassung

Die ersten Schritte zur Vereinfachung der Bedienung eines Freilauf-Lebensdauerprüfstands wurden durchgeführt und vorgestellt. Die Verarbeitung und Auswertung des Drehmoment-Istwerts ermöglicht die Realisierung eines kontinuierlichen Lastwechselzählers sowie den Anstoß eines Sonder-Programmablaufs zur gleichmäßigen Verteilung des Schmiermittels.

Da am Institut für Maschinenwesen diese Kombination aus Antriebs-Umrichter und Messverstärker/Controller-System häufiger verwendet wird, können Teilrealisierungen ebenfalls auf weitere Prüfstandskonzepte übertragen werden.

Ausblick

Die Realisierung der Schritte 2 und 3 ist in der Ausarbeitung wesentlich umfangreicher und fehleranfälliger. Für die ordnungsgemäße Durchführung der Justage gilt es, das herstellerseitig vordefinierte Steuerprogramm der Antriebe umzuschreiben. Hier steht vor allem die richtige Definition und Verwendung der digitalen Ein- und Ausgänge im Vordergrund, mit ständigem Blick auf die Erhaltung automatischer Abschaltvorgänge im Fall einer Störung oder Überlast.

Die verbleibenden Realisierungsschritte werden in naher Zukunft umgesetzt und das Ergebnis in der zukünftigen Institutsmittteilung veröffentlicht.

ZIM-Projekt AZEMA - Ergebnisse des Projektes zur Entwicklung einer Anlage zum Zerlegen von Elektrobauteilen mit metallischer Außenhülle



Prumbohm, M.

Am IMW ist das ZIM-Projekt zur Entwicklung und Bau einer Anlage zum maschinellen Zerlegen von blechumhüllten Bauteilen, vor allem aus dem Elektrobereich, erfolgreich abgeschlossen worden. Auch komplexe Geräte wie Steuergeräte aus Fahrzeugen lassen sich mit dem Verfahren öffnen und zerlegen. Die Ergebnisse erlauben für den Projektpartner die Umsetzung im Unternehmen.

At IMW, the ZIM project for the development and construction of a plant for the mechanical dismantling of sheet metal-coated components, especially from the mechanical sector (WEEE), has been successfully completed. The results will allow the partner company to put the project into practice. Even complex devices such as control units can be opened and disassembled with the process.

Ansatz und Ziele

Pre-Shred-Prozesse werden mit ihrer Vorzerkleinerung als Verfahren zur Effizienzsteigerung des Recyclingprozesses eingesetzt. Für diese vorgeschaltete Position des Pre-Shred soll im Folgenden ein maschinelles Zerlegungsverfahren vorgestellt werden, das am IMW erdacht hat. Im Rahmen eines ZIM-Projektes wurde es entwickelt und erprobt. Dabei erfolgt anstatt einer Volumenreduzierung des Bauteils, wie sie in Zuge einer herkömmlichen Grobzerkleinerung erfolgt, eine Vergrößerung des Bauteilvolumens durch eine Zerlegung und Öffnung der Bauteilstruktur. Eine erleichterte Trennung und Aufkonzentration der im Bauteil enthaltenen Wertstoffe, bilden die übergeordneten Ziele dieser Prozessidee, um damit schließlich eine Verbesserung der Recyclingtiefe zu erreichen.

Der Ansatz basiert auf dem Prinzip von Profilwalzenreißern, also zweier gegenläufig rotierenden, parallel angeordneten Walzen, die mit Profilen bzw. Werkzeugen besetzt sind. Entsprechend der Zielsetzung lässt sich die Hauptfunktion mit „Bauteilstruktur zerlegen“ beschrieben. Diese wird in die vier folgenden Unterfunktionen unterteilt:

1. „Blechkülle durchdringen (Schneiden)“
2. „Eingriff bilden“
3. „Eingriff halten (Zerlegen)“
4. „Abstreifen“

Zur Gestaltung der Profilwerkzeuge als Kernelement des Prozesses, kommt eine Reihe von unterschiedlich und funktionsgerecht gestalteten Werkzeugen in Betracht. Im Folgenden werden die Anforderungen an diese aufgezeigt und anschließend an Hand einiger Varianten sowie den zu erwarteten Vor- und Nachteile mit den Ergebnissen aus der Praxis verglichen.

Durchführung

Der geplante Prozess der Zerlegung von Elektrobauteilen mit metallischer Außenhülle basiert grundlegend auf dem Prinzip von Profilwalzenreißern. Dieses wird seit vielen Jahren beispielsweise in der Zerkleinerung von weicher Braunkohle verwendet [1]. Das Anlagenprinzip wurde im Rahmen des Projektes hinsichtlich der Drehzahl, der Walzenabstände und als Schlüsselemente besonders der Werkzeugform und –anstellung verändert, um die Funktionsweise des erdachten Anlagenprinzips der AZEMA (Anlage zum Zerlegen von Elektrobauteilen mit metallischer Außenhülle) nachzuweisen und die Zielp Parameter für eine industrielle Markteinführung zu identifizieren. Der maschinelle Zerlegungsprozess arbeitet wie beschrieben mit Hilfe zwei parallel angeordneter, gegenläufig rotierender Walzen, die mit Werkzeugen bestückt sind. Diese sollen in die Blechkülle der Elektroteile einschneiden, in der Blechkülle in einen Eingriff gelangen und diesen im Zuge der Rotation halten und somit das Bauteil zerlegen. Die wesentlichen Bestandteile der Anlage sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Schräge Draufsicht auf die Versuchsanlage mit voller Werkzeugbestückung und voller Schneidlänge

Entsprechend der Funktionen lässt sich der Zerlegungsprozess in die folgenden Phasen gliedern, siehe Abbildung 2.

- Phase I: Bauteilzuführung, Kontakt mit den Werkzeugen und Eindrücken der Blechhülle
- Phase II: Durchdringen der Blechhülle durch Schneiden (entspricht der Unterfunktion 1 des Werkzeugs), Werkzeuge geraten in Eingriff (Unterfunktion 2 des Werkzeugs)
- Phase III: Zerlegung mit fortschreitender Rotation (Unterfunktion 3 des Werkzeugs)
- Phase IV: Abstreifen der Blechreste aus dem Eingriff der Werkzeuge (Unterfunktion 4 des Werkzeugs)



Abbildung 2: Die Phasen des Zerlegungsprozesses entlang des Weges der zu zerlegenden Bauteile

In der Phase I wird durch die Lage zwischen den Werkzeugen und der Bauteilhülle sowie der Blechbeschaffenheit die Grundlage für die Belastungsgrößen der folgenden Phase II beeinflusst. Dabei erfahren die Werkzeuge als wesentliche Elemente der Anlage in Phase II beim Durchdringen der Blechhülle die höchsten Beanspruchungen des Prozesses. Das Einschneiden lässt sich zur Abschätzung der auftretenden Kräfte mit den Vorgängen des Einschneidens aus der Fertigungstechnik vergleichen.

