Report
2015-2019

Ein Forschungsbericht
des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT

KT
mfk

Herausgeber

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
Koordination: P. Kügler

Bildnachweis

Eigene Quellen. Der Nachweis erfolgt am Bild.
S. 28: pixabay/Gerhard Gellinger (www.pixabay.com)

Hinweis

In diesem Bericht wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Impressum

Foto: Riese Photography

Editorial

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack,
Ordinarius des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik
an der FAU

Nach 10 Jahren als Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik möchte ich auf die vergangenen 5 Jahren zurückblicken und eine Bilanz ziehen: die Themen haben sich sehr gut entwickelt und ich bin sehr froh, 3 sehr kompetente Oberingenieure sowie 38 motivierte wissenschaftliche Mitarbeiter und 8 genauso motivierte nicht-wissenschaftliche Mitarbeiter an Bord zu haben. Ich freue mich über die personelle Verstärkung im wissenschaftlichen wie auch im administrativen Bereich. Dies wurde dadurch ermöglicht, dass wir in den letzten Jahren zahlreiche neue, interessante Forschungsprojekte akquirieren konnten und im Gegenzug eine räumliche Erweiterung von 10 Büroarbeitsplätzen und einem weiteren Labor am Standort Nürnberg auf AEG verzeichnen durften. Hierfür möchte ich der Hochschulleitung meinen Dank aussprechen!

Nachdem es die Aufgabe eines Forschungsreports ist über Forschungsthemen zu informieren, möchte ich diese entsprechend ihrer Strukturierung in die einzelnen Forschungsgruppen kurz vorstellen:

- **Digital Engineering:** hierbei handelt es sich um einen Themenbereich, in dem ich selber vor ca. 20 Jahren promoviert wurde. Die Gruppe Digital Engineering umfasst das personalstärkste Team am Lehrstuhl, dessen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten auf der Integration von Methoden der Künstlicher Intelligenz in die Produktentwicklung liegt. Damit wird es möglich, eine Vorhersage von Produkteigenschaften und -charakteristika durch Nutzung von Daten aus der Produktion oder Nutzung vorzunehmen. In den letzten Jahren wurden hierzu insbesondere zwei Teilprojekte in zwei Sonderforschungsbereichen (SFB), ein Projekt in einem Schwerpunktprogramm und drei europäische geförderte Teilprojekte (EFRE) zur Unterstützung der regionalen Industrie akquiriert.

Zuständiger Oberingenieur dieser und der nächsten Arbeitsgruppe ist Herr Dr. Schleich.

- **Toleranzmanagement:** in diesem Forschungsbereich haben wir uns in den letzten Jahren eine führende Stellung in Deutschland erarbeitet. Ich selber bin Sprecher der DFG-geförderten Forschungsgruppe „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden". Darüber hinaus haben wir in der vergangenen Zeit einige DFG Forschungsprojekte akquiriert und diverse Veranstaltungen, wie die allseits beliebte Summer School und ein Industriekolloquium zum Thema Toleranzmanagement veranstaltet.

- **Nutzerzentrierte Produktentwicklung:** hierbei handelt es sich um unseren jüngsten Forschungsbereich am Lehrstuhl. Es geht dabei speziell um die Betrachtung des Menschen in der Produktentwicklung, einerseits durch dessen Abbildung mittels Muskuloskelettaler Menschmodelle, andererseits durch die Berücksichtigung affektiver Faktoren. Nach meiner Einschätzung ist dies ein absolutes Zukunftsthema, wir haben hierbei erste DFG Projekte eingeworben, zwei SFB Teilprojekte sind in Vorbereitung. Einige, sehr interessante Kooperationen im Umfeld „Gesundheit" sind in der Entstehung.

Zuständiger Oberingenieur dieser Arbeitsgruppe ist Herr Dr. Miehling.

- **Leichtbau in der Produktentwicklung:** in diesem Zusammenhang geht es um die Erforschung von Methoden des „Dreiklangs" Lightweight Design, Lightweight Engineering und Lightweight Validation. Wir sind damit in der Lage, die gesamte Leichtbau Produktentwicklungsprozesskette zu berücksichtigen; mehrere Softwarewerkzeuge im CAE Umfeld wurden hierzu entwickelt (mfkCoDe, mfkTopo, mfkTopoRestruct). Derzeit arbeiten wir an mehreren Förderprojekten in Zusammenarbeit mit universitären und industriellen Partnern. Wir freuen uns über die Ergänzung der Laborausstattung durch einen neuen servohydraulischen Biaxial-Pulser mit Klimakammer und optischer Messtechnik (DFG-Großgerät) sowie einen neuen Steifigkeitsanalyseprüfstand.

- **Wälzlagertechnik:** dies ist die Gruppe, die das zweitstärkste Team am Lehrstuhl ausmacht. Unser Forschungsschwerpunkt liegt in der Untersuchung von Reibung und Verschleiß in Wälzlagerungen unter besonderer Berücksichtigung instationärer Betriebsbedingungen. Wir haben in den vergangenen Jahren zahlreiche Förder- und bilaterale Industrieprojekte akquirieren können und freuen uns auch hier über die Ergänzung der Laborausstattung, insbesondere durch einen Zweischeibenprüfstand (DFG-Großgerät) und einen Vierkugelapparat. Auch hier wird Software weiterentwickelt, wie z.B. ein Simulationstool zur Analyse des elastisch-hydrodynamischen Verhaltens von Bauteiloberflächen (mfkTriboFEM).

Zuständiger Oberingenieur dieser und der nächsten Arbeitsgruppe ist Herr Dr. Tremmel.

- **Tribologische PVD/PACVD-Schichtsysteme:** wir verstehen Beschichtungen als Maschinenelemente und sind in der glücklichen Lage mithilfe unserer Lehrstuhl-eigenen Beschichtungsanlage tribologische Dünnschichten herzustellen, die wir in unserem sehr gut ausgestatteten Charakterisierungslabor detailliert untersuchen können. Auch in dieser Gruppe wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Förderprojekte (SFB und SPP-Projekte) sowie bilaterale Forschungsprojekte akquiriert und wir konnten unsere PVD-Beschichtungsanlage und unsere Laborausstattung hochwertig erweitern.

Besonders interessant ist die gruppenübergreifende Zusammenarbeit. Aktuelles Beispiel ist die holistische Entwicklung individualisierter, beschichteter Implantate am Beispiel von Knie-Totalendoprothesen. Hier ist geplant, die Kompetenzen der verschiedenen Fachgruppen synergetisch nutzen, um auf Basis muskuloskelettaler Simulationen Gelenkkräfte zu analysieren, die wiederum den Input für elasto-hydrodynamische Simulationen im Gelenkspalt bilden und wichtige Informationen liefern, um Schichtsysteme auf Basis amorpher Kohlenstoffschichten zur Standzeiterhöhung auszulegen.

Ich darf also bereits an dieser Stelle vorwegnehmen: Wir können auf sehr erfolgreiche vergangene fünf Jahre zurückblicken. Unsere Forschungsthemen haben sehr viel Potenzial und unsere Wissenschaftler viele sehr gute Ideen und Kompetenzen. Wir werden uns unsere Neugierde und unseren Forschungseifer bewahren und man darf sicherlich gespannt sein, was in den nächsten Jahren aus dem Hause KTmfk kommen wird. Ich wünsche Ihnen viel Spaß bei der Lektüre dieses Forschungsreports!

Sandro Wartzack, im November 2019

Inhalt

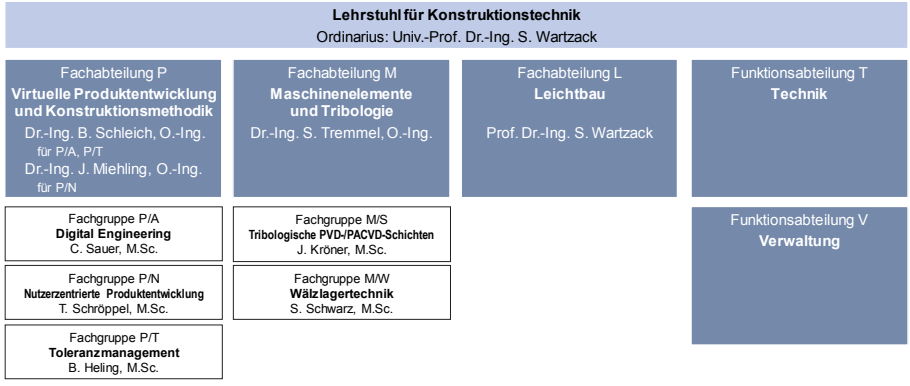
Lehrstuhlprofil 1
Lehre 9
Standorte und Ausstattung 25
Forschungsschwerpunkte 57
Ausgewählte Forschungsprojekte 71
Veröffentlichungen 161
Preise & Auszeichnungen 199
Dissertationen 205
Wissens- und Technologietransfer 219
Netzwerke und Plattformen 225
KTmfk-Lifestyle 241

Foto: Riese Photography

Lehrstuhlprofil

Organisation

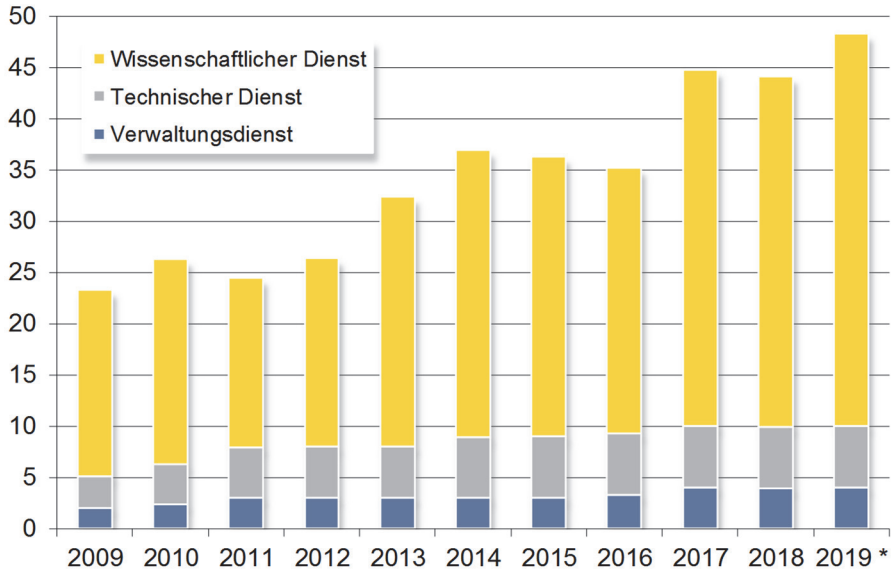
Unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack lehren und forschen derzeit am KTmfk knapp 50 Mitarbeiter. Die Wissenschaftler aus den Fachrichtungen Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Mechatronik, Elektrotechnik, Materialwissenschaften, Computational Engineering und Informatik sind in mittlerweile drei Fachabteilungen gegliedert. Im Berichtszeitraum sind einige Neuerungen vorgenommen worden. Die Fachabteilung Leichtbau (L) ist seit 01.06.2018 eigenständig und nicht mehr der Fachabteilung Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik (P) untergeordnet. Letztere ist in die Fachgruppen Digital Engineering (ehem. Assistenzsysteme), Nutzerzentrierte Produktentwicklung und Toleranzmanagement gegliedert. Die Fachgruppen Digital Engineering und Toleranzmanagement sind dabei nun seit 01.04.2017 in der Verantwortung von Oberingenieur Dr.-Ing. Benjamin Schleich. Die Fachgruppe Nutzerzentrierte Produktentwicklung wird seit 01.09.2018 von Oberingenieur Dr.-Ing. Jörg Miehling geleitet.



Organigramm 2019

Das Lehrstuhlteam

Die Zahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist in den vergangenen Jahren stark angewachsen.



Personalentwicklung im Zeitraum 2009–2019 (Kopfzahlen, Jahresmittelwerte ohne externe Doktoranden und studentische Hilfskräfte) (* Prognose)

Zu den genannten Zahlen sind die studentischen Hilfskräfte hinzu zu zählen. Im Jahr 2019 wurden die Mitarbeiter am KTmfk durch insgesamt 120 studentische Hilfskräfte unterstützt.

Um die hohe Anzahl an wissenschaftlichen Mitarbeitern und die Vielfalt der Forschungsthemen optimal betreuen zu können, wird Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack von mittlerweile drei Oberingenieuren kompetent unterstützt. Dr.-Ing. Stephan Tremmel ist Leiter der Abteilung Maschinenelemente, während Dr.-Ing. Benjamin Schleich für die Fachgruppen Digital Engineering und Toleranzmanagement und Dr.-Ing. Jörg Miehling für die Fachgruppe Nutzerzentrierte Produktentwicklung als Oberingenieur fungiert.

Foto: Riese Photography

Das Lehrstuhlteam im Juni 2019

2017 und 2018 wurden Dr.-Ing. Benjamin Schleich und Dr.-Ing. Jörg Miehling zu Oberingenieuren ernannt und nehmen seitdem Abteilungsleitungsfunktion wahr. Beide waren zuvor bereits als wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl tätig.

Ordinarius

- Wartzack, Sandro — Prof. Dr.-Ing.