In der entsprechenden Literatur wird die Formel 1 zur Berechnung der Schneidkraft verwendet, /2, 3/. Dabei entspricht l der Schneidlänge, s der Wandstärke des zu durchtrennenden Bleches und der Schneidwiderstand k_s ist ein Werkstoffwert, der aus Multiplikation der Zugfestigkeit mit einem Korrekturfaktor besteht.

$$F_s = l \cdot s \cdot k_s \quad 1$$

Die Parameter der Schneidlänge und der Wandstärke haben also einen großen Einfluss auf die Schneidkräfte und damit auf die erfolgreiche Durchführung der Phase II des AZEMA-Pre-Shred-Prozesses. Diese Formel gilt für glatte Stanzwerkzeuge, die senkrecht auf das Bauteil treffen. Mit angeschnittenen Werkzeugen reduziert sich die Schneidkraft um mindestens zwei Drittel im Vergleich zu flachen Stanzwerkzeugen /2/. Die Lage der Werkzeuge im Moment des Einschneidens zum Blech wirkt sich auf den Beanspruchungszustand im Werkzeug aus. Die vereinfachte Formel 1 aus der Fertigungstechnik basiert auf einem einachsigen Spannungszustand hervorgerufen aufgrund reiner Druckbeanspruchung. Mit der Abweichung von einer rechtwinkligen Position des Werkzeuges zum Blech ergibt sich ein zweiachsiger Spannungszustand. Dieser ergibt in Abhängigkeit des Winkels der Schneidkraft eine zunehmend größer werdende Hauptspannung in y-Richtung. Diese wird durch ein wachsendes Biegemoment hervorgerufen, welche schließlich im theoretischen Grenzfall von 0° Auftreffwinkel zwischen Werkzeug und Blech vollständig der Schneidkraft F_s entsprechend würde. Bei dem auf das Schneiden folgende Zerlegen in Phase III, ist an der Werkzeugeinspannung ebenfalls mit einem Biegemoment aufgrund des Widerstandes des Blecheingriffs und der Bauteilstruktur gegen das „Auseinanderziehen“, also dem Zerlegen zu rechnen. Allerdings wurde dieses vorab als deutlich geringer als beim Einschneiden eingeschätzt, was sich in den Versuchsmessungen bestätigt hat. Das Zerlegen soll durch ein Versagen der Fügeelemente und durch ein Abscheren des Blechwerkstoffes aufgrund hoher Schubbeanspruchungen erfolgen. Nach dem Schritt der Zerlegung ist auch mit einem Ausreißen der Werkzeuge aus dem Eingriff zu rechnen, spätestens am Abstreifer sollte dies geschehen. Die Blechreste werden regelrecht aus dem Eingriff der Werkzeuge geschält bzw. geschnitten.



Abbildung 3: Eingriffstelle sowie Versagen der Blechhülle an intaktem Fügeelement (Schraube)

Ergebnisse

Für die Zerlegung von Bauteilen mit Blechhülle haben sich die folgenden Parameter als zielführend erwiesen:

Drehzahlen: Um die Zähigkeit der Blechhülle ausnutzen zu können und damit den Eingriff zu verbessern, werden gute Ergebnisse im niedrigen Drehzahlbereich von 6 – 8 U/min erzielt. Im Bereich unter diesen Drehzahlen steigt das benötigte Drehmoment stark an, im darüber liegenden Bereich wächst die Gefahr des Ausreißen der Werkzeuge aus der Blechhülle. Ebenfalls als vorteilhaft hat sich eine asynchrone Einstellung der Drehzahlen erwiesen. Gerät die Hülle auf beiden Seiten in den Eingriff, wirkt so zusätzlich mit der Spaltvergrößerung im Zuge der Rotation, noch eine scherende Komponente auf die Bauteilhülle. Die Bauteilstruktur wird so zuverlässiger zerlegt.

Spaltweite: Der Abstand zwischen den beiden gegenläufig rotierenden Walzen wird auch als Zerlegespalt bezeichnet. Dieser darf nicht zu groß sein, um bei sehr nachgiebigen Bauteilen das Durchdringen der Werkzeuge in die Bauteilhülle zu gewährleisten oder gar ein Durchrutschen zu vermeiden. Ein zu enger Zerlegespalt wiederum benötigt ein deutlich höheres Drehmoment und begünstigt das Steckenbleiben. In Abhängigkeit von der Werkzeuglänge und der Werkzeugposition ist ein Mindestspalt zwischen den Walzen erforderlich, um Beschädigungen an den Werkzeugen zu verhindern. Aufgrund der wechselnden Bauteilabmaße wird die Zerlegespalteinstellung in Abhängigkeit von der Bauteilbreite angegeben. Diese sollte 50 % der Bauteilbreite betragen, die Toleranz sollte im Bereich von $\pm 5\%$ liegen, um die oben beschriebenen Effekte zu vermeiden.

Werkzeugposition: Wie in Abbildung 4 erkennbar ist, werden die Werkzeuge in einem Winkel zwischen der gedachten Tangente am Umfang der Walzen und deren Orthogonalen angeordnet. Als Kompromiss zwischen einer flachen Position nah an der Tangente und einer senkrechten Position hin zur Orthogonalen der Tangente, hat sich ein Anstellwinkel von 45° erwiesen. Für flachere Anstellwinkel steigt der Energiebedarf stark an, die Werkzeuge berühren mit der Schneidfläche auf die Bauteilhülle. Je näher die Werkzeuge hin zu einer senkrechten Position aufgestellt werden, desto geringer wird die aufzuwendende Schneidkraft F_S . Allerdings nimmt mit zunehmendem Positionswinkel die Neigung zum Eingriff ab, bis hin zu einem „Löchern“ der Bleche, ohne in Eingriff zu geraten.

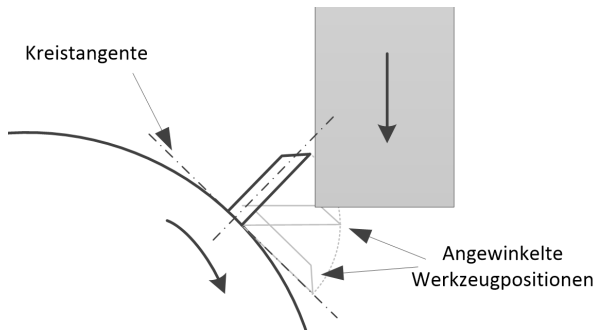


Abbildung 4: Mögliche Werkzeugpositionen

Gemäß der Formel 1 für die Schneidkraft nimmt die aufzubringende Kraft in Abhängigkeit von der Länge der Schneide zu. Mehr Werkzeuge bedeuten längere Schneiden und damit auch eine höhere Schneidkraft und ein größeres Drehmoment bzw. mehr Leistung als direkte Folge. Für die Prozessqualität ist ein zuverlässiger, haltbarer Eingriff jedoch ausschlaggebend, und dieser profitiert von möglichst breiten Werkzeugen bzw. deren Schaftbreite. Versuche mit reduzierter Werkzeuganzahl haben keinen wesentlichen Vorteil durch eine geringere Schneidkraft gegenüber den Folgen eines verringerten Eingriffs und der geringeren Wahrscheinlichkeit des Eingriffs aufgrund der geringeren Werkzeuganzahl gezeigt. Daher wird Schneidlänge je Werkzeugreihe von mindestens 10 % der Bauteillänge empfohlen.

Werkzeuggestalt: Die Gestaltung der Werkzeuge muss den Widerspruch der beiden Funktionen „Schneiden“ und „Eingriff halten“ vereinen. Als Lösung bieten keilförmige Elemente mit einem Schneidenwinkel von 30° , einer entsprechend scharfen Schneidkante und einer Breite von 10 mm mit abgerundeten Seitenkanten an.



Abbildung 5: Schneidelemente in der Erprobung: 5 mm, 10 mm und 15 mm Länge der Schneiden. In der Mitte: Gehärtetes Material führt zur Erhöhung der Standfestigkeit der Werkzeuge

Energieverbrauch: Im unmittelbaren Vergleich mit herkömmlichen Pre-Shred-Zerkleinerungsanlagen wird mindestens 1/10 der Antriebsleistung benötigt. Dieser signifikante Unterschied lässt ein hohes Einsparpotential erwarten. Um ein vollständiges Urteil über die Einsparpotentiale machen zu können, ist das Durchlaufen einer vollständigen Prozesskette, mit den notwendigen, nachfolgenden Aufbereitungsschritten, die unter Umständen auch weitere Zerkleinerung vorsehen, notwendig.

Ausblick

Die Zerlegung von elektronischen Bauteilen aus dem WEEE-Bereich, wie Festplatten und KFZ-Steuergeräte, wurde wie gezeigt anhand von praktischen Versuchen untersucht. Um Antworten für die Frage nach weiteren Anwendungsbereichen zu finden, wird mittels Literaturdaten das Potential der jeweiligen Bauteile abgeschätzt und ein notwendiger Durchsatz für die Anlage beziffert. Abschließend soll die mögliche Anwendung der vorgestellten maschinellen Pre-Shred-Zerlegung für Altfahrzeugkarosserien beurteilt und notwendige Anpassungen sowohl für die Prozessidee als auch für die bestehende Lösung, diskutiert werden.

Zusammenfassung

Das Projekt zur Entwicklung einer automatischen Zerlegungsanlage, für die Position einer Pre-Shred-Anlage im IMW ist abgeschlossen. Das Verfahren funktioniert für Bauteile mit duktiler Blechhülle, wie beispielsweise Steuergeräte aus dem KFZ-Bereich oder Festplatten. Die Verfahrensweise wird im Beitrag vorgestellt und die ermittelten, für die Versuchsanlage grundlegenden Parameter werden in der Ergebnisdarstellung präsentiert. Diese tragen zu einer stabilen und zuverlässigen Prozessqualität bei. Abschließend wird ein Ausblick für das Vorgehen zur Erschließung weiterer Anwendungsgebiete der Prozessidee gegeben.

Besonderer Dank gilt:

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Literatur

- /1/ Höfl, K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Berlin Heidelberg New York Tokyo : Springer-Verlag, 1986
- /2/ Romanowski, W. P.: Handbuch der Stanzereitechnik. 5. Auflage. Berlin : VEB Verlag Technik,, 1965
- /3/ Hellwig, W.; Kolbe, M.: Spanlose Fertigung Stanzen. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien, 2012

Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Wälz- und Gleitlagern bei stoßartiger Anregung



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

Durch den Ölfilm eines hydrostatischen Gleitlagers kann das Feder-Dämpfer-Verhalten eines mechanischen Systems beeinflusst werden. Im Rahmen einer Industrieanfrage wurde untersucht, wie sich das dynamische Verhalten des Systems von einer wälzgelagerten zu einer gleitgelagerten Welle verändert. Die Ergebnisse legen nahe, dass das dynamische Verhalten von hydrodynamischen Lagern stark beeinflusst wird.

By using a hydrostatic bearing, the oil film should affect the spring-damper-element of the mechanical system. An analysis of a specific industrial machine provided information, to what extent the dynamic behaviour of the machine would change in comparison to roll bearing. The results suggest that the dynamic behaviour of a mechanical system is highly connected to the behaviour of a hydrodynamic bearing.

Abstract / Motivation

In zahlreichen mechanischen Anwendungen erweisen sich dynamische Reaktionen eines Systems als kritisch für die Qualität des Prozesses und die damit hergestellten Produkte. Der erste Ansatz, die Anregung zu vermeiden, um der Systemreaktion zu entgehen, ist nicht immer eine Option, da zahlreiche Produktionsvorgänge durch eine systemimmanente Anregung erst wirksam werden. Als Beispiel sei hier die Wellenlagerung einer Schredder-Anlage oder eines Mahlwerkes genannt. Das übergeordnete Ziel der Anlage ist das Zerkleinern eines Gutes. Dabei treffen immer wieder Komponenten der Anlage auf das Gut, was zu einer Kräfteinleitung in die Lagerung führt. Die Alternative, diese Kräfteinleitung zu umgehen, ändert das physikalische Wirkprinzip und ist daher als nicht zielführend zu betrachten.

Vorgehen zum Vergleich

Im Rahmen einer Untersuchung an einer Industrieanlage wurde das dynamische Verhalten im wälzgelagerten und im hydrostatisch-gleitgelagerten Zustand

untersucht. Die zugrundeliegende Fragestellung ist, ob ein spezifisches hydrostatisches Gleitlager in der Lage ist, die durch eine impulsartige Anregung eingebrachte Stoßenergie zu absorbieren und somit eine Schwinganregung des Feder-Dämpfer-Systems zu verhindern oder die Auswirkungen zu vermindern.

Der Messaufbau sieht die Aufzeichnungen der Beschleunigungen in der Welle, sowie an den Lagerböcken in zwei radial orthogonalen Raumrichtungen vor. Zur Übermittlung der Beschleunigungsdaten der Welle kommt ein Telemetrie-System zum Einsatz. Der Messaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

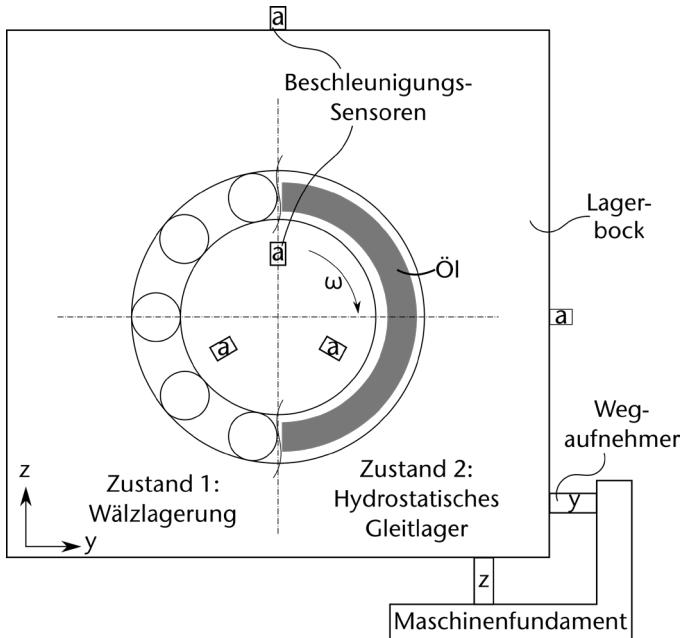


Abbildung 1: Messtechnisches Konzept zur Erfassung der Beschleunigungen und Bewegungen

Aus den Daten kann sowohl eine empirische Übertragungsfunktion der Lagerung errechnet werden, als auch das dynamische Verhalten über der Zeit bewertet werden. An der gemessenen Anlage ist der Lagerbock selbst als Feder-Dämpfer-System angebracht, weshalb auch die Relativbewegungen zum Maschinenfundament aufgezeichnet werden.

Ergebnisse der Messung

Es kann festgestellt werden, dass sich das dynamische Verhalten der Maschine mit dem Austausch der Wellenlagerung stark geändert hat und sich die hydrostatische

Gleitlagerung in erhöhtem Maße als instationär zeigt. Durch den Eingriff in die Feder-Dämpfer-Eigenschaften des Systems lassen nicht nur die Beschleunigungsmessschriebe ein Aufschwingen des Systems erkennen, auch die Auslenkung des Lagerbocks nimmt im direkten Vergleich zu. Diese Erkenntnis gilt allerdings nicht für den gesamten Frequenzbereich.

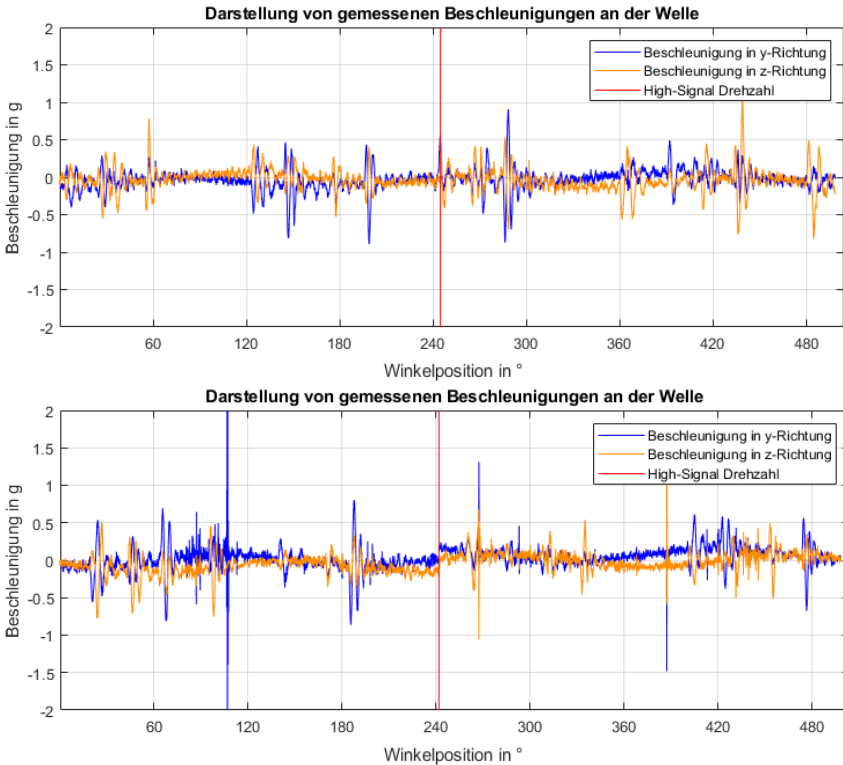


Abbildung 2: gemessene Beschleunigungen der Welle im wälzgelagerten (oben) und im gleitgelagerten (unten) Zustand