Extraordinarius

- Hasse, Alexander — Prof. Dr. sc. ETH — von 2014 bis 2018

Ordinarius im Ruhestand

- Meerkamm, Harald — Prof. Dr.-Ing. — bis 2009

Oberingenieure

- Miehling, Jörg — Dr.-Ing. — seit 2018 (2012)
- Schleich, Benjamin — Dr.-Ing. — seit 2017 (2012)
- Tremmel, Stephan — Dr.-Ing. — seit 2009 (2003)

Honorarprofessoren

Beyer, Andreas	Hon. Prof. Dr.-Ing.	seit 2008
Hosenfeldt, Tim	Hon. Prof. Dr.-Ing.	seit 2016

Lehrbeauftragte

Adunka, Robert	Dr.-Ing.	von 2008 bis 2015
Koch, Oliver	Dr.-Ing.	seit 2014

Mitarbeiter

Corpus, Jörg	Dipl.-Ing. (FH)	seit 1995
Dörsch, Marion		seit 2007
Förster, Michaela		von 2016 bis 2018
Koppenwallner, Kathrin		seit 2018
Melo López, Irma		seit 2018
Niering, Thomas		seit 2010
Rabenstein, Günther		seit 2010
Seitz, Anneliese		seit 1986
Stingl, Gabriele		von 2010 bis 2018
Weyrich, Evelyn		seit 2008
Wolf, Ute	Dipl.-Ing.	seit 2014

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Aschenbrenner, Alexander	M. Sc.	seit 2014 bis 2019
Bickel, Sebastian	M. Sc.	seit 2018
Breitsprecher, Thilo	Dr.-Ing.	von 2010 bis 2015
Dobrenizki, Ladislaus	M. Sc.	von 2013 bis 2017
Dworschak, Fabian	M. Sc.	seit 2017
Fechter, Marius	M. Sc.	von 2014 bis 2019
Franz, Michael	M. Sc.	seit 2017
Gerschütz, Benjamin	M. Sc.	seit 2018
Götz, Stefan	M. Sc.	seit 2017
Hallmann, Martin	M. Sc.	seit 2017
Halmos, Fabian	M. Sc.	seit 2018
Harlan, Jakob	M. Sc.	seit 2019
Heider, Katrin	Dr.-Ing.	von 2010 bis 2017
Heling, Björn	M. Sc.	seit 2015
Hochrein, David	Dipl.-Ing. (FH)	von 2012 bis 2018

Horber, Dennis	M. Sc.	seit 2019
Hufnagel, Thomas	M. Sc.	seit 2019
Jagosz, Julia	M. Sc.	seit 2018
Jüttner, Michael	M. Sc.	seit 2016
Kapahnke; Moritz	M. Sc.	von 2017 bis 2017
Kestel, Philipp	Dipl.-Ing.	von 2013 bis 2018
Klein, Daniel	Dr.-Ing.	von 2012 bis 2017
Kramer, Vincent	M. Sc.	seit 2018
Kröner, Julia	M. Sc.	seit 2014
Kügler, Patricia	M. Sc.	seit 2017
Küstner, Christof	Dipl.-Ing.	von 2012 bis 2018
Luft, Thomas	Dipl.-Wirtsch.-Ing.	von 2011 bis 2017
Marian, Max	M. Sc.	seit 2015
Mauser, Kristian	M. Sc.	von 2014 bis 2018
Mayer, Johannes	B. Sc.	seit 2019
Müller, Matthias	Dipl.-Ing.	von 2012 bis 2018
Nowak, Alexander	M. Sc.	von 2017 bis 2018
Rathert, Thomas	Dipl.-Ing.	von 2011 bis 2018
Rothammer, Benedikt	M. Sc.	seit 2017
Sander, Thomas	Dipl.-Ing.	von 2009 bis 2014
Sauer, Christopher	M. Sc.	seit 2017
Schächtl, Paul	M. Sc.	seit 2019
Scherb, David	M. Sc.	seit 2019
Schröppel, Tina	M. Sc.	seit 2017
Schwarz, Sebastian	M. Sc.	seit 2017
Seynstahl, Armin	M. Eng.	seit 2019
Sprügel, Tobias	M. Sc.	seit 2013 bis 2019
Summ, Thorsten	M. Sc.	seit 2018 bis 2019
Vierneusel, Bernd	Dr.-Ing.	von 2010 bis 2015
Völkl, Harald	M. Sc.	seit 2016
Walter, Leonie	M. Sc.	seit 2019
Walter, Michael	Prof. Dr.-Ing.	von 2010 bis 2015
Walbrun, Simon	M. Sc.	seit 2018
Weickert, Tim	M. Sc.	seit 2013
Weschta, Martin	Dr.-Ing.	von 2010 bis 2016

▪ Wilking, Fabian	M. Sc.	seit 2019
▪ Winkler, Andreas	M. Sc.	seit 2017
▪ Wirsching, Sven	M. Sc.	seit 2017
▪ Witzgall, Christian	M. Sc.	seit 2013
▪ Wolf, Alexander	M. Sc.	seit 2017
▪ Ziegler, Philipp	Dipl.-Math.	von 2011 bis 2014
▪ Zirngibl, Christoph	M. Sc.	seit 2019
▪ Zhao, Rong	M. Sc.	seit 2012
▪ Zöller, Susan	Dr.-Ing.	von 2013 bis 2017

Gastwissenschaftler

▪ Michael Bader	Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.	von 2018 bis 2018

Foto: KTmfk/T. Schröppel

Lehre

Produktentwicklung in Theorie und Praxis

Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik bietet eine Vielzahl aufeinander abgestimmter Lehrveranstaltungen an. Das Ziel ist eine fundierte und moderne Ausbildung von Ingenieuren, primär in den Fachrichtungen Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, Mechatronik und International Production Engineering and Management. Darüber hinaus werden für weitere Studiengänge der Technischen Fakultät Lehrveranstaltungen angeboten, beispielsweise für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Medizintechnik oder Berufspädagogik Technik.

Insbesondere die Konstruktionsausbildung ist in den Studiengängen Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen und Mechatronik ein Kernelement des Ingenieurstudiums. Angefangen mit Technischer Darstellungslehre werden zunächst grundlegende Kenntnisse zur Darstellung technischer Objekte und zu den Zeichnungsnormen vermittelt sowie die Fähigkeit geschult, Gedanken zeichnerisch auszudrücken. Die Grundausbildung im CAD ist nachfolgend in einer eigenständigen Lehrveranstaltung im zweiten Fachsemester gebündelt. In der Lehrveranstaltung Technische Darstellungslehre II wird von Beginn an vollständig auf 3D-CAD gesetzt. Neben der Darstellung technischer Systeme, kommt der Auslegung und Gestaltung von Maschinenelementen, den Grundbausteinen technischer Systeme, im Studium eine zentrale Bedeutung zu. Ein fachlicher Schwerpunkt wird auf die Grundlagen der Bauteilauslegung (Festigkeitslehre) sowie die mechanischen Maschinenelemente gelegt. Dabei wird den Studenten das Konstruieren mit und von Maschinenelementen nähergebracht. Neben der theoretischen Konstruktionsausbildung wird in den praktischen Konstruktionsübungen das erlernte Fachwissen fächerübergreifend und selbstständig angewendet.

In der Konstruktionsübung I bearbeiten zwei bis drei Studenten, aus den Studiengängen Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen, International Production Engineering and Management und Berufspädagogik, eine umfangreiche Aufgabenstellung, bei der zentrale Einzelbauteile auszulegen, Maschinenelemente auszuwählen sowie Zusammenstellungs- und Fertigungszeichnungen anzufertigen sind. Betreut werden die Teams durch wissenschaftlichen Mitarbeitern und Tutoren. Die Aufgabenstellung wird vom Lehrstuhl jährlich ausgearbeitet. Beispiele sind eine Bügelbandsäge, ein Montagekran oder eine höhenverstellbare Patientenliege. In der Konstruktionsübung II, die ausschließlich für den Studiengang Maschinenbau angeboten wird, sind von jedem Studenten wesentliche Bestandteile eines Zahnradgetriebes auszulegen und das Gesamtgetriebe als Freihandzeichnung zu erstellen.

Highlight der Konstruktionsausbildung ist das im Studiengang Maschinenbau obligatorische Konstruktive Projektpraktikum (KoPra), dessen Zielsetzung über das reine Konstruieren hinausreicht. Die Problemstellung – meist gemeinsam mit Industrieunternehmen formuliert – ist vergleichsweise abstrakt und liegt im Wesentlichen in Form einer Anforderungsliste vor. Das KoPra wird in studentischen Teams von etwa acht Personen bearbeitet. Es ist als Projekt organisiert, das heißt die Teilnehmer müssen neben der fachlichen Entwicklungsarbeit Zeitpläne aufstellen, Meilensteine definieren und einhalten, Arbeiten verteilen, Zwischenergebnisse präsentieren, Besprechungen protokollieren und das Zusammenwirken von mehreren Personen koordinieren. Damit simuliert das KoPra die wesentlichen Züge anspruchsvoller Entwicklungstätigkeiten, mit denen Universitätsabsolventen auch in der Praxis konfrontiert werden. Neben den technischen Fähigkeiten werden Fähigkeiten des Projektmanagements und der Teamkoordination vertieft. Beispiele aus den letzten Jahren sind ein innovativer Lenk- und Klappmechanismus an E-Boards, eine Prüfstandskonstruktion aus der Getriebetechnik oder eine Nachstelleinrichtung für spielarme Linearsysteme.

Einen Überblick über alle aktuell vom Lehrstuhl angebotenen Lehrveranstaltungen mit den wesentlichen Inhalten liefert nachfolgendes Kapitel.

Lehrveranstaltungen

Technische Darstellungslehre I (TD I)

Die Lehrveranstaltung als Praktikum mit einführender Vorlesung vermittelt grundlegende Kenntnisse und Fähigkeiten im Erstellen und Lesen Technischer Zeichnungen, der zentralen Kommunikationsplattform im Maschinenbau.
(4 SWS Vorlesung und Praktikum, 2,5 LP)

Technische Darstellungslehre II (TD II)

Die Lehrveranstaltung vermittelt grundlegende Kenntnisse und Fähigkeiten in der Modellierung von Bauteilen und Baugruppen im 3D-CAD-System, dem zentralen Rechnerwerkzeug im Maschinenbau.
(2 SWS Vorlesung und Praktikum, 2,5 LP)

Grundlagen der Produktentwicklung (GPE)

Ziel der Vorlesung mit angeschlossener Übung ist es, den Teilnehmern ein Verständnis für grundlegende, wie auch komplexere Maschinenelemente zu vermitteln. Es werden dafür Funktion, Gestaltung, Berechnung und Normung behandelt.
(4 SWS Vorlesung & Übung, 5 LP)

Maschinenlemente I (ME I)

Die Lehrveranstaltung wendet sich an Studierende der Fachrichtung Maschinenbau und vermittelt Funktion, Gestaltung, Berechnung und Normung grundlegender Maschinenelemente – den Grundbausteinen aller Maschinen – auf einem universitären Niveau.
(6 SWS Vorlesung und Übung, 5 LP)

Maschinenlemente II (ME II)

Die Grundlagenvorlesung ME II schließt sich nahtlos an die Vorlesung ME I an. In dieser Lehrveranstaltung werden die Funktion, Gestaltung, Berechnung und Normung komplexerer Maschinenelemente, etwa von Wälzlagern, Zahnrädern oder Kupplungen, behandelt.
(6 SWS Vorlesung & Übung, 5 LP)

Konstruktionsübung I (KÜ I)

Ziel dieses Praktikums ist das Erlernen eines grundlegenden Verständnisses für das methodische Konstruieren von Maschinen. Die Inhalte werden anhand einer konstruktiven Aufgabenstellung aus dem Maschinenbau vermittelt, welche innerhalb von Kleingruppen bearbeitet wird.
(4 SWS Praktikum, 5 LP)

Konstruktionsübung II (KÜ II)

Die Lehrveranstaltung dienst als praxisbezogene Ergänzung zu ME II. Die dort erworbenen Kenntnisse, insbesondere aus den Bereichen Getriebegestaltung und -berechnung, werden in Form von Handzeichnungen und begleitenden Berechnungen angewendet und vertieft.
(2 SWS Praktikum, 2,5 LP)

Konstruktives Projektpraktikum (KoPra)

Das Praktikum liefert einen Einblick in die Entwicklung und Konstruktion komplexer technischer Systeme anhand einer Problemstellung aus dem industriellen Umfeld. Es dient der fächerübergreifenden Anwendung bisheriger Studieninhalte sowie der Vermittlung wichtiger methodischer und sozialer Kompetenzen, etwa im Hinblick auf Projektmanagement und Teamarbeit.
(6 SWS Praktikum, 5 LP)

Technische Produktgestaltung (TPG)

Diese Vorlesung mit begleitender Übung fokussiert als Hörerschaft zukünftige Produktentwicklungsingenieure. Es wird die Gestaltung technischer Systeme unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte des Design for X thematisiert. Neben dem klassischen „fertigungsgerechten Konstruieren" werden auch übergeordnete Lehrinhalte, wie das kostengerechte, das beanspruchungsgerechte und das werkstoffgerechte Konstruieren, sowie Themen der nutzerzentrierten Produktgestaltung und des Leichtbaus gelehrt.
(4 SWS Vorlesung & Übung, 5 LP)

Methodisches und Rechnerunterstütztes Konstruieren (MRK)