Abbildung 2 zeigt die Beschleunigungsverläufe der Welle im wälzgelagerten, sowie im gleitgelagerten Zustand. Die Beschleunigungen wurden mit drei uniaxialen, piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern aufgezeichnet. Diese zeichnen Beschleunigungen um 120° versetzt in radiale Richtung auf. Die gemessenen Daten wurden trigonometrisch mit dem Drehzahlbezug umgerechnet und auf das Maschinenkoordinatensystem bezogen. Die Rotationsachse der Welle wird im Koordinatensystem als x-Achse bezeichnet. Die y- und z-Achse liegen damit radial zur Welle. In den Plots sind jeweils vertikale, rote Linien eingezeichnet. Die Linie markiert die Anregung des Systems. 45° voreilend geschieht prozessbedingt eine Anregung in y-Richtung, 45° nacheilend entsprech-

end eine Anregung in z-Richtung. Es ist zu erkennen, dass sich die Veränderung bei einer Anregung im niederfrequenten Bereich mit größeren Amplituden auswirkt, was deutlich bei der voreilenden Anregung zu erkennen ist.

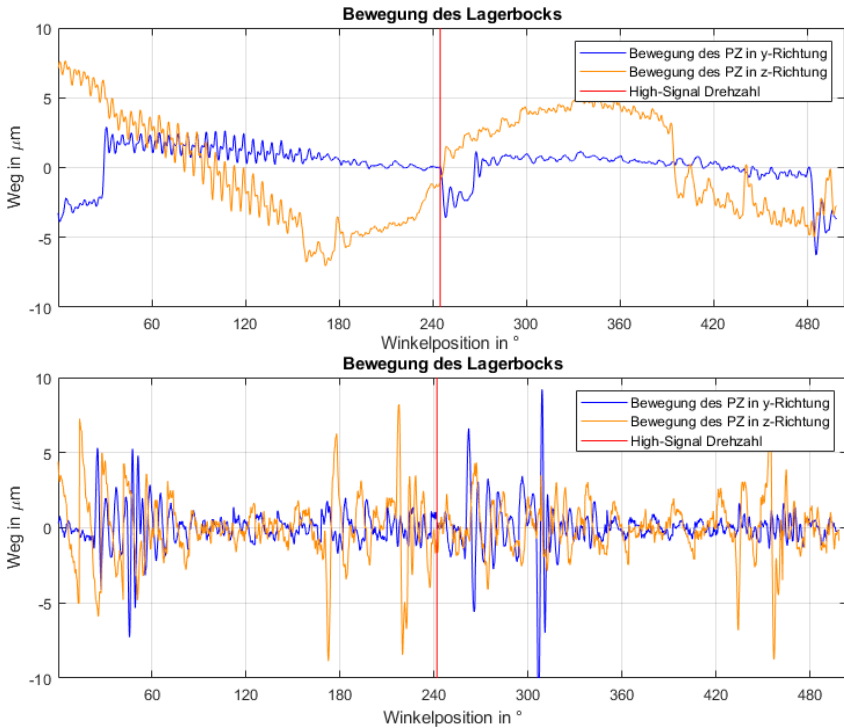


Abbildung 3: Gemessene Bewegungen des Lagerbocks im wälzgelagerten (oben) und im gleitgelagerten (unten) Zustand

Ein weiterer Trend lässt sich auch bei Betrachtung der zurückgelegten Wege erkennen. Hier existiert im wälzgelagerten Zustand eine deutlich ausgeprägte, vollständige Schwingung in z-Richtung zwischen 60° und 420° , also eine Schwingung in der Frequenz der Wellendrehzahl von ca. 1,5 U/s. Auch im gleitgelagerten Zustand taucht diese Schwingung auf, allerdings wird sie von Oberschwingungen überlagert. Einige der Oberschwingungen scheinen so große Amplituden zu haben, dass sich die ursprüngliche Schwingform nur noch erahnen lässt. Die im wälzgelagerten Zustand deutlich zu erkennenden Ausschwingvorgänge kleiner Amplituden lassen sich in Abbildung 3 auch im gleitgelagerten Zustand, z.B. in y-Richtung bei ca. 60° , erkennen. Allerdings zeigt sich die Bewegung des gleitgelagerten Systems vor allem in höherfrequenten Schwingungen im Gegensatz zum wälzgelagerten System.

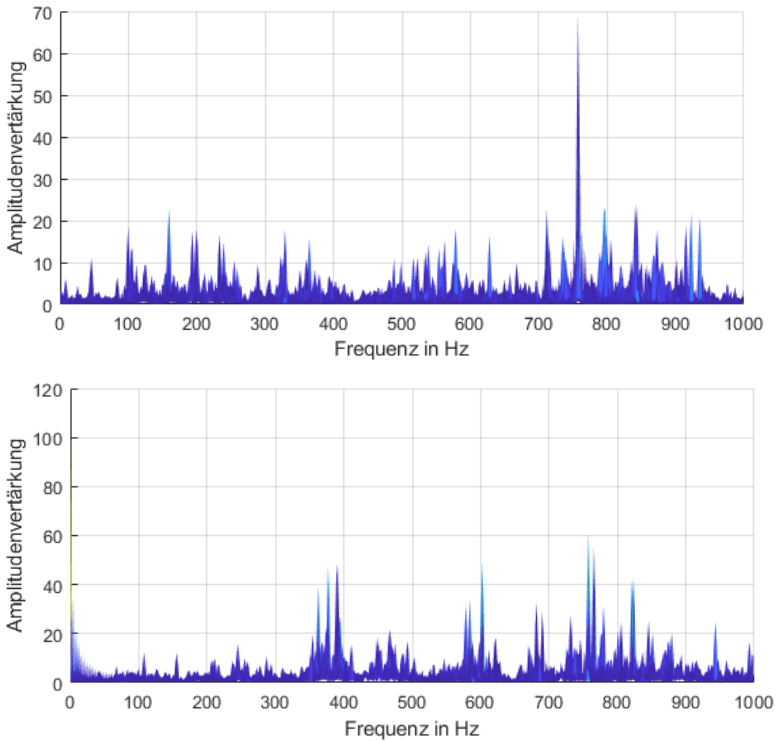


Abbildung 4: *Darstellung des Übertragungsverhaltens von Welle zu Lagerbock (Beschleunigungen) im wälzgelagerten (oben) und gleitgelagerten Zustand (unten)*

In Abbildung 4 ist das Übertragungsverhalten der Beschleunigungen der Welle zum Lagergehäuse dargestellt. Die Abbildung kann herangezogen werden, um zu zeigen, dass die Wirksamkeit der Maßnahme zur Dämpfung von Anregungen in verschiedenen Frequenzbereichen vorhanden ist. Im vorliegenden Fall ist vor allem eine sehr niederfrequente Anregung für die Qualitätseinbußen des hergestellten Produktes verantwortlich. Durch Variation der Spaltgeometrie, der Druckverhältnisse und der Viskosität im Lager kann eine Veränderung der Feder-Dämpfer-Eigenschaften des Lagers erzielt und so das Systemverhalten abgestimmt werden /1/.

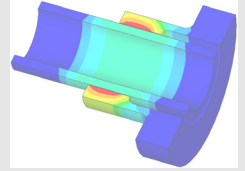
Zusammenfassung

Das ursprüngliche Ziel der Umbaumaßnahme vom wälz- in den gleitgelagerten Zustand war die Elimination von niederfrequenten Schwingungen, die das Prozessergebnis ungünstig beeinflussen. Durch eine maschinendynamische Messung konnte nachgewiesen werden, dass eine Veränderung des dynamischen Verhaltens durch den Austausch der Wälzlager gegen hydrostatische Gleitlager erzielt werden kann. Die Einstellung des dynamischen Verhaltens erfordert allerdings zahlreiche und kostspielige Versuche, da Lagerschalen und Geometrien getauscht und angepasst werden müssen.

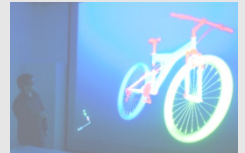
Literatur

- /1/ Weck, M.; Brecher, C.,: Werkzeugmaschinen 2. Konstruktion und Berechnung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

Konstruktion und Berechnung von
Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



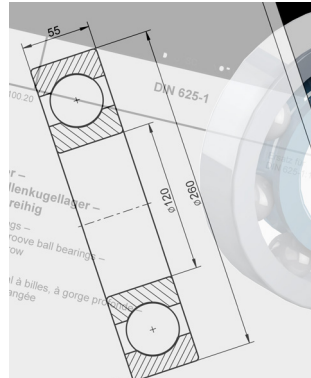
Hochschule und Kontakte



Inverted Classroom - Neue Lehrform für Technisches Zeichnen?

Wächter, M.

Alle Studierenden der ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge sollen die Kompetenz zum Lesen und Erstellen einer Technischen Zeichnung erlernen und anwenden können. Im Selbststudium sind die fachlichen Inhalte zu erarbeiten, die anschließend in Übungsaufgaben zur Anwendung kommen. Der Sachverhalt, dass Studierende leichter Informationen aufnehmen, die auditiv-visuell aufbereitet sind, wurde aufgegriffen und die fachlichen Inhalte in Form von Kurzvideos aufbereitet. Infoblätter je Übung werden zur Verfügung gestellt, die neben den Lernzielen, der Aufgabenstellung, die Mindestanforderungen, die Arbeitsmaterialien, Vorbereitungshinweise, Übungsablauf sowie eine Checkliste zu den in der Übung erforderlichen Kenntnissen beinhalten. Zur Selbstkontrolle der zu erarbeitenden Kenntnisse sind je Übungsaufgabe Online Tests ausgearbeitet, deren erfolgreiche Bearbeitung Voraussetzung zur Teilnahme an den Übungen sind.



All students of engineering courses should be able to learn and apply the competence to read and create a technical drawing. In self-study, the technical contents are to be worked out, which are then applied in exercises. The fact that it is easier for students to pick up information that has been prepared auditory-visually has been taken up and the technical contents have been prepared in the form of short videos. Info sheets are provided for each exercise, which, in addition to the learning objectives, the task, the minimum requirements, the working materials, preparation instructions, exercise procedure and a checklist of the knowledge required in the exercise. Online tests have been developed for each exercise task for the purpose of self-monitoring the knowledge acquired.

Konzept Technisches Zeichnen

Das Modul Technisches Zeichnen/CAD besteht aus den beiden Übungseinheiten „Technisches Zeichnen“ und „CAD“ mit einem Unterrichtsumfang von 3 Semesterwochenstunden (SWS). In der Übungseinheit „Technisches Zeichnen“ (TZ) sind je nach angestrebter Kompetenz in den Studiengängen 4 oder 5 Übungsaufgaben erfolgreich zu bearbeiten. In der Übungseinheit „CAD“ wird die Fähigkeit zur Erstellung einfacher Zeichnungen mit dem 3-D-CAD System Creo vermittelt, ein Test schließt diesen Übungsteil ab (Abbildung 1).

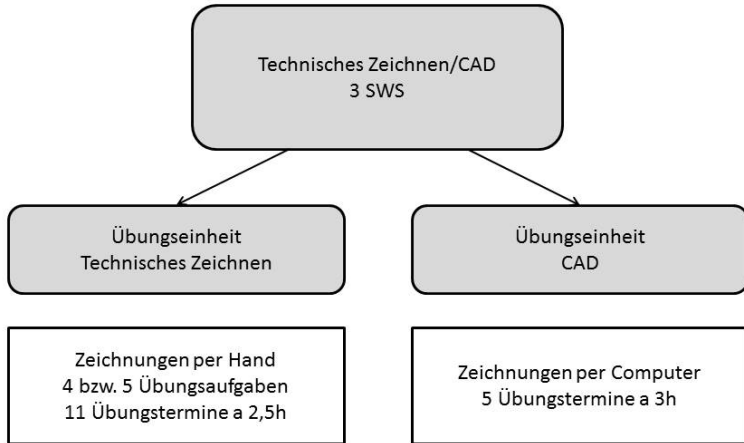


Abbildung 1: Flussdiagramm zum Aufbau des Moduls Technisches Zeichnen/CAD

In nahezu allen ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen sind die Lernziele des Technischen Zeichnens verpflichtend integriert.

An der TU Clausthal wird von alters her beim Technischen Zeichnen das Lehrformat der Übung favorisiert.

Heute konzentriert sich die Ausbildung der Studierenden auf die wichtigsten Regeln zum Erstellen und Lesen von Zeichnungen, sowie auf eine Grundlagenausbildung in einem 3D-CAD System.

Eine Technische Zeichnung ist trotz moderner Computerdarstellungen nach wie vor in den Ingenieurwissenschaften **das** universale Kommunikationsmittel, es ist die Sprache des Ingenieurs. Daraus resultiert, dass in der Regel jeder Studierende in einem ingenieurwissenschaftlichen Studiengang diese Sprache erlernen muss, dabei ist die erforderliche Wissenstiefe unterschiedlich. In einigen Studiengängen soll der Studierende die Befähigung erwerben, eine technische Zeichnung lesen zu können, in anderen Studiengängen soll der Studierende die Kompetenz besitzen, ein technisches Problem bzw. einen Lösungsvorschlag in Form einer Handskizze bzw. Zeichnung darzulegen. Die vollständige Darstellung einer komplexen Baugruppe als Zusammenbauzeichnung incl. aller notwendigen Einzelteilzeichnungen ist nicht Gegenstand dieses Moduls. Für die Studierenden im B. Sc. Maschinenbau erfolgt dann diese Vertiefung im Modul Maschinenelemente im 3. und 4. Fachsemester.

Lehrkonzept Inverted Classroom

Die Ausbildung der Studierenden an Hochschulen geht einher mit unterschiedlichsten Veränderungen. Blended Learning, Digitalisierung in der Lehre, Learning by Doing, Social Learning, Action Learning, Inverted Classroom, Web-based Training, Computer-based Training, Game-based Learning, Virtual Classroom, eLearning oder Constructive Alignment sind nur einige Schlagworte.

Beim Technischen Zeichnen handelt es sich um das Handwerkzeug des Ingenieurs also eine außerordentlich praktische Tätigkeit, so dass aus Institutssicht kein Frontalunterricht in Form einer Vorlesung geeignet ist. An anderen großen Hochschulen wird dies teils anders umgesetzt. Das Erlernen der handwerklichen Fähigkeiten erfolgt interaktiv nach dem Lehrkonzept des Inverted Classroom kombiniert mit einer tutoriellen Unterstützung durch fachdidaktisch ausgebildete Tutor*innen nach dem Prinzip der minimalen Hilfe.