Ziel der Vorlesung ist es, fortgeschrittenen Studenten im Masterstudium die Grundlagen methodischen und rechnerunterstützten Konstruierens zu vermitteln. Neben anerkannten Theorien und Vorgehensmodellen der methodischen Produktentwicklung werden dabei vor allem moderne Mittel zur Rechnerunterstützung behandelt und in einer dazugehörigen Übung vertieft. (4 SWS Vorlesung & Übung, 5 LP)

Integrierte Produktentwicklung (IPE)

Ziel dieser Lehrveranstaltung mit begleitender Übung ist die Ausbildung zukünftiger Entwicklungsmanager. Den Studierenden werden Kompetenzen vermittelt, um organisatorische und technische Methoden und Werkzeuge als ganzheitlich denkende Produktentwickler zielorientiert einzusetzen.
(4 SWS Vorlesung & Übung, 5 LP)

Konzeptentwicklung innovativer Produkte (KIP)

Ziel dieser Lehrveranstaltung ist die Ausbildung zukünftiger Entwicklungsingenieure für frühe Produktentwicklungsphasen. Die Studierenden wenden im Team bereits erlernte Methoden und Werkzeuge an, um innovative Konzepte zur Lösung einer aktuellen Problemstellung zu entwickeln.
(2 SWS Vorlesung, 2,5 LP)

Tribologie und Oberflächentechnik (TO)

Die Lehrveranstaltung fördert das grundlegende Verständnis der Studierenden über tribotechnische Systeme von ihrer wirtschaftlichen und technischen Bedeutung bis hin zum Verständnis der vorliegenden komplexen Wechselwirkungen zwischen den Strukturelementen unter tribologischer Beanspruchung. In diesem Zusammenhang ist die Oberflächentechnik zur Erzielung reibungs- und verschleißoptimierter technischer Systeme das Kernthema. Wesentlicher Lehrinhalt ist zudem die Theorie und Einsatz von Methoden und Prüfeinrichtungen für eine anwendungsbezogene Schichtenentwicklung im Rahmen eines Praktikums.
(4 SWS Vorlesung & Praktikum, 5 LP)

Wälzlagertechnik (WLT)

Für ein besseres Verständnis und die zielgerichtete Optimierung von Wälzlagern ist ein Zusammenwirken unterschiedlichster Fachdisziplinen notwendig. Die Lehrveranstaltung WLT ist zu verstehen als eine sinnvolle Fortsetzung der Grundlagenlehrveranstaltungen ME II beziehungsweise GPE. Im Fokus dieser Lehrveranstaltung stehen insbesondere interessierte Studierende, die sich nach ihrem Studium eine berufliche Tätigkeit im Bereich der vorstellen können.
(4 SWS Vorlesung, 5 LP)

Rechnerunterstützte Produktentwicklung (RPE)

Im Rahmen des Praktikums werden den Teilnehmern Kenntnisse über die rechnerunterstützte Produktentwicklung vermittelt. Wesentlicher Lehrinhalt sind Theorie und Einsatz rechnerbasierter Werkzeuge. In fünf Versuchen wird ein Grundwissen zu den eingesetzten rechnerunterstützten Analyse- und Synthesewerkzeugen vermittelt.
(2 SWS Praktikum, 2,5 LP)

Praktische Produktentwicklung mit 3D-CAD-Systemen

Ziel der Vorlesung mit Übung ist es, Studenten ein Verständnis für Funktion, Aufbau und fortgeschrittene Bedienung von in der Praxis eingesetzten 3D-CAD-Systemen zu vermitteln. Darüber hinaus werden deren integrierte CAx-Zusatzmodule als zentrale Synthesewerkzeuge des rechnerunterstützten Produktentwicklungsprozesses behandelt.
(2 SWS Vorlesung & Übung, 2,5 LP)

Technologie-Startup-Seminar (TechStart)

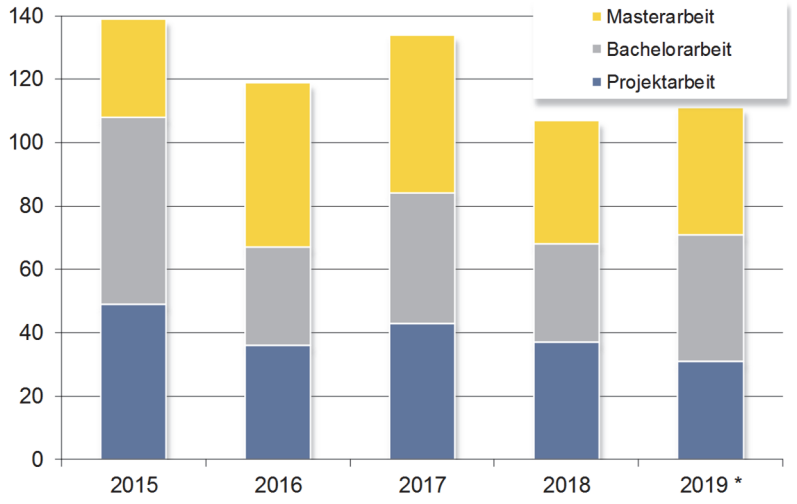
Gegenstand der interaktiven Lehrveranstaltung sind Fragestellungen der Kommerzialisierung von technologieorientierten Geschäftsideen und deren anwendungsorientierte Umsetzung über Unternehmensgründungen. In Absprache mit den Dozenten und unter Anleitung fachkundiger Experten entwickeln die Teilnehmer gemeinsam mit Doktoranden und Post-Docs tragfähige Geschäftskonzepte für eine technische Geschäftsidee und holen ein erstes Kundenfeedback ein.
(2 SWS Vorlesung, 2,5 LP)

Einführung in das Patentrecht und verwandte Schutzrechte (PaRe)

Die fakultätsübergreifende Blockveranstaltung bietet Studenten höherer Fachsemester oder wissenschaftlichen Mitarbeitern einen Leitfaden für Patentierungsverfahren und behandelt speziell die Situation von Erfindern an Hochschulen. Die Grundlagen des Patentrechts und verwandter Schutzrechte werden dabei von Patentanwalt Prof. Dr.-Ing. A. Beyer vermittelt.
(2 SWS Vorlesung, 2,5 LP)

Studierendenzahlen

Wie schon die Jahre zuvor hält sich die Studierendenzahl der FAU zum Berichtszeitpunkt relativ konstant auf einem hohen Niveau. Im Wintersemester 18/19 sind es insgesamt 38.771 Studierende, im Vorjahr waren es 38.750. Die Technische Fakultät ist mit 10.332 Studierenden knapper Spitzenreiter gegenüber den anderen Fakultäten der FAU. Die Beliebtheit der FAU ist auf ihren hervorragenden Ruf zurückzuführen. So hat es die FAU dieses Jahr europaweit auf Platz 2 im Ranking der „Most Innovative Universities" der Nachrichtenagentur Reuters geschafft. Auch der KTmfk erfreut sich konstant großer Beliebtheit bei den Studierenden. Die Anzahl der betreuten Studien- und Abschlussarbeiten liegt über den gesamten Berichtzeitraum hinweg bei über 100 pro Jahr.



Studien- und Abschlussarbeiten am KTmfk (*Prognose)

Nachwuchsförderung

Girl's Day und Mädchen-/ Jugend-und-Technik-Praktikum

Am bundesweiten Girl's Day – Mädchen-Zukunftstag – informieren Unternehmen und Organisationen über Ausbildungsberufe und Studiengänge in den Bereichen Technik, Naturwissenschaften, Informationstechnologie und Handwerk. Das Angebot richtet sich an Mädchen ab der 5. Klasse und bietet die Möglichkeit ihre Fähigkeiten im technischen Bereich praktisch zu erproben und einen Einblick in die Arbeitswelt der genannten Bereiche zu erhalten. Ähnliche Ziele verfolgt auch das Mädchen-und-Technik-Praktikum, das für Schülerinnen der 8.-12. Jahrgangsstufe angeboten wird. Der Fokus des Mädchen-und-Technik-Praktikums der FAU liegt hierbei vor allem darauf über MINT-Fächer und die Möglichkeiten zum Studium an der Technischen Fakultät zu informieren. Da der Anteil an Studentinnen im technischen und naturwissenschaftlichen Bereich nach wie vor sehr niedrig ist, sind diese Angebote speziell an Mädchen und junge Frauen gerichtet. Äquivalent zum Mädchen-und-Technik-Praktikum wird allerdings zur allgemeinen Nachwuchsförderung auch das Jugend-und-Technik-Praktikum angeboten, das sich an alle Schülerinnen und Schüler der 8.-12. Jahrgangsstufe richtet.

Der KTmfk beteiligt sich an diesen Angeboten mit dem Praktikum „Zahn um Zahn", das zum Ziel hat, den Teilnehmenden den Einsatz und die Funktion von Getrieben zu zeigen. Das Praktikum startet mit der Vermittlung der grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge von Übersetzung, Drehmomentverhältnis und Wirkungsgrad. Unterstützend zur Theorie dürfen die Teilnehmer mit Lego Technic Elementen eine Übersetzungsaufgabe lösen und ein erstes kleines Getriebe zusammenbauen. Danach machen sich die Teilnehmer zunächst virtuell mit dem Industriegetriebemodell vertraut. Dazu wird dieses in der KTmfk-eigenen Virtual-Reality-Anlage virtuell zerlegt und analysiert.

Abschließend dürfen die Teilnehmenden ihre praktischen Fähigkeiten erproben und unter Anleitung von wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls das physische Getriebe auseinanderbauen. Auf diese Weise lernen sie die Bestandteile eines zweistufigen Standard-Industriegetriebes kennen. Das Praktikum wird zweimal im Jahr im Rahmen der Nachwuchsförderprogramme der FAU angeboten.

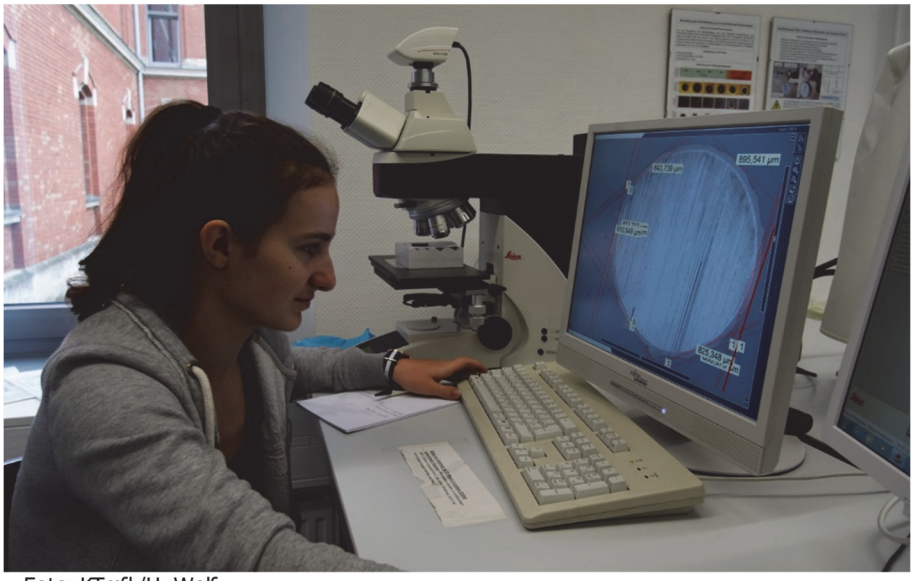


Foto: KTmfk/U. Wolf

Makeathon Digital Engineering

Wer bereits zu Schulzeiten sein eigenes Traumauto entwerfen und in 3D drucken möchte, ist beim „Makeathon Digital Engineering" genau richtig. Ergänzend zur Schnupperuni „Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen" veranstaltete der Lehrstuhl für KTmfk zusammen mit dem Department Maschinenbau einen Designwettbewerb unter den interessierten Schülern.

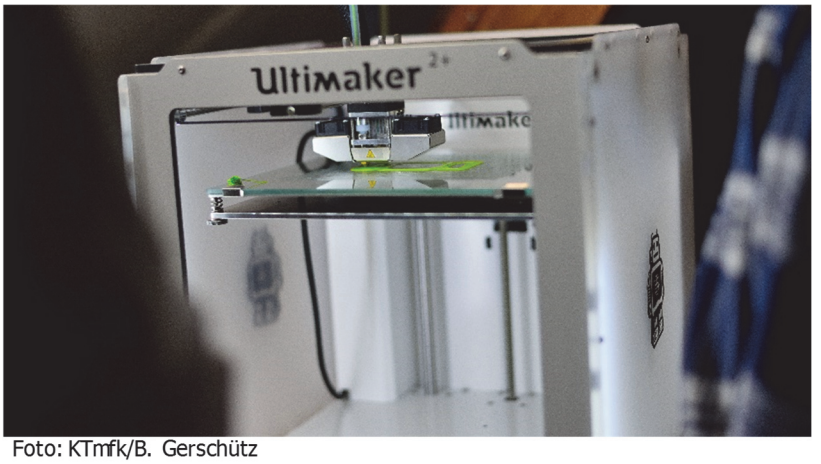


Foto: KTmfk/B. Gerschütz

Direkte Ergebnisse aus dem 3D-Drucker

Bei diesem Wettbewerb, der sich speziell an angehende Abiturienten, aber auch an alle anderen interessierten Schüler ab der 10. Jahrgangsstufe richtet, können die Teilnehmer am Rechner ein Auto designen und ein dreidimensionales Modell erstellen, welches anschließend auf dem 3D-Drucker Realität wird. Das Team mit dem besten Entwurf wird mit einem Preis belohnt.