Im Rahmen der verpflichtenden Einführungsveranstaltung soll das Interesse für dieses Werkzeug bei den Studierenden geweckt werden, indem an Beispielen seine Bedeutung als grundlegendes Verständigungsmittel des Ingenieurs verdeutlicht wird. Das Skript ist als Nachschlagewerk konzipiert. Hier sind die wichtigen Regeln (z.B. Linienarten, Strichstärken, Anordnung der Ansichten, Maßstäbe, etc.), die bei der Erstellung einer technischen Zeichnung zu beachten sind, zusammengetragen. Das Skript wird ergänzt um ein ausführliches Informationsblatt zur Veranstaltung mit Hinweisen zu den Lernzielen, der Übungsdurchführung, den Übungsterminen, den erforderlichen aufgabenspezifischen Arbeitsmaterialien und den im Selbststudium zu erarbeitenden Kapiteln im Skript. Seit dem letzten Wintersemester werden im Lernmanagementsystem Stud.IP unterstützende Arbeitsmaterialien und Infoblätter pro Übungseinheit bereitgestellt. Das übungsspezifische Infoblatt enthält Angaben zur Aufgabenstellung, zu den Lernzielen der Übungseinheit, den Mindestanforderung, den Arbeitsmaterialien, dem Übungsablauf sowie Vorbereitungshinweise, ferner eine Checkliste zu den in der Übung erforderlichen Kenntnissen und Fähigkeiten. Die Checkliste dient der Selbstkontrolle sowie als Arbeitsanleitung, wie die angeeigneten Kenntnisse angewendet werden sollen. In der wöchentlichen Sprechstunde können Fragen zu den entsprechenden fachlichen Lerninhalten gestellt werden. Durch die Transparenz der Lernziele soll den Studierenden die Selbststeuerung ihres Lernprozesses erleichtert werden und diese motiviert werden, sich optimal auf die anstehende Übungseinheit vorzubereiten. In den Übungsstunden stehen zusätzlich noch Bauteilmodelle zur Verfügung, die eine weitere Hilfestellung bei der Bearbeitung der Übungsaufgaben bieten.

Die aufgabenrelevanten Kenntnisse zu den jeweiligen Aufgaben müssen im Selbststudium mit Hilfe des Skriptes erarbeitet werden. Unterstützt wird das Selbststudium durch 6 Kurzvideos (<http://video.tu-clausthal.de/film/400.html>), die thematisch auf die einzelnen Übungseinheiten abgestimmt sind. Die

Erfahrungen zeigen, dass es den Studierenden extrem schwerfällt, sich im Selbststudium durch Erarbeitung des Skriptes die praktischen Fachkompetenzen anzueignen. Vor diesem Hintergrund wurden bereits zum Sommersemester 2013 zu jeder Übungseinheit Kurzvideos erstellt. In dem jeweiligen Kurzvideo wird an einer ähnlichen Aufgabenstellung oder einem ähnlichen Bauteil gezeigt, wie die gestellte Aufgabe im Detail zu lösen ist. Dabei gehen die Lernvideos auf die für diese Aufgabe relevanten Regeln nochmals intensiv ein. Ziel war es, den Studierenden das Erlernen der Fachkompetenz im Selbststudium durch diese zusätzliche audio-visuelle Möglichkeit zu erleichtern. Es wird als wichtig angesehen, dass durch diese Videos die Abstraktion vom realen Bauteil zur technischen Zeichnung wiedergegeben werden kann. Für Studierende ist es überzeugender, wenn die Notwendigkeit eine gewisse Kompetenz zu erwerben durch den Bezug zur Realität belegt ist. Wenn also dargelegt wird, wozu muss ich diese Theorie, Arbeitsweisen, Handwerkzeuge kennen, was bringt mir das? Diese Art der Wissensvermittlung wurde von den Studierenden äußerst positiv bewertet. Die Lehrvideos sind 2013 durch die Unterstützung des Rechenzentrums erstellt worden und wurden im Rahmen des podcampus-Wettbewerbs prämiert (<http://www.tu-clausthal.de/presse/nachrichten/details/1576.html>).

Voraussetzung für die Teilnahme an der jeweiligen Übungseinheit ist die erfolgreiche Bearbeitung eines aufgabenspezifischen Online Tests. Das auf der Moodle-Plattform basierende System ermöglicht es StudIP-Veranstaltungen um eAssessments und Online-Inhalte zu erweitern. Eine zweimalige Wiederholung des Tests ist zulässig. Diese Online Tests, im WS 17/18 neu eingeführt, ersetzen die, seit mehr als 15 Jahren durchgeführten schriftlichen Wissenskontrollen (zwei pro Semester). Hintergrund für diese Veränderung war, den Studierenden die Möglichkeit zu geben, vor Übungsbeginn eine Einschätzung zu bekommen: Wie gut habe ich mich im Selbststudium auf die jeweilige Übung vorbereitet? Die bis dato schriftlichen Tests stellten eine Kenntniskontrolle über ein umfangreicheres Themengebiet dar und standen nicht unmittelbar im Zusammenhang mit den jeweiligen praktischen Übungen. Ferner kann durch die Splitting auf fünf Selbstkontrollen von den Studierenden der Wissensfortschritt genauer erkannt bzw. identifiziert werden, an welcher Stelle des individuellen Lernprozesses evtl. Defizite vorliegen. Die Einführung der Moodle Tests erfolgte mit Unterstützung des Zentrums für Hochschuldidaktik sowie des Rechenzentrums und stellt aus Sicht des Institutes eine zielorientierte Weiterentwicklung des Lehrkonzeptes für das Fach Technisches Zeichnen dar. Die Lehrevaluationen der vergangenen Semester belegen, dass die Selbsttests als positive Maßnahme bewertet werden; ca. 65 % sehen hierin eine Unterstützung im Selbststudium. Der Fragenumfang für die jeweiligen Online Test wurde im letzten Semester weiterentwickelt, so dass bei einer erforderlichen Wiederholung des Tests eine Durchmischung des Testes möglich ist.

In Abbildung 2 ist das neue Lehrkonzept zur Übungseinheit Technisches Zeichnen schematisch dargestellt.

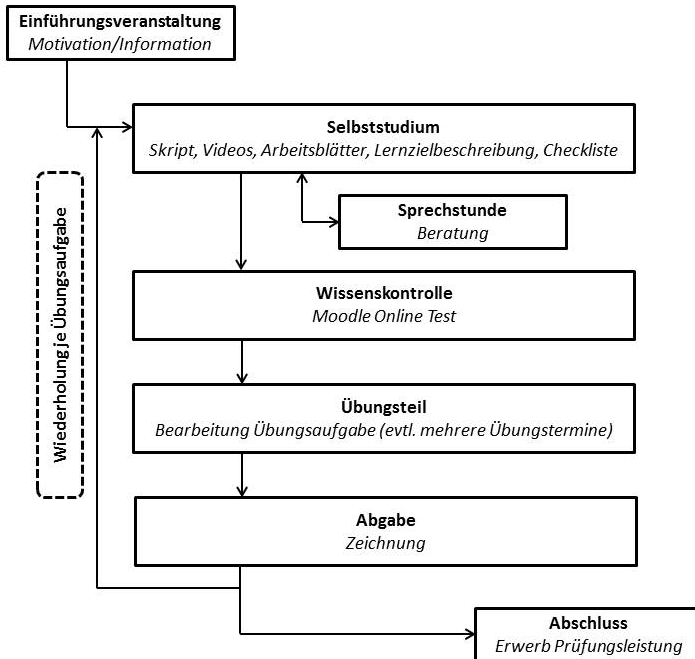


Abbildung 2: Schema zum Lehrkonzept

Die Übungen Technisches Zeichnen finden in Gruppen mit einer maximalen Gruppengröße von 60 Studierenden statt und werden von einem wiss. Mitarbeiter und zwei Tutoren betreut. Erstmals fand zu Beginn des Wintersemester 17/18 eine veranstaltungs- bzw. fachspezifische Tutorenqualifikation durch das Zentrum für Hochschuldidaktik statt. Die Weiterbildung aller Lehrpersonen (wiss. Mitarbeiter*innen und studentische Mitarbeiter*innen) gehört zum Selbstverständnis des Instituts. Im Sommersemester 2018 wurde der zugehörige Aufbaukurs angeboten, der die Kompetenzen der Tutor*innen noch stärker fördert. Die Betreuung der Studierenden erfolgt nach dem Prinzip der minimalen Hilfe. D.h., dass den Studierenden nicht der Stift geführt wird, sondern Hinweise geben werden, wie diese an das Problem herangehen können bzw. wo sie Hinweise zur Lösung finden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es im Fach Technisches Zeichnen oft nicht nur **eine** richtige Lösungsmöglichkeit gibt, sondern verschiedene Lösungen möglich sind. Von Seiten der Studierenden wird oft erwartet, dass man ihnen **die** Lösung präsentiert. Hiervon wird aber von Seiten des Institutes bewusst Abstand genommen. Die Studierenden sollen zu

einem selbständigen Arbeiten angeleitet werden und die Lösungsansätze kritisch reflektieren.