Foto: KTmfk/B. Gerschütz

Modellieren am CAD-System

Etwa 50 Teilnehmer erhielten auf diese Weise Einblicke in die Funktionsweise eines modernen 3D-CAD Systems und bekamen die Möglichkeit, das System selbst intensiv zu erproben. In kürzester Zeit konnte so jeder Schüler sein Traumauto designen. Der beste Entwurf jedes Teams konnte anschließend direkt auf dem 3D-Drucker ausgedruckt werden. Im eigentlichen Designwettbewerb am Nachmittag präsentierte jedes Team sein Fahrzeug real und digital. Ziel war es, die Jury, bestehend aus den übrigen Teilnehmern und den studentischen Betreuern, für das eigene Modell zu begeistern. Ergebnis des Makeathon waren zehn sehr unterschiedliche Fahrzeuge, die beweisen, dass in vielen Schülern angehende Ingenieure und Produktdesigner stecken.

Foto: KTmfk/B. Gerschütz

Alle Teilnehmer begeisterten am Ende des Makeathon mit ansprechenden Designstudien

Lange Nacht der Wissenschaften

Seit dem Jahr 2003 wird im Großraum Erlangen-Nürnberg-Fürth jedes zweite Jahr die „Lange Nacht der Wissenschaften" veranstaltet. Bei dieser Veranstaltung öffnen beteiligte Firmen, Vereine, Hochschul-Institute sowie Behörden für einen Tag von Nachmittag an bis in die späte Nacht ihre Pforten, um interessierten Bürgerinnen und Bürgern der Region einen Einblick in aktuelle Themen der Forschung und Wissenschaft in den verschiedensten Bereichen zu ermöglichen.

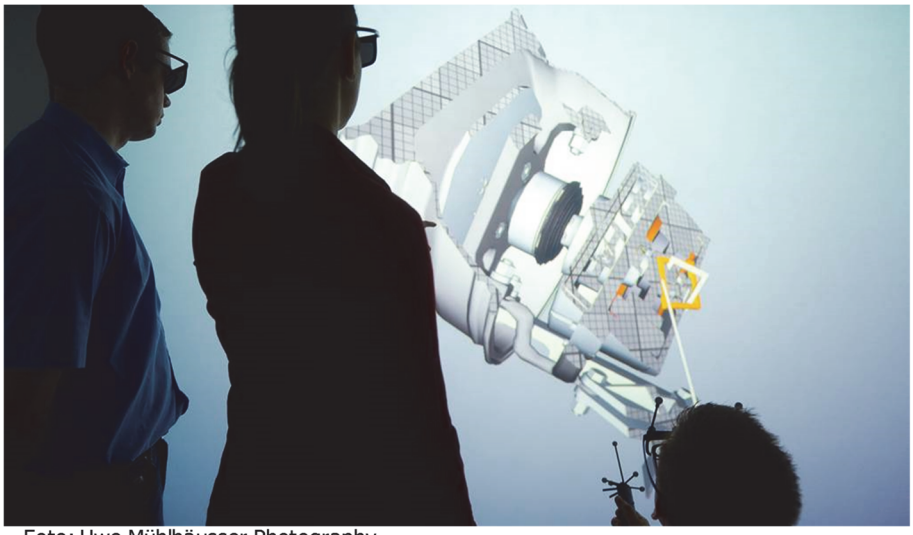


Foto: Uwe Mühlhäusser Photography

Digital Engineering am Beispiel der Virtual Reality

Auch in diesem Jahr hat der KTmfk mit einem interessanten Programm seinen Beitrag geleistet. Das Abendprogramm erlaubt einen Einblick in aktuelle Forschungsfelder des Lehrstuhls: So fanden über den ganzen Abend bis in die Nacht durchgängig Präsentationen in der Virtual-Reality-Anlage statt, wodurch den Besuchern die Technik „zum Greifen nah" gebracht werden kann. Darüber hinaus wurden beispielsweise die Themen 3D-Druck, Leichtbau, Bauteil-Lebensdauer, Verschleiß sowie Energieeffizienz anschaulich anhand von Exponaten und Prüfständen präsentiert. In diesem Zusammenhang stand auch das Beschichtungslabor des Lehrstuhls zur Besichtigung offen.

Foto: KTmfk/T. Schröppel

Standorte und Ausstattung

Standortzuwachs – jetzt auch KTmfk @ AEG

Der Lehrstuhl verfügt inzwischen an mehreren Standorten in Erlangen und Nürnberg über Räumlichkeiten mit insgesamt rund 1 700 m². Der Hauptstandort auf dem Südgelände der Universität (Martensstraße 9, Erlangen) verfügt über rund 600 m², von denen 240 m² Bürofläche sowie 290 m² Labor- und Prüffeldflächen sind. In der Egerlandstraße befinden sich zudem Projekthäuser, die für seminaristischen Unterricht und als Schulungsräume genutzt werden. Der Zweitstandort auf dem Röthelheimgelände der Universität (Paul-Gordan-Straße 5, Erlangen) umfasst weitere 650 m², die in 470 m² Büro- und 70 m² Laborfläche aufgeteilt sind.

Im Jahr 2017 wurde der Drittstandort „Auf AEG" in der Fürther Straße in Nürnberg bezogen. Der Standort verfügt über rund 200 m² Fläche, von denen ca. 140 m² als Bürofläche sowie 30 m² als Prüffeld eingerichtet sind. Die Bürofläche bietet neun PC-Arbeitsplätze für festangestellte Mitarbeiter sowie zwei zusätzliche Labor- und Studentenarbeitsplätze. Zudem ist ein Büro für die Lehrstuhlleitung eingerichtet, das darüber hinaus als Besprechungsraum dient. Das Prüffeld enthält Modell- und Komponentenprüfstände zur Untersuchung des Einflusses von Schmierstoffen, Oberflächenmikrotexturen oder Beschichtungen auf Reibungs- und Verschleißverhaltens in hoch belasteten Wälz- und Gleitkontakten. Derzeit ist der Standort „Auf AEG" mit acht Mitarbeitern und einem Oberingenieur voll besetzt.

Foto: KTmfk/T. Breitsprecher

Hauptstandort auf dem Südgelände

Foto: KTmfk/S. Tremmel

Foto: KTmfk/T. Breitsprecher

Zweitstandort (links) und Projekthäuser (rechts)

Foto: KTmfk/P. Kügler

Drittstandort „Auf AEG" in Nürnberg

Ausstattung

Lehrstuhlbibliothek

Die Lehrstuhlbibliothek des KTmfk ist an die Technisch Naturwissenschaftliche Zweigbibliothek (TNZB) der Universität angegliedert. Der derzeitige Bestand der Bibliothek des Lehrstuhls liegt bei etwa 3 200 Lehr- und Fachbüchern sowie studentischen Arbeiten. Darunter sind etwa 750 Studien-, Bachelor- und Projektarbeiten sowie rund 300 Diplom- und Masterarbeiten, die seit Bestehen des Lehrstuhls in die Bibliothek aufgenommen worden sind.

Vielfältige Lehr- und Fachbücher sind zu nahezu allen Teilgebieten der Konstruktionstechnik in der Bibliothek des KTmfk vertreten. Besonders umfangreich ist die Bibliothek vor allem in den Bereichen *Technisches Zeichnen, Maschinenelemente und Beschichtungen,* sowie *fertigungsgerechtes* und *methodisches Konstruieren*. Zu weiteren wichtigen Teilgebieten wie *Rechnerunterstütztes Konstruieren* und *Leichtbau* sind ebenfalls zahlreiche Lehr- und Fachbücher verfügbar.

Daneben enthält die Bibliothek des Lehrstuhls eine Vielzahl einschlägiger Tagungsbände, Normen und Richtlinien sowie verschiedene laufende technische und wissenschaftliche Zeitschriften. Unter den Zeitschriften sind vor allem *Konstruktion, lightweight design, Tribologie und Schmierungstechnik* sowie das *Journal of Tribology* und *Tribology Transactions* zu nennen.

Mechanik- und Elektronikwerkstatt des Lehrstuhls

Der KTmfk verfügt über eine eigene Werkstatt, so dass Reparaturen sowie Modifikationen an mechanischen Komponenten für Prüfstände durchgeführt und Versuchsproben sowie kleinere Vorrichtungen selbst angefertigt werden können. Zur Ausstattung der Werkstatt zählen – neben einem umfangreichen Sortiment von mechanischem und elektrischem Handwerkzeug, werkstoffspezifischem Zerspanungswerkzeug sowie Messwerkzeug – eine CNC-Bohr-/Fräsmaschine, eine Drehmaschine, eine Säulenbohrmaschine, eine Bandsäge, eine Doppelschleifmaschine, Schutzgasschweißgerät sowie ein Sicherheits-Sauger. Im Berichtszeitraum wurden das werkstoffspezifische Zerspanungswerkzeug, der Sicherheits-Sauger und die neue Bandsäge beschafft. Für kleinere Elektronikarbeiten, beispielsweise das Bekleben von Bauteilen mit Dehnmessstreifen und deren Verdrahtung, das Aufbringen und Verbinden elektronischer Bauteile auf Platinen oder das Löten elektrischer Kontakte und das Prüfen von Schaltungen stehen verschiedene Geräte zur Verfügung. Hierzu gehören Lötstationen, Multimeter, Oszilloskope und ähnliches.

IT-Infrastruktur

Hardware

Der Lehrstuhl verfügt über eine leistungsfähige IT-Ausstattung, die durch regelmäßige Investitionen auf dem aktuellen Stand der Technik gehalten wird. Das Windows-Domänen-Netzwerk umfasst derzeit etwa 65 Arbeitsplatzrechner, 32 Laborrechner, 30 Studentenarbeitsplätze und 14 große 17"-Notebooks in den beiden Projekthäusern. Die Arbeitsplatzrechner verfügen in der Regel über 4 Prozessorkerne, 16 GB RAM und zwei Flachbildschirme. Ähnlich leistungsfähig sind die Rechner für die Studenten ausgestattet. In das Netzwerk sind zehn Server und zwei NAS-Systeme integriert. Diese stellen verschiedene Dienste, etwa Domänenserver, Dateiserver, Exchange-Mailserver, Datensicherung mit Bandlibrary, PDM-Server, Terminalserver, Hyper-V-Server (auf diesen laufen derzeit 10 weitere virtualisierte Rechner) zur Verfügung. Für das Drucken stehen mehrere Laserdrucker sowie drei MFC-Geräte (Kopierer/Scanner/Drucker) zur Verfügung. Für besonders hochwertige Poster-drucke kann darüber hinaus auf eine Reihe von Großformatdrucker des Regionalen Rechenzentrums Erlangen (RRZE) zurückgegriffen werden. Für den Einsatz in Lehrveranstaltungen, bei Seminaren und auf Tagungen stehen sechs leistungsstarke Notebooks, ein portabler Projektor und ein portabler Visualizer zur Verfügung. Weiterhin sind die beiden Seminarräume des Lehrstuhls sowie die KTmfk Projekthäuser mit fest installierten Projektoren ausgestattet.

Software

Die Softwareausstattung setzt sich einerseits aus marktgängigen Programmen zur Text-, Grafik- und Bildverarbeitung sowie zur Tabellenkalkulation, andererseits aus Programmen für spezielle Anwendungen im Bereich des CAx zusammen. Alle Programme setzen dabei auf dem Betriebssystem Microsoft Windows auf. Im Büroalltag wird Microsoft Office 2016 verwendet.

Für CAD-Anwendungen sind in Forschung und Lehre aktuell die Systeme Creo Parametric, CATIA V6 und Siemens NX im Einsatz. Für die am Lehrstuhl durchzuführenden Berechnungsaufgaben haben sich im Bereich der Finite Elements Analyse die Programmsysteme Ansys, Abaqus und HyperWorks bewährt, im Bereich der Mehrkörpersimulation die Programmsysteme LS-Dyna und simtk OpenSIM. MathCAD und Matlab/OpenSIM stellen weitere Softwarepakete für spezielle Simulationsaufgaben dar. Zur Messdatenerfassung an den verschiedenen Prüfständen des Lehrstuhls wird in der Regel TwinCAT genutzt. Neben den beschriebenen, regelmäßig genutzten Programmen kommt in einzelnen Forschungsvorhaben von Fall zu Fall eine Vielzahl weiterer Softwareanwendungen zum Einsatz.

mfkTriboFEM

Das eigenentwickelte, Finite-Elemente-basierte und in der Software Comsol Multiphysics implementierte Simulationswerkzeug mfkTriboFEM dient als numerische Lupe in einzelne thermo-elastohydrodynamische (TEHD) Kontakte, wie sie beispielsweise in Wälzlagern, Zahnrädern, Nocken/Stößel-Paarung oder auch künstlichen Knieimplantaten vorkommen. Somit lassen sich orts- und zeitaufgelöste Untersuchungen des Schmierungszustandes, der Pressungen, der Temperaturen und der Spannungen in Abhängigkeit der Fluid- und Materialeigenschaften, der Belastung sowie der Kontaktkinematik durchführen. Somit können zum Beispiel Aussagen über potentiell zu erwartende Verschleißerscheinungen getroffen oder dünne Oberflächenschichten sowie Oberflächenmikrotexturen für Wälz/Gleit-Kontakte beanspruchungsgerecht auslegt werden.

mfkTOPO

Durch gezielte Nutzung der anisotropen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) lassen sich effektive Leichtbaustrukturen konstruieren. Ein Werkzeug in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses ist die Topologieoptimierung, um optimale Lastpfade für ein späteres Design zu finden. Diese optimalen Lastpfade variieren jedoch je nach verwendetem Material – insbesondere für FKV mit ihrem hohen Anisotropiegrad sind beispielsweise größere schubbeanspruchte Bereiche zu vermeiden. Um auf die speziellen Eigenschaften von FKV einzugehen, wurde mit *mfk*TOPO am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik ein Topologieoptimierungsverfahren für transversal isotrope Materialien entwickelt.