Pro Semester besuchen ca. 150 Studierende die Übungen Technisches Zeichnen. Technisches Zeichnen ist eine Pflichtveranstaltung in den Bachelorstudiengängen Maschinenbau, Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen, Wirtschaftsingenieur, Energie und Rohstoffe, Energietechnologie, Materialwissenschaften und Werkstofftechnik und im Masterstudiengang Technische Betriebswirtschaftslehre.

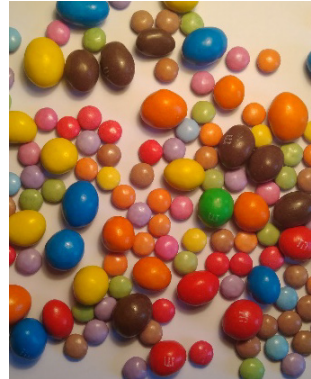
Beim Technischen Zeichnen handelt es sich also um eine Grundlagenveranstaltung aller Ingenieurstudiengängen. Die hier zu erlernenden Kompetenzen als Grundhandwerkszeug sind zentral, daher ist eine interaktive, moderne und lernunterstützende Gestaltung der Lehrveranstaltung das zentrale Ziel des Instituts.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Fachschaft Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen seit mehr als 6 Jahren die Studierenden durch den Verleih der empfohlenen DIN A3 Zeichenplatten unterstützt.

Zusammenfassung

Das Modul Technisches Zeichnen wurde in den letzten zwei Semestern mit Unterstützung der fachdidaktischen Beraterin für Ingenieurwissenschaften umstrukturiert. Dabei fiel die Entscheidung bewusst für das Lehrformat „Inverted Classroom“.

Interdisziplinäres Projekt TUCreate – Süßes gegen Credit Points



Rehmet, R.; Wallat, P.

Die Werkstätten von TUCreate haben in diesem Semester ein interdisziplinäres Projekt ins Leben gerufen, das die Dienstleistungen der Werkstätten unter den Studierenden bekannter machen soll. Dabei können die Teilnehmer Leistungen ihres Curriculums mit der Arbeit am interdisziplinären Projekt ablegen.

The TUCreate workspaces initiated an interdisciplinary project, which has the purpose to make the services of the workspaces more known within the studentsbody. The participants have the opportunity to earn credit points for their work in the project.

Grundidee des interdisziplinären Projekts

Die Studierendenwerkstatt TUCreate wurde im Jahr 2016 für Studierende und Mitarbeiter der TU Clausthal geöffnet. Seither wachsen die Anfragen an die Werkstatt stetig. Seit 2017 wurden die Möglichkeiten zur Realisierung von Ideen durch zwei weitere Fachwerkstätten am Institut für Schweißtechnik und trennende Fertigungsverfahren und am Institut für Informatik ergänzt. Alle drei Werkstätten von TUCreate haben regelmäßige, wöchentliche Öffnungszeiten und stehen den Studierenden zur Verfügung. Bekannt gemacht wird die Möglichkeit, die Werkstätten zu nutzen, auf den üblichen Wegen wie Flyer oder das Stud.IP.

Das Angebot der Werkstätten von TUCreate versteht sich nicht nur als Kreativitätspool, in dem die Besucher spielerisch Produkte entwickeln können. Vielmehr ist TUCreate eine Ergänzung und praktische Untermauerung der Lehrinhalte, die an den beteiligten Instituten vermittelt werden. In den Werkstätten können Studierende die Theorie aus Vorlesungen wie „Schweißtechnik“, „Embedded Systems“ und „Entwicklungsmethodik“ im Feldversuch erproben und dadurch die optimale Kombination aus Werkstoff, Prozess und Programmierung ableiten.

Im Wintersemester 2018/19 wird erstmalig ein interdisziplinäres Projekt „TUCreate“ angeboten, das die einzelnen Werkstätten enger vernetzt: In interdisziplinären Teams wird ein Anreiz gegeben, über den fachlichen Tellerrand zu blicken. Dazu bekommen die Teams eine Aufgabenstellung, die es zu

bearbeiten gilt. Geplant ist auch, dass das Projekt den Wettbewerbsgedanken der Teams untereinander anspricht, wenngleich die Anmeldezahlen im Wintersemester 17/18 nur ein Team möglich machten.

Ablauf der Projektbearbeitung

Die Bearbeitungszeit beginnt mit einer dreitägigen, theoretischen Einweisung in die einzelnen Werkstätten und Fachdisziplinen. Die jeweiligen fachfremden Studierenden bekommen so einen Überblick über die fachlichen Anforderungen an die Bearbeitung, als auch einen Überblick über die Methoden des Fachgebietes. Im Folgenden sind Fortschrittaudits und eine Abschlusspräsentation geplant, um das Fortkommen der Projektgruppen zu überwachen. Beginnend mit einer Konzeptphase, in der die Projektgruppe Ansätze zur Realisierung diskutiert, beginnt nach einer grundsätzlichen Freigabe des Entwurfs durch die Mentoren die Fertigungsphase der Maschine. In dieser Phase werden die vorher konzeptionierten Programme implementiert, Rahmen geschweißt und Komponenten im 3D-Labor gefertigt. Die Teilnehmer werden in der Umsetzung der Ideen durch die studentischen Betreuer in den Werkstätten unterstützt.

Diesjähriges Thema der Arbeit

Als Projekt bearbeiten die Teilnehmer in diesem Semester einen Süßwaren-sortierautomaten. Hierzu wurden einige Randbedingungen vorgegeben. Unter anderem wurden Anforderungen an die Art der Süßigkeiten und die Sortiertiefe, wie auch an die Dimensionierung und Reinigungsgerechtigkeit gestellt. Damit das Projekt zur Verknüpfung der Werkstätten nicht nur als ergänzender Inhalt im Studium interpretiert wird, wird ein Leistungsnachweis erbracht. Die Teilnehmer dokumentieren das Vorgehen in Form einer schriftlichen Projektarbeit. Diese Arbeit ist in den Studiengängen eine zwingend erforderliche Leistung. Gemeinsam mit der konstruierten Anlage wird diese Arbeit von Prüfern der beteiligten Studiengänge abgenommen und bewertet. Geplant ist, das Projekt mit gesteigertem Werbeaufwand zu wiederholen, da die Resonanz aus der Studierendenschaft gut ist.