Ausgehend von einem FE-Modell mit Ausgangsbauraum, Randbedingungen, Lasten und dem gewählten Materialmodell (z. B. CFK) wird so ein Designvorschlag generiert, der als Ausgangspunkt für spätere Entwürfe dienen kann und bereits möglichst ideale, materialabhängige Lastpfade enthält.

mfkCODE

Ein am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik entwickelter Auslegungsansatz für beanspruchungsgerechte, endlosfaserverstärkte Verbundbauteile ist implementiert im Softwaretool *mfk*CODE (mfk COmposite DEsigner). Das Tool ist FE-basiert und unterstützt den Produktentwickler strukturiert bei der Auslegung mit dem anspruchsvollen Werkstoff bis zum fertigen Laminataufbau. Ausgehend von einer Schalengeometrie und Lastfällen werden Schritt für Schritt lokal relevante Faserorientierungen identifiziert, Bereiche ähnlicher Faserorientierung zusammengefasst und diese anschließend teilautomatisiert nachbearbeitet, um möglichst regelmäßige Lagenzuschnitte zu erhalten.

Die resultierenden Lagenzuschnitte werden anschließend mittels eines genetischen Algorithmus hinsichtlich Lagenreihenfolgen und diskreter Lagendicken optimiert, um das Leichtbaupotential maximal auszuschöpfen. Ergebnis ist ein vollständiger Lagenaufbau für das endlosfaserverstärkte Verbundbauteil.

NVIDIA GPU Grant

Die fortschreitenden Entwicklungen im Bereich der Computertechnik erlauben mittlerweile eine effiziente Unterstützung von rechenintensiven Aufgaben durch Grafikkarten. Maßgeblich an dieser Entwicklung beteiligt ist die Firma NVIDIA mit ihren gleichnamigen Grafikkarten. Mittlerweile ist man in der Lage vor allem Matrix-Berechnungen, wie sie zum Beispiel in FEM-Simulationen oder im Bereich des maschinellen Lernens zum Einsatz kommen, effizient auf der Grafikkarte rechnen zu können. Dabei wird die Leistung moderner Prozessoren aufgrund der parallelen Berechnung in allen Belangen übertroffen.

So hat sich für moderne Grafikkarten neben dem Einsatz in der Unterhaltungsindustrie ein weiteres Gebiet ergeben, die rechnerunterstütze Forschung. Recht früh hat sich die Firma NVIDIA dazu bekannt, Forschungstätigkeiten durch die Unterstützung mit hoch-performanten Grafikkarten zu unterstützen. Im Rahmen des sogenannten „NVIDIA GPU Grant" können sich Forschungsprojekte auf solche Spenden bewerben. Aufgrund der weitreichenden Kompetenzen des KTmfk im Bereich Berechnung und Simulation, sowie den neuen Forschungstätigkeiten des KTmfk auf Gebieten des maschinellen Lernens und der Virtual Reality (VR-AR-Technologien) hat sich der KTmfk schon mehrmals erfolgreich um einen solchen „GPU Grant" beworben. So unterstützt uns die Firma NVIDIA mit mittlerweile vier hochperformanten Grafikkarten.

Foto: KTmfk/C. Sauer

Eine der gespendeten NVIDIA Titan Xp bei der Anlieferung

Eine Übersicht mit den bisher zur Verfügung gestellten Grafikkarten findet sich nachfolgend:

- Tesla K40, erhalten im September 2016, Verbleib: Rechenserver für Hilfskräfte & studentische Arbeiten, sowie für Berechnungen der Mitarbeiter
- TITAN X, erhalten im Dezember 2016, Verbleib: Mitarbeiterrechner für Forschung im Bereich VR-AR-Technologien
- TITAN Xp, erhalten im April 2017, Verbleib: Mitarbeiterrechner für Forschung im Bereich VR-AR-Technologien
- TITAN Xp, erhalten im Juli 2018, Verbleib: Mitarbeiterrechner für Forschung im Bereich maschinelles Lernen

Wir möchten uns ausdrücklich für die Unterstützung durch die Firma NVIDIA bedanken. Von der Rechenleistung solcher Grafikkarten profitieren unsere Forschungstätigkeiten auf den oben genannten Gebieten.

VR-Labor

Im lehrstuhleigenen VR-Labor können Konstruktionen oder Simulationsergebnisse in der Gruppe realitätsnah betrachtet und untersucht werden. Durch die stereoskopische Visualisierung und den räumlichen Eindruck wird den Teilnehmern, die aus unterschiedlichen Disziplinen stammen können, das Verständnis komplexer Geometrien oder Simulationsdaten erleichtert. Die Zusammenarbeit wird angeregt und durch die Kommunikation über technische Probleme und Lösungen können mögliche Fehler frühzeitig aufgedeckt und bereits vor der Realisierung des Produkts in einem physischen Prototyp behoben werden.

Hierzu steht ein passiv-stereoskopisches Powerwall-System der Firma 3DIMS zur Verfügung. Dabei werden Bilder von zwei Projektoren mit linearen Polarisations-Filtern über einen Spiegel auf eine 3,40 m x 2,12 m große Rückprojektions-Scheibe geworfen. Die Berechnung der visuellen Ausgabe erfolgt in einem Computercluster, das aus einem Steuer- und zwei Grafik-Rechnern besteht. Die genaue Bewegungsverfolgung der Nutzer und der Eingabegeräte im Raum erfolgt über ein optisches Tracking-System der Firma ADVANCED REALTIME TRACKING. Durch den Einsatz von vier Infrarotkameras kann der Anwender den gesamten Raum im VR-Labor (in etwa 3 x 4 Meter) nutzen. Die Anlage kann von Interessenten aus dem industriellen Umfeld zum Beispiel zur Durchführung von Design Reviews, für Ergonomieuntersuchungen oder zur Analyse von Simulationsergebnissen gemietet werden.

Neben dem Powerwall-System verfügt der KTmfk auch über drei moderne Direktsicht-Head-Mounted-Displays (HMD). Diese ermöglichen vollständige Immersion in einer virtuellen Umgebung. Durch Linsen direkt vor den Bildschirmen kann ein Sichtfeld von bis zu 110° dargestellt werden. Interne und externe Sensoren ermöglichen die Verfolgung von Position und Orientierung im Raum. Es sind eine Oculus Rift CV und zwei HTC Vive Pro vorhanden.

Um ein markerloses Tracking der Hand- und Fingerpositionen im Raum zu ermöglichen, werden Leap Motion Sensoren an den HMDs montiert. Mit Hilfe dieser Technologie werden Methoden zur natürlichen und intuitiven Modellierung von CAD Daten in virtuellen Umgebungen erforscht.

Foto: KTmfk/B. Gerschütz

HTC Vive Pro mit Zubehör

In einer der beiden HTC Vive Pro ist ein System zur Erfassung der Pupillenposition integriert. Mithilfe des PupilLabs Binocular Eye Tracking AddOns ist ein exaktes Eye-Tracking innerhalt des HMD möglich. Die Daten werden verwendet, um die visuelle Darstellung gezielt anzupassen. So kann eine realistischere Darstellung, beispielsweise durch Berücksichtigung der Blickrichtung bei der Bildberechnung, erreicht werden. Zusätzlich wird das System im Rahmen von Untersuchungen im User Centered Design dazu verwendet, Produktareale zu identifizieren, auf die der Nutzer große Teile seiner Aufmerksamkeit legt.

Zusätzlich steht im VR-Labor als weiteres Eingabegerät das Haptiksystem VirtuoseV3D15-25 der Firma HAPTION zur Verfügung. Das Haptiksystem dient zur Interaktion mit virtuellen Objekten in sechs Input-Dimensionen (Rotation und Translation) und drei Output-Dimensionen (Translation). Über Servomotoren kann das System die in Simulationen berechneten Kräfte und Widerstände an den Benutzer weitergeben. Dieser bekommt dadurch den Eindruck, die simulierten Objekte und Oberflächen tatsächlich zu „berühren".

Labor für Oberflächen- und Schichtcharakterisierung

Picodentor

Mit Hilfe des Mikrohärtemessgeräts Picodentor HM500 der Firma HELMUT FISCHER, welches nach dem Last-Eindringtiefe-Verfahren arbeitet, können präzise Härte- und Elastizitätsmessungen an dünnen Schichten und modifizierten Oberflächen im Nanometerbereich durchgeführt werden. Neben der instrumentierten Eindringprüfung gemäß DIN EN ISO 14577-1 und ASTM E 2546 im Mikrobereich können durch schrittweise Be- und Entlastungsmessungen (ESP-Messungen) die Kenngrößen auch kraft- und tiefenabhängig bestimmt werden. Der Picodentor wurde im Juni 2018 neu beschafft und stellt derzeit eines der leistungsfähigsten, am Markt verfügbaren Geräte für die zuverlässige Bestimmung von Härte und Elastizität nach dem Last-Eindringtiefe-Verfahren dar.

Ritztester

Zur quantitativen Bestimmung der Haftung und Beurteilung von Formen des mechanischen Versagens dünner Schichten auf unterschiedlichen Substraten nach DIN EN ISO 20502 steht der am KTmfk konstruierte Ritztester RTG-2 zur Verfügung. Die Prüfung, bei der ein Eindringkörper über die zu prüfende Schichtoberfläche bewegt wird, kann sowohl unter linear ansteigender wie auch unter konstanter Last erfolgen. Als Eindringkörper können neben einem ROCKWELL-C-Diamantkegel auch Kugeln unterschiedlicher Radien – etwa zur Prüfung von Schichten auf Kunststoffsubstraten – eingesetzt werden. Auftretende Schädigungsformen entlang der Ritzspur werden anschließend lichtmikroskopisch ausgewertet.

Härteprüfer

Ein modifiziertes Eindruckverfahren mit Rockwell-Eindringkörper, durchgeführt auf dem Härteprüfgerät DuraJet 10G5 der Firma EMCO-TEST Prüfmaschinen wird zur qualitativen Ermittlung der Haftung von Schichten verwendet. Auf eine Rockwell-C-Härtemessung nach DIN EN ISO 6508 folgt eine Beurteilung der Schädigung im Randbereich und eine Einstufung in Haftfestigkeitsklassen gemäß DIN 4856. Das Härteprüfgerät selbst kann darüber hinaus für alle Härteprüfungen nach DIN EN ISO 2039-1, DIN 51917 DIN EN ISO 2039-2, DIN EN ISO 6506, DIN EN ISO 6507 und DIN EN ISO 6508 genutzt werden. Das flexibel einsetzbare und somit für die Lehrstuhlzwecke optimal geeignete Härteprüfgerät wurde im März 2016 neu beschafft.

Kalottenschleifgerät

Die Schichtdicke kann nach DIN EN ISO 26424 durch Erzeugen eines sphärischen Schliffes mit dem Kalottenschleifgerät KSG-2 und anschließender optischer Messung am Messmikroskop bestimmt werden. Es wurde am KTmfk konstruiert und gemeinsam mit der MEW der Technischen Fakultät gefertigt.

Tastschnittgerät

Im Berichtszeitraum wurde das Tastschnittgerät Form Talysurf PGI NOVUS der Firma TAYLOR HOBSON beschafft. Es bietet die Möglichkeit der Rauheit-, Kontur- und Durchmessermessung und stellt das derzeit leistungsfähigste und innovativste Messgerät auf dem Markt dar. Die Konturmessung beinhaltet unter anderem die Messung von Radien, Winkeln und Abständen. Außerdem können mithilfe der Metrology 4.0 Software und des motorisierten Y-Tisches Bauteile präzise zeilenweise in Y-Richtung verschoben werden und die übliche 2D-Messung wird damit um die 3-D-Topografiemessung erweitert.

Kontaktwinkelmessgerät

Zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie, ein Maß für die Adhäsionsneigung und die Benetzungsfähigkeit von Oberflächen, dient am KTmfk ein Kontaktwinkelmessgerät G10 der Firma KRÜSS. Verschiedene Testflüssigkeiten mit bekannten Oberflächenspannungen werden in Tropfenform aufgebracht und die resultierenden Winkel zur Festkörperoberfläche gemessen. Aus diesen Winkeln lässt sich unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften der Testflüssigkeiten die Oberflächenspannung der untersuchten Probe nach DIN 55660 rechnerisch ermitteln.

Laserrastermikroskop

Der KTmfk betreibt zusammen mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik (LFT) ein Laserrastermikroskop VK-X210 der Firma KEYENCE. Es verfügt über eine kurzwellige Laserlichtquelle zur Erfassung von Höheninformationen sowie eine Weißlichtquelle zur Beleuchtung. Der gleichzeitige Einsatz beider Lichtquellentypen ermöglicht scharfe, farbige, lichtintensive und relieforientierte Aufnahmen. Das Mikroskop tastet den Betrachtungsbereich mit Hilfe eines optischen X-Y-Scansystems ab. Durch Verschieben des Objektivs entlang der Z-Achse und wiederholtem Scannen werden Höheninformationen gewonnen. Das Gerät bietet vielfältige Möglichkeiten bei der Profilmessung. Typische Anwendungen sind Charakterisierungen von Oberflächentopographien sowie Analysen von Reibspuren zur Ermittlung von volumetrischem Verschleiß im Rahmen der Charakterisierung dünner Schichten.

Tribometrielabor

Impact Tester

Beim Kugelschlagversuch oder Impact-Test werden Schicht-Substrat-Systeme wiederholten Schlagbelastungen ausgesetzt und anschließend auf Rissbildung und Schichtablösungen untersucht. Hierfür steht der am Lehrstuhl eigens entwickelte Impact-Tester IT 1000/100 zur Verfügung. Unter Berücksichtigung des Kugeldurchmessers, der Schlagkraft und der elastischen Eigenschaften von Kugel, Schicht und Substrat können mittels der HERTZschen Theorie die Spannungszustände im beanspruchten Bereich und durch die Anzahl der Schläge die Schädigungsenergie bestimmt werden. Rückschlüsse auf die dynamische Festigkeit eines Schicht-Substrat-Verbundes werden durch Rechenmodelle auf Basis der Finite-Elemente-Methode in einer WÖHLER-Kurve beziehungsweise als SMITH-Diagramm ausgegeben. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für eine sichere Auslegung beschichteter Bauteile unter Schlagbelastung.

Loadscanner

Der KTmfk verfügt über einen patentierten LOAD SCANNER TE 69 der Firma PLINT. Dieses Gerät bietet Prüfkonfigurationen zur Ermittlung von Reibungs- und Schädigungsverhalten verschiedener Materialien, Schmierstoffe und tribologisch wirksamer Schichten.

Im Load Scanner Versuch werden zwei gekreuzt angeordnete, typischerweise zylindrische oder stabförmige Probekörper linear gegeneinander bewegt. Dabei wandert der Berührpunkt während der Prüfung gleichzeitig auf beiden Proben entlang einer Kontaktlinie auf der Mantelfläche. Mithilfe einer Kraft-Weg-Kopplung wird die Normalkraft bei Vorwärtsbewegung linear erhöht beziehungsweise bei Rückwärtsbewegung linear verringert, sodass jeder Punkt der Kontaktlinie auf den Proben einer spezifischen Normalkraft zugeordnet werden kann. Dies ermöglicht eine Charakterisierung des lastabhängigen Reibungs- und Schädigungsverhaltens. Alternativ kann die Normalkraft über eine pneumatische Steuerungs- und Regelungseinheit unabhängig von der Bewegung variiert werden.

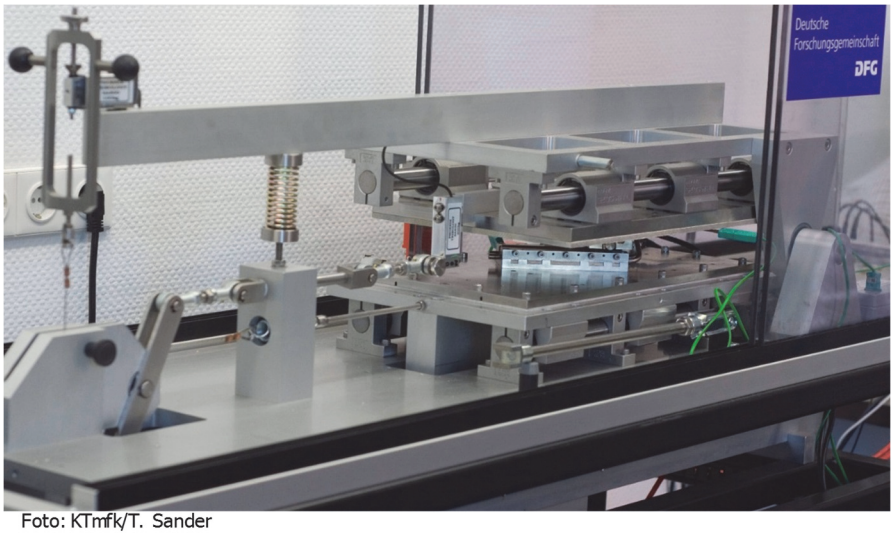


Foto: KTmfk/T. Sander

Loadscanner zur Ermittlung von Reibungs- und Schädigungsverhalten

Stift-Scheibe-Tribometer

Das Stift-Scheibe-Tribometer SST-1, welches zumeist als Kugel-Scheibe-Tribometer verwendet werden kann, eignet sich hervorragend für die meistgebräuchlichen Tribometeranforderungen. Bei klimatisierten Laborbedingungen können Versuche mit rotierender oder oszillierender Bewegung mit einer Normalkraft zwischen 4 N und 40 N gefahren werden. Die Steuerung und Messdatenerfassung des Gerätes wurde 2013 neu konzipiert und auf den aktuellen Stand der Technik gebracht.

Klima-Stift-Scheibe-Tribometer

Seit Anfang 2013 ist am Lehrstuhl das klimatisierte Stift-Scheibe-Tribometer K-SST im Einsatz. Wie sein nichtklimatisierter „Bruder" SST-1, besticht auch das K-SST durch seine Vielseitigkeit. Durch die komplette Neukonstruktion sind neben dem gleichmäßig rotierenden Betriebsmodus zusätzlich auch zyklische Versuche mit einem großen Spektrum an Schwenkwinkeln, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten möglich. Durch die Integration in eine Klimakammer KPK 200 der Firma FEUTRON ist das Versuchsklima in Bereichen von -20 bis +50 °C und 10 bis 98 % relativer Luftfeuchte wählbar. Das Testspektrum der bisherigen Tribometer wird hierdurch erheblich erweitert und die Prüfbedingungen können stärker dem entsprechenden Anwendungsfall angepasst beziehungsweise besser reproduziert werden.

Foto: KTmfk/T. Sander

Klima-Stift-Scheibe-Tribometer K-SST-1 im Betrieb

Temperiertes Vakuum-Stift-Scheibe-Tribometer

Spezielle Mechanismen, etwa in der Weltraum-, Röntgen- oder Fusionstechnik, müssen im Gegensatz zu konventionellen Systemen unter Ausschluss von Luft zuverlässig arbeiten. Materialpaarungen, die unter normalen Umgebungsbedingungen hervorragende Gleiteigenschaften besitzen, können im Vakuum ein völlig gegensätzliches Verhalten zeigen, da ihre guten Gleiteigenschaften nur durch Reaktion oberflächennaher Grenzschichten mit Bestandteilen aus der Luft ausgelöst werden (zum Beispiel bei Graphit). Nur wenige Forschungseinrichtungen verfügen über Prüfstände, um für solche Anwendungen geeignete Werkstoffpaarungen im Hinblick auf eine niedrige Reibung bestimmen zu können. Im Tribometer HTV-SST können Schichten in einem Vakuum von etwa 10^{-4} mbar und bis zu 300 °C getestet werden, alternativ auch in einer Gasumgebung mit bis zu zwei unterschiedlichen Gasen.

Zwei-Scheiben-Tribometer

Das Zwei-Scheiben-Tribometer 2-Disk des Herstellers Optimol Instruments dient grundlegenden, tribologischen Untersuchungen an zwei separat mit bis zu 4 000 min^{-1} angetriebenen und definiert bis zu 5 kN an den Mantelflächen zusammengepressten Scheiben. Zwei-Scheiben-Prüfstände gehören zu den etablierten tribologischen Modellprüfständen für insbesondere grundlagenwissenschaftliche Untersuchungen von Gleit-/Wälzkontakten. Die Vorteile solcher Modellprüfstände liegen in den geometrisch einfachen Prüfkörpern mit flächiger oder balliger Mantelfläche, in den meist kürzeren Prüfzeiten sowie in der besseren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aufgrund einer kleineren Anzahl möglicher Störfaktoren. Zusätzlich können die Versuchsparameter bei gleichbleibend geringen Prüfkosten in einem weiten Bereich variiert werden. Die Scheiben können dabei trocken oder geschmiert mit einer Schmierstofftemperatur bis 150 °C betrieben werden. Darüber hinaus kann das Testgehäuse klimatisiert (relative Luftfeuchte zwischen 30 % und 90 %) beziehungsweise evakuiert (Druck bis 10^{-3} mbar) werden. Neben der Reibungskraft können während des Betriebes unter anderem der Verschleiß mittels Summenverschleißmessung sowie Radionuklidtechnik, der Schalldruckpegel, der elektrische Widerstand als Rückschluss auf den Schmierungszustand, die elektrische Kapazität als Rückschluss auf die Schmierfilmhöhe sowie die Testscheiben- und Schmierstofftemperatur erfasst werden. Das Gerät wurde 2019 im Rahmen eines DFG-Großgeräteantrages neu beschafft und besitzt laut Hersteller in seiner Konfiguration und Flexibilität weltweit ein Alleinstellungsmerkmal.

Foto: KTmfk/M. Marian

Vakuum-Vierkugelapparat

Im Vierkugelapparat wird der Kugel/Laufbahn-Kontakt, wie er in Wälzlagern anzutreffen ist, mithilfe des Kontakts einer Antriebskugel mit drei oder mehreren Umlaufkugeln auf Modellebene abgebildet. Ursprünglich für die Schmierstoffprüfung nach DIN 51350 entwickelt, kann der Vierkugelapparat auch für Verschleißuntersuchungen herangezogen werden. Bei dieser Variante des Prüfstands liegt der Fokus auf der Prüfung von Prüfkörpern unter Vakuumbedingungen (Hochvakuum bis 5×10^{-5} mbar). Dabei wird das Reibungsmoment bei unterschiedlichen Temperaturen über die vergleichbar zu Wälzlagerprüfständen kurze Versuchszeit aufgezeichnet und ausgewertet. Somit lässt sich beispielsweise die Gebrauchsdauer von Festschmierstoffschichten für Vakuumanwendungen untersuchen. Der Vakuum-Vierkugelapparat wurde 2017 vom Lehrstuhl für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) der TU Darmstadt übernommen und am KTmfk mit Hilfe der Mechanikwerkstatt der Technischen Fakultät 2018/2019 komplett überholt.

Schwenkscheibe-Ring-Tribometer

Oberflächenmodifikation können dabei helfen, das Reibungs- und Verschleißverhalten des Nocken/Stößel-Kontaktes im Ventiltrieb zu verbessern. Hierzu verfügt der KTmfk über einen Modellprüfstand (SSRT), bei dem das Originalsystem auf einen Kontakt zwischen rotierendem Scheibenmantel mit oszillierender Ringoberfläche reduziert wird. Die durch einen Piezo-Pulser aufgebrachte Normalkraft erlaubt die Untersuchung von einzelnen Ausschnitten eines sonst dynamischen Beanspruchungskollektivs in einem Linienkontakt. Neben dem Schmierungszustand und dem Reibungsverhalten ist insbesondere auch das Verschleißverhalten Gegenstand der Untersuchungen. Das SRT wurde 2019 in Betrieb genommen.

Beschichtungstechnikum

Vakuumbeschichtungsanlage

Zur Schichtentwicklung und Bauteilbeschichtung verfügt der KTmfk über eine moderne kombinierte PVD-/PACVD-Beschichtungsanlage vom Typ TT 300 K4 der Firma H-O-T HÄRTE- UND OBERFLÄCHENTECHNIK. Mit einem für Forschungszwecke skalierten Innenraumvolumen des Rezipienten von ca. 300 l bietet die Anlage sowohl eine industrietypische automatisierte Prozessführung als auch eine bestmögliche Übertragbarkeit erlangter Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Schichteigenschaften auf Serienprozesse. Die Beschichtung im Fein- und Hochvakuum ist durch (reaktives) Kathodenzerstäuben (PVD-Sputtern), (reaktives) Lichtbogenverdampfen (PVD-Arc) oder plasmaaktivierte chemische Gasphasenabscheidung (PACVD) möglich. Hierfür ist die Beschichtungsanlage mit vier PVD-Beschichtungsquellen (zwei gesteuerte Arc-Rechteckkathoden und zwei kontinuierlich beziehungsweise MF-gepulste Sputter-Rechteckkathoden nach dem Magnetronprinzip) ausgestattet. Mittels eines Flüssigkeitsverdampfers können flüssige Medien in den gasförmigen Zustand überführt und dessen Bestandteile dem Beschichtungsprozess zusätzlich zu Inert- und Reaktivgasen zugeführt werden. In plasmaunterstützten Prozessen sind teilweise Prozesstemperaturen von unter 200 °C möglich, was diese Verfahren insbesondere zur Beschichtung von temperaturempfindlichen Werkstoffen wie Leichtmetallen und Kunststoffen attraktiv macht. Das in der Mitte des Rezipienten angeordnete Chargiergestell erlaubt eine dreifache Rotation der zu beschichtenden Bauteile um ihre eigene Achse und somit eine gleichmäßige Beschichtung. Für die Prozessgas- und Restgasanalyse verfügt die Anlage über ein Massenspektrometer QMG 220 der Firma PFEIFFER.