Zusammenfassung

Im Rahmen des interdisziplinären Projekts TUCreat können Studierende verschiedener Studiengänge über den Tellerrand ihrer Fachdisziplinen schauen. Durch die intensive Teamarbeit in interdisziplinären Teams wird sowohl die Notwendigkeit von Projektmanagement vermittelt, als auch die Fähigkeit zur Zusammenarbeit gestärkt. Die Projektaufgabe stammt aus einem spielerischen Umfeld, was die Kreativität bei der Projektbearbeitung stärkt. Eine Fortführung des Lehre-Projekts ist geplant.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

Institut

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

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

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus 15 wissenschaftlichen Mitarbeitern /-innen. Weitere 8 Mitarbeiter/-innen und 4 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

Technische Ausrüstung

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

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf sieben Verspannprüfständen bis 1 MW, sechs Torsions-Schwingprüfständen bis 500 kNm, zwei kombinierten Umlaufbiege- und Torsionsprüfständen, einem statischen Torsionsprüfstand bis 5 kNm sowie zwei separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung und zwei Druckkammprüfständen durchgeführt werden. Für das Fügen von Naben auf Hohlwellen mit Innenhochdruck steht eine Maximator-Hochdruckanlage bereit. Für die Untersuchung von Freiläufen stehen zwei dynamische Servoschaltprüfstände mit zusätzlichen Axialbelastungseinheiten, zwei Lebensdauerprüfstände, ein dynamischer Servoschaltprüfstand mit zusätzlicher Radialbelastungseinheit, eine hochdynamische Belastungseinheit für stirnseitige Verschraubungen und ein statischer Prüfstand zur Ermittlung der Drehfedersteifigkeit zur Verfügung. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät, sowie ein separates mobiles Prüfgerät für Seilquerverformungsmessungen und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Für die experimentelle Beanspruchungsermittlung werden Systeme von HBM, 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 und einer zur Vereinzelung ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen. Für Untersuchungen an den genannten Maschinenteilen unter thermischen Bedingungen steht ein 100 l-Temperierschrank für den Temperaturbereich von -70 °C bis 180 °C zur Verfügung. Für Oberflächenanalysen wird ein 3D-Laserscanning-Mikroskop (KEYENCE VK-X 100K) mit zusätzlichem Koordinatentisch für die Untersuchung größerer Bauteile, sowie ein Rauigkeitsmessgerät MAHR MarSurf XR20 eingesetzt.

Die technische Ausstattung des Labors für Maschinenakustik und Schwingungen ermöglicht Messungen an kombiniert belasteten Bauteilen. Mittels 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 aktuellen Stand der Technik ausgestattet:

- Signalanalytoren (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), einer Drahterodiermaschine (Mitsubishi MV2400S), einer Startlochbohrmaschine (Mitsubishi START43Z) und einer ZEISS Koordinatenmessmaschine mit NC-Rundtisch. Als CAD/CAM-System wird CATIA V5 und Creo Parametric (früher: Pro/Engineer Wildfire mit Pro/Manufacturing) eingesetzt.

Die Rechnerausstattung umfasst mehrere Server, welche die insgesamt ca. 160 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. mehrere Compute-Server für die numerischen Simulationen 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.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette. Hierzu gehören im Einzelnen eine Rapid Tooling Anlage der Firma EOS, zum Generieren von metallischen Prototypen, Funktionsteilen und Werkzeugen (Formen und Elektroden), für die Mischung der Pulver ein Turbula T2F Mischer, eine DIMENSION BST 768 für den Bau von thermoplastischen Prototypen, die TUCreate Werkstatt, ein optischer 3D-Scanner HandySCAN von CREAFORM, verschiedene 3D-Konstruktionsarbeitsplätze, Software zur Rapid Tooling gerechten Aufbereitung der CAD-Daten (Magics RP), Apparaturen und Geräte zum Infiltrieren und Beschichten der Sinterbauteile mit Harzen und niedrig schmelzenden Metallen, eine Sandstrahlkabine für verschiedene Strahlmedien (Stahlkugeln, Keramikpulver, Nussgranulat usw.) sowie Arbeitsplätze zur manuellen Nachbearbeitung der Rapid Tooling Erzeugnisse. Eine Thermografiekamera TESTO 890 mit hoher Auflösung steht für die Überwachung des Bauprozesses in den RP-Anlagen sowie zur Detektion von Verschleißvorgängen an Maschinenelementen zur Verfügung.

Für die virtuelle stereoskopische Produktentwicklung stehen sechs Arbeitsplätze zur Verfügung sowie für die Demonstration ein 65“ Monitor mit Shutterbrille 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

Versuche, Messungen und Berechnungen

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

Beratung und Gutachten

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

Forschungsschwerpunkte

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

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

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

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

Maschinenakustik

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

Rapid Prototyping / Rapid Tooling / Additive Manufacturing

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

Veröffentlichungen des Institutes seit dem 01.01.2012

Veröffentlichungen 2018

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

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

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

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

Mörz, F.; Lohrengel, A.; Schäfer, G.: Beitrag zur Verbesserung der Anwendung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle. In: Tagungsband zur 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2018, 26./27.11.2018, Seite 239 – 244, ISBN 978-3-18-092337-6

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2017

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2016

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

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

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

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

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

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

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

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

Wendler, J.; Schlecht, B.; Wild, J.: Numerische und experimentelle Analyse der Gestaltfestigkeit von Zahnwellenverbindungen bei Umlaufbiegung. In: Tagungs-

band zur 7. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2016), 09./10.11.2016, Seite 139 – 152, VDI-Berichte 2287, ISBN 978-3-18-092287-4

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

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

Schmelter, R.: FVA-505 II, Reibwert- und Verschleißreduzierung im Gelenkwellen-Längenausgleich, Abschlussbericht, Forschungsreport 2016; CD-ROM; Forschungsergebnisse 2016; Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2016

Veröffentlichungen 2015

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

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

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

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

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

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

Langenbach, J.; Wächter, M.; Lohrengel, A.; Müller, N.: Teaching Engineering Drawing in a Technology Changing Environment; The 17th International

Conference on Engineering & Product Design Education, 3. und 4. September 2015 in Loughborough, ISBN 978-1-904670-62-9

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

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

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

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

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

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

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

Lohrengel, A.; Heß, M.; Schäfer, G.: 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

Veröffentlichungen 2014

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2013

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Veröffentlichungen 2012

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Erschienenene Institutsmittelungen seit 2007



TU Clausthal

Institutsmittellung 2007



TU Clausthal

Institutsmittellung 2008



TU Clausthal

Institutsmittellung 2009



TU Clausthal

Institutsmittellung 2010



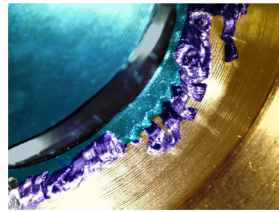
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2011



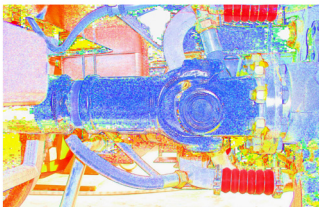
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2012



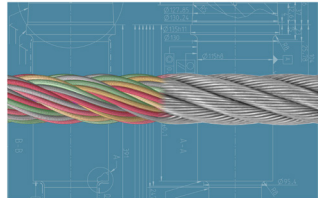
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2013



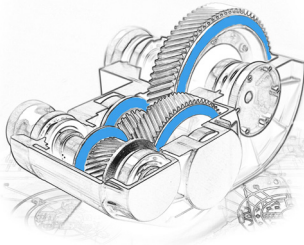
 TU Clausthal

Institutsmittellung 2014





Institutsmittellung 2015



Institutsmittellung 2017



Institutsmittellung 2016



Autoren

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

Kaczmarek, Dennis: Jahrgang 1991, studiert Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.12.2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
kaczmarek@imw.tu-clausthal.de

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

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

Martinewski, Viktor: Jahrgang 1989, studierte 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

Prumbohm, Max: Jahrgang 1986, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 15.04.2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
prumbohm@imw.tu-clausthal.de

Rehmet, Raphael: Jahrgang 1991, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.05.2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
rehmet@imw.tu-clausthal.de

Schäfer, Günter: Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.11.1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion im November 1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen, seit 2002 akademischer Oberrat.
schaefer@imw.tu-clausthal.de

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

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

Wallat, Phillip: Jahrgang 1988, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Clausthal, seit 01.04.2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
wallat@imw.tu-clausthal.de

So finden Sie das IMW

Anschrift

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



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.