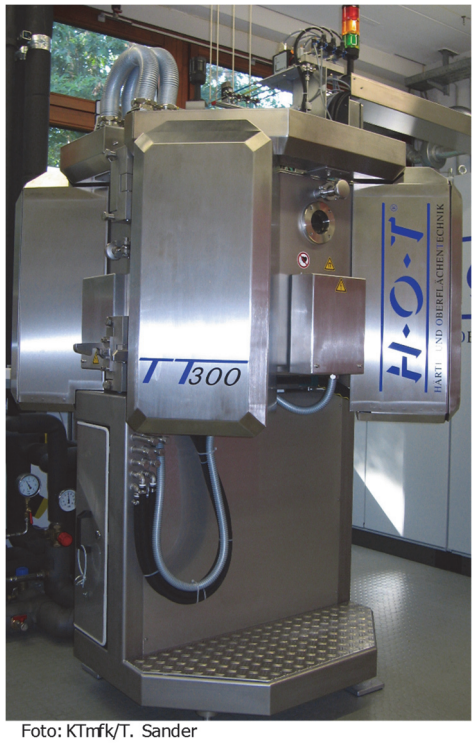


Foto: KTmfk/T. Sander

Wälzlagerforschungszentrum

Wälzlagerreibungsprüfstand

Für die experimentelle Untersuchung der Wälzlagerreibung unter stationären und vor allem auch instationären Betriebsbedingungen wurde der Wälzlagerreibungsprüfstand WRP entwickelt. Dieser Prüfstand ermöglicht es, Wälzlager sowohl mit Drehzahl- als auch Lastkollektiven zu beaufschlagen und das in den Lagern entstehende Reibungsmoment zu messen. Der Prüfstand ist bei radialer Belastung als 4-Lager-Prüfstand und bei axialer Belastung als 2-Lager-Prüfstand ausgeführt. Unter Radiallast werden vier Prüflager, die symmetrisch auf einer durchgehenden Welle angeordnet sind, gleichzeitig getestet. Die Lager werden durch diese Anordnung stets gleichmäßig belastet, wobei die äußeren beiden Lager der Abstützung dienen und über die beiden mittleren Lager die Lasteinleitung erfolgt. Bei axialer Belastung wird auf die beiden mittleren Lager verzichtet und die Axialkraft über das linke der beiden äußeren Stützlager, über einen axial verschiebbaren Lagerbock, eingeleitet und durch das rechte Lager abgestützt. Die Belastungskraft wird dabei, sowohl axial als auch radial, durch pneumatische Balgzylinder aufgebracht. Diese ermöglichen eine radiale Belastung je Lager von bis zu 30 kN und eine axiale Belastung je Lager von bis zu 10 kN. Der Antriebsmotor ermöglicht über einen Zahnriemenantrieb die Prüflager mit einer Drehzahl von bis zu 15 000 min^{-1} zu beaufschlagen. Die Belastungen sowie die Drehzahl können dabei als Kollektive aufgebracht werden. Das Hauptaugenmerk der Messungen am Wälzlagerreibungsprüfstand liegt auf dem entstehenden Reibungsmoment der Wälzlager. Dieses Reibungsmoment wird mittels einer Drehmomentmesswelle erfasst, die direkt in den Antriebsstrang der Lagerung integriert ist. Durch diese Bauweise wird eine Messung des entstehenden Lagerreibmoments mit hoher Genauigkeit erreicht.

Des Weiteren werden die entstehenden Lagertemperaturen in der Lastzone und in der lastfreien Zone mittels Pt100-Temperatursensoren bestimmt. Weitere Messgrößen sind die Drehzahl, die Radialkraft, die Axialkraft und die Umgebungstemperatur. Zur Untersuchung weiterer Einflussgrößen auf das Reibungsmoment können verschiedene Schmierstoff- und Lagerparameter auf dem Wälzlagerreibungsprüfstand eingestellt werden. Bei den Schmierstoffparametern kann vor allem die Schmierstoffart, das heißt Öl- oder Fettschmierung, geändert werden. Auch die Verwendung unterschiedlicher Ölviskositäten ist möglich und die Schmierstoffmenge ist auf dem Prüfstand einstellbar.

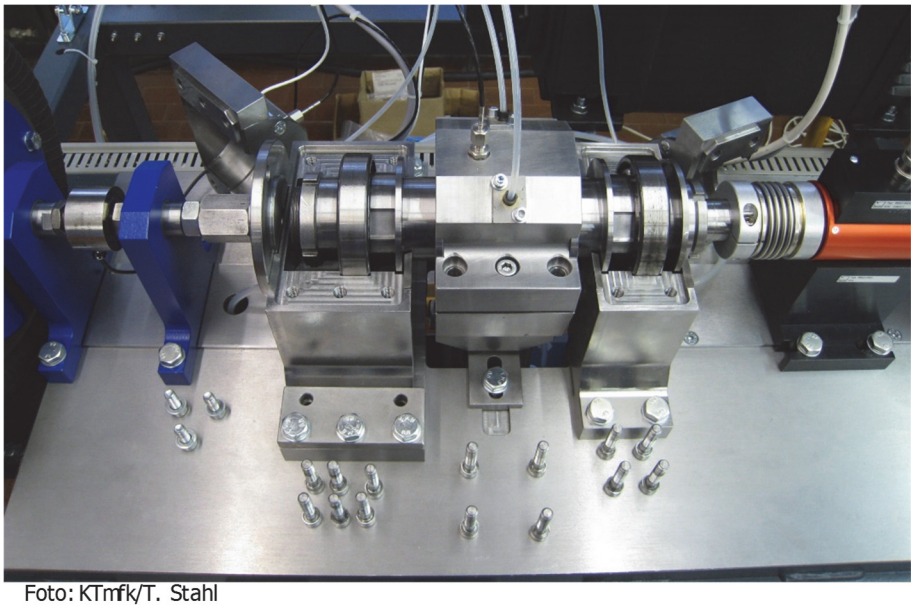
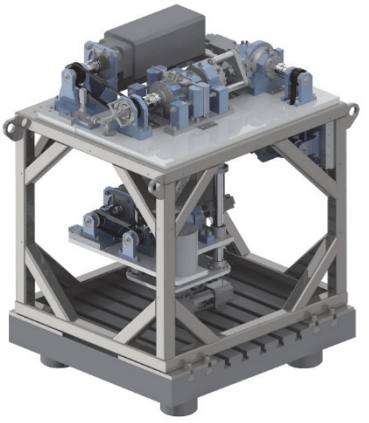


Foto: KTmfk/T. Stahl

Das Herzstück des Wälzlagerreibungsprüfstands

Wälzlagerschwingungsprüfstand



Mit dem Wälzlagerschwingungsprüfstand lassen sich die Auswirkungen von Axialschwingungen der Welle auf Reibungsverluste und Verschleiß in Zylinderrollenlagern untersuchen. Insbesondere der Einfluss der Schwingungsamplitude und -frequenz aber auch der radialen Belastung und der Drehzahl kann am Wälzlagerschwingungsprüfstand analysiert werden. Über einen mechanischen Exzenter werden axiale Schwingungen der Prüflagerwelle mit Schwingungsfrequenzen bis 25 Hz ermöglicht. Mittels eines Schrittmotors lassen sich Schwingungsamplituden bis zu 0,5 mm realisieren. Das Wälzlager kann mit einer Drehzahl von bis zu 6 000 min-1 und einer radialen Last von bis zu 20 kN betrieben werden.

Systemprüfstand Wälzlager

Der Systemprüfstand Wälzlager (SPW) dient umfassender Versuche zur Qualifizierung von Lagerungs- und Schmierungskonzepten für Wälzlager. Ursprünglich für die Qualifizierung eines neuartigen Schmierungskonzepts für Rotorlagerungen großer Elektromaschinen unter Nutzung von Schmierringen konstruiert, lässt sich der Prüfstand auch für weitere Untersuchungen, etwa zu Mindestlast oder Verschleiß bei Wälzlagern, nutzen. Um die Umgebungsbedingungen möglichst realitätsgetreu abzubilden, können am Prüfstand unter anderem Lagerdrehzahlen bis zu 4 500 min^{-1} und Radialkräfte bis zu 16 kN je Lager variabel eingestellt werden.

Zudem besteht die Möglichkeit Welle, Gehäuse und Schmierstoff aktiv auf bis zu 130 °C zu beheizen oder die gesamte Lagereinheit auf bis zu -20 °C zu kühlen. Ein separates Gebläse erlaubt die Simulation der Luftströmung, wie sie bei Elektromotoren zur Kühlung verwendet wird. Ein modularer Aufbau stellt sicher, dass verschiedene Lagergrößen, Schmier- und Dichtsysteme mit geringem Rüstaufwand und wenigen zusätzlichen Bauteilen geprüft werden können. Eine Software mit grafischer Benutzeroberfläche erlaubt die Steuerung des Prüfstands. Weiterhin ermöglicht sie die Erfassung und Auswertung von Messwerten, wie zum Beispiel der Lager- und Schmierstofftemperatur sowie des Öl-Volumenstroms.

Foto: KTmfk/M. Müller

Wälzlagerschleuderprüfstand

Im Bereich der Wälzlagertechnik werden Versuche verstärkt zur Analyse außergewöhnlicher Einsatzbedingungen sowie zur Validierung von Simulationswerkzeugen herangezogen. Die Untersuchung des Reibungsverhaltens von Wälzlagern unter Fliehkrafteinwirkung ermöglicht der Wälzlagerschleuderprüfstand WSP. Er wurde im Rahmen eines industriegeförderten Forschungsprojektes entwickelt. Mit einer Gesamtlänge von 3 m, einer Breite von 1,6 m, einer Höhe von 2,8 m und einer Gesamtmasse von 16 Tonnen stellt er das Schwergewicht unter unseren Prüfständen dar. Erst der Einsatz zahlreicher Sonderbauteile aus den verschiedensten Bereichen der Technik haben die Realisierung dieses Prüfstandes möglich gemacht. Dank des Wälzlagerschleuderprüfstandes ist es uns möglich, einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz moderner Maschinenelemente zu leisten.

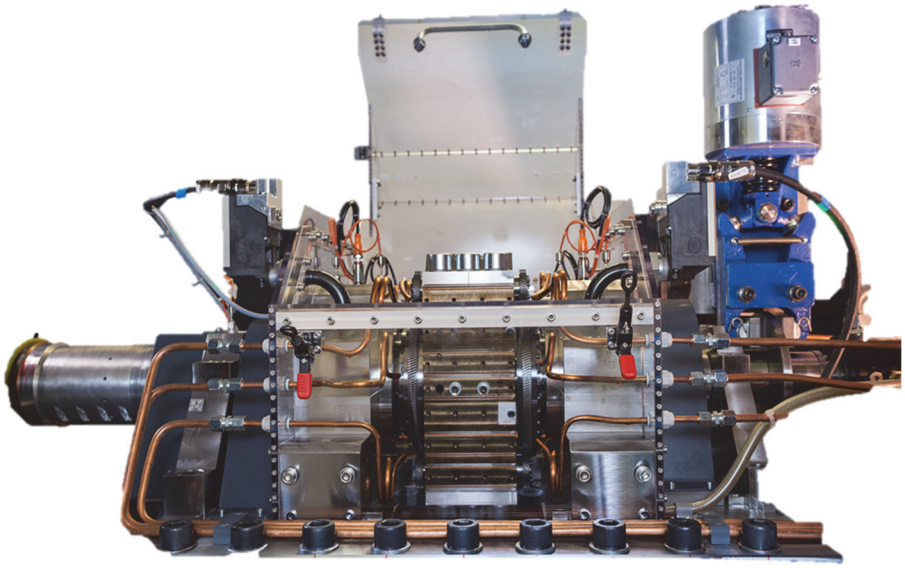


Foto: Max Etzold Fotografie

Wälzlagerschwenkbewegungsprüfstand

Mit dem Wälzlagerschwenkbewegungsprüfstand (WSBP) kann die Ermüdungslebensdauer von Wälzlager für kleine Schwenkbewegungen untersucht werden. Es lassen sich vier Versuchslager gleichzeitig prüfen. Die Schwenkbewegung kann von wenigen Zehntel Grad bis zu vollen Umdrehungen und einer Schwenkfrequenz von bis zu 20 Hz eingestellt werden. Die radiale Belastung kann mit bis zu 60 kN erfolgen. Während der Versuche ist eine optische Messung und Aufzeichnung der Wälzlager- beziehungsweise Wälzkörperkinematik möglich. Derzeit ist die Prüfung von Rillenkugellagern und Zylinderrollenlagern vom Typ 6210 sowie 210 vorgesehen. Durch Adaptionen lassen sich jedoch auch andere Bauformen und -größen prüfen. Der WSBP wurde 2019 in Betrieb genommen.

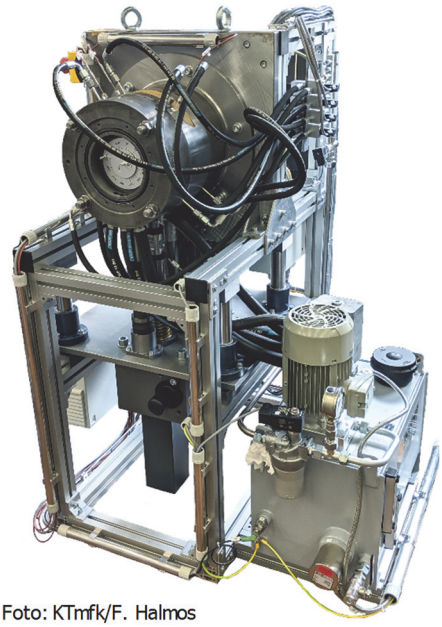


Foto: KTmfk/F. Halmos

Vakuum-Systemprüfstand für Wälzlager

Mithilfe eines eigens am Lehrstuhl konstruierten Vakuum-Systemprüfstands (V-SPW) ist es möglich, die Gebrauchsdauer von Radiallagern mit einem Durchmesser bis zu 45 mm unter Hochvakuum von etwa 10^{-4} mbar zu untersuchen. Dabei lassen sich definierte thermische (bis 300 °C) und mechanische Belastungen (bis 3,5 kN) auf diese aufbringen, sodass reale Betriebsbedingungen abgebildet werden können. Weiterhin können die Radiallager mit Drehzahlen bis zu 11 000 min^{-1} betrieben werden. Während der Untersuchung erfolgt die Überwachung verschiedener Parameter wie Temperatur, Körperschall, Drehzahl und Reibungsmoment.

Prüfzentrum Motorenkomponenten

Tassenstößel-Reibungsprüfstand

Beschichtungen, beispielsweise amorphe Kohlenstoffschichten (DLC), im Zusammenspiel mit Schmierstoffadditiven oder auf die Bauteiloberflächen gezielt aufgebrachte Mikrotexturen können dabei helfen, das Reibungs- und Verschleißverhalten des Nocken/Tassenstößel-Kontaktes im Ventiltrieb zu verbessern. Hierzu verfügt der KTmfk in Ergänzung zu den Modelltribometern 2ST und SSRT über zwei Tassenstößel-Komponentenprüfstände, welche zum Forschungszweck in Eigenkonstruktion entwickelt wurden und mithilfe deren das Betriebsverhalten schnell und mit guter Übertragbarkeit untersucht werden kann. Erreicht wird dies durch eine reduzierte Abbildung des Ventiltriebs in Form eines einzelnen Tasse/Nocken-Kontaktes. Der Tassenstößel-Reibungsprüfstand (TSRP) dient der Durchführung von Kurzzeitversuchen zur Ermittlung des Reibungsverhaltens. Hierzu werden die Reibungs- und Normalkräfte im Kontakt, das anliegende Drehmoment, die Drehzahl sowie die Nockenwinkelstellung während der festgelegten Messrampen separat und zeitaufgelöst aufgezeichnet. Zusätzlich verfügt der Tassenstößel-Reibungsprüfstand über ein resistives Messsystem zur Schmierungszustandsüberwachung.

Foto: KTmfk/M. Marian

Tassenstößelreibungsprüfstand (links) und Tassenstößelverschleißprüfstand (rechts)

Tassenstößel-Verschleißprüfstand

Der Tassenstößel-Verschleißprüfstand (TSVP) erlaubt die Durchführung von Langzeitversuchen zur Untersuchung des Verschleißverhaltens in den Betriebszuständen eines Nocken/Tassenstößel-Kontaktes. Die Quantifizierung des Verschleißes erfolgt ex-situ durch geeignete Struktur- und Oberflächenanalysen. Zusätzlich wird das anliegende Drehmoment während der Messrampen zeitaufgelöst aufgezeichnet. Genau wie der TSRP, erlaubt der TSVP Drehzahlen bis 4 000 min^{-1}. Die Schmierung des Kontaktes mit regulierbarer Fördermenge erfolgt über ein bis zu 120 °C temperierbares Ölaggregat.

Prüfzentrum Leichtbau

Fallturm

Bevor Materialmodelle in der Crashberechnung eingesetzt werden können, ist eine Validierung im Versuch zwingend erforderlich. Dazu können am Fallturm einfache Bauteilversuche mittels Impaktor durchgeführt werden. Mit einer Fallhöhe von 2 m, Fallgeschwindigkeiten bis rund 5 m/s und einer variablen Impaktormasse bis zu 15 kg können Crashlastfälle nachgebildet werden. Die Auswertung der Versuche geschieht anhand der Bruchbilder sowie aufgenommener Kraft- und Wegsignale. In Verbindung mit dem optischen Auswertungssystem ARAMIS kann weiterhin eine Dehnungsauswertung der Prüfkörper erfolgen.

Steifigkeitsprüfzentrum

Der Steifigkeits- und Festigkeitsprüfstand ist ein modularer und erweiterbarer Prüfstand zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte von Demonstratoren und Probenkörpern. Es können Bauteile mit Abmessungen bis zu 1 500 mm × 1 000 mm × 1 000 mm aufgespannt und mit bis zu 50 kN geprüft werden, wobei die Erfassung der Verformungen wahlweise taktil oder optisch erfolgt.

Foto: KTmfk/S. Walbrun

Steifigkeits- und Festigkeitsprüfstand und Detailansicht der Messeinheit

Servohydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine

Mit der HTM 5020 der Firma ZWICK steht dem KTmfk ein leistungsfähiges Prüfsystem zur Verfügung, das sowohl zur Charakterisierung von Materialeigenschaften unter hochdynamischen Prüfbedingungen wie auch für Validierungsversuche an Bauteilen eingesetzt werden kann. Diese wurde im Rahmen eines DFG-Großgeräteantrags (INST 90/750-1 FUGG) beschafft. Prüfgeschwindigkeiten bis 20 m/s und Maximalkräfte bis 50 kN ermöglichen realistische Bedingungen für Crashversuche. Als Erweiterung zur HTM 5020 ist eine Temperaturkammer der Firma WEISS vorhanden. Mit ihr können neben Dehnratenabhängigkeiten auch Temperaturabhängigkeiten im Material- und Bauteilverhalten untersucht und verschiedene Produktumgebungen getestet werden. Die Kammer deckt einen Temperaturbereich von -60 bis +150 °C ab.

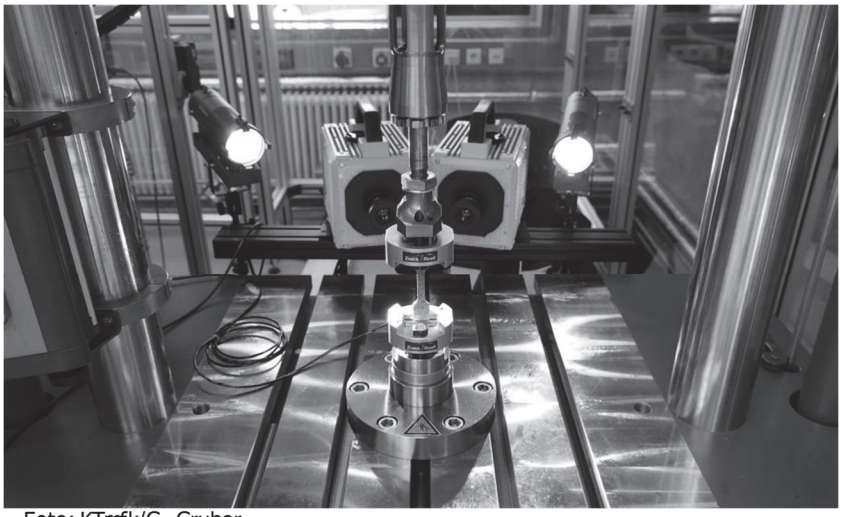


Foto: KTmfk/G. Gruber

Optische Messsysteme

Zur Versuchsauswertung stehen mit den Systemen ARAMIS HHS und ARAMIS 4M zwei leistungsstarke Kamerasysteme der Firma GOM zur Verfügung, die sowohl an der Hochgeschwindigkeitsprüfanlage wie auch am Pulser eingesetzt werden können. Für die Betrachtung der Hochgeschwindigkeitszugversuche können Aufnahmeraten von rund 100 000 Hz erreicht werden, zur Abtastung der zyklischen Versuche bis zu 120 Hz. Mittels Grauwertkorrelation wird die auftretende Dehnung lokal bestimmt und mit Simulationsergebnissen abgeglichen.

Servohydraulischer Pulser

Zur Erforschung des Ermüdungsverhaltens faserverstärkter Leichtbauwerkstoffe steht dem Lehrstuhl seit 2018 ein servohydraulischer Pulser vom Typ ZWICK HCT 25 zur Verfügung, der im Rahmen einer DFG-Großgeräteförderung (INST 90/1024-1 FUGG) beschafft werden konnte. Mit ihm können zyklische Prüfversuche mit axialen Lasten bis 25 kN, Drehmomenten bis 250 Nm und Prüffrequenzen von bis zu 30 Hz durchgeführt werden.

Foto: KTmfk/T. Niering
Servohydraulischer Pulser

GOM ATOS 12M Compact Scan

Das Kamerasystem ATOS Compact Scan 12M der Firma GOM verfügt über zwei Kameras und einen Projektor, mit dem eine berührungslose Digitalisierung von Bauteilen ermöglicht wird. Basierend auf dem Streifenlichtprojektionsverfahren werden durch den Projektor nacheinander verschieden binär codierte Streifenmuster auf der Bauteiloberfläche erzeugt. Die synchron geschalteten Kameras erfassen das reflektierte und deformierte Streifenmuster. Aus den bekannten Orientierungsparametern von Projektor und Kamera kann abschließend das digitale Abbild des Messobjekts aus den einzelnen Bildpunkten anhand von zuvor auf das Bauteil aufgebrachten Referenzpunkten zusammengesetzt werden.

Mit Hilfe der Zusatzsoftware GOM Professional ist es anschließend möglich, Maß-, Form- und Lageabweichungen halbautomatisch aus den gemessenen Daten auszulesen und direkt zu digitalisieren. Somit ist ein Soll-Ist-Vergleich basierend auf den CAD-Daten möglich.

Additive Manufacturing Labor

Die Additive Fertigung hat sich in den letzten Jahren zu einer vielversprechenden Schlüsseltechnologie in der modernen Fertigung entwickelt. Dabei können die verschiedenen Fertigungsverfahren vor allem bei der Herstellung individualisierter Teile komplexer Geometrie und Innenstruktur bei losgrößenunabhängigen Fertigungskosten überzeugen und ergänzen somit zunehmend die industrielle Fertigungslandschaft. Aufgrund des großen Potentials ist die Additive Fertigung ein fester Bestandteil aktueller Forschungsaktivitäten am KTmfk. In diversen Forschungsprojekten wird die Additive Fertigung gewinnbringend für das Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing eingesetzt.

Um die Potentiale und Vorteile der Additiven Fertigung bestmöglich nutzen zu können, wurde im Frühjahr 2019 ein eigenes Additive Manufacturing Labor am Standort Röthelheimgelände eingerichtet. Neben kleineren 3D-Druckern für Versuchszwecke kommt vor allem der FDM-Drucker F370 der Firma STRATASYS zum Einsatz. Dieser ermöglicht durch seine geschlossene Baukammer und stabile Prozessführung die Fertigung von Bauteilen hoher Qualität aus hoch belastbaren und auch flexiblen Polymerwerkstoffen, wie ABS, ASA oder TPU. Sind Stützstrukturen zur Realisierung von Überhängen und Hinterschnitten erforderlich, kommt ein wasserlösliches Stützmaterial zum Einsatz. Dieses lässt sich in der Auswaschstation SCA 3600 der Firma PADT in einem, mit speziellem Lösungsmittel versetzten Wasserbad bei Temperaturen zwischen 50 und 80 °C auswaschen. Das nachträgliche mechanische Entfernen der Stützstrukturen entfällt somit.

Foto: KTmfk/S. Schwarz

Der FDM-Drucker Stratasys F370 ermöglicht die Fertigung von kleinen Prototypen und Bauteilen bis hin zu gesamten, montagefreien Baugruppen

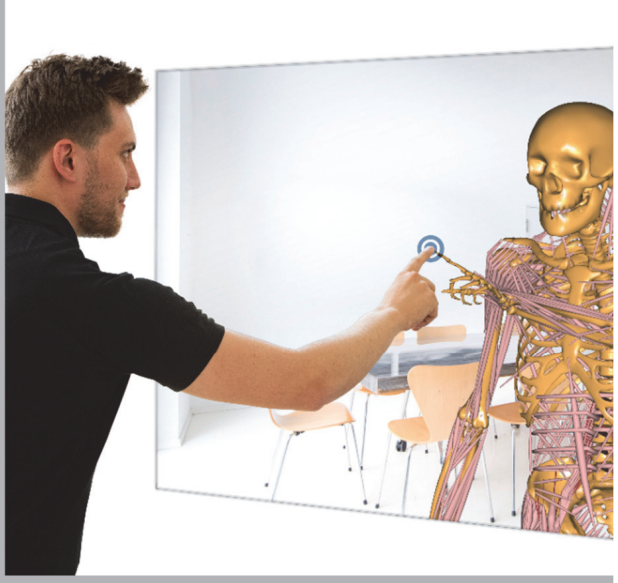
Kreativraum

Kreativität spielt bei der Konzeptfindung neuartiger Produkte, der Verbesserung von Prozessen aber auch bei der Entwicklung neuer Vorgehensweisen im Ingenieuralltag eine entscheidende Rolle. Innovative Ideen und Lösungsansätze lassen sich jedoch nicht erzwingen und nur bedingt systematisch erarbeiten. Durch die Schaffung passender Rahmenbedingungen können dennoch neue Lösungsstrategien und Denkansätze gefördert werden. Daher wurde der Kreativraum am Standort Röthelheimgelände neu eingerichtet. Dieser Raum, der von Studenten und Mitarbeitern genutzt werden kann, schafft ideale Randbedingungen für kreative Prozesse.

Erste Ideen können nicht nur an Flip-Charts, sondern auch an beschreibbaren Wänden skizziert und anschließend an einer Werkbank mit Bastelmaterialen in erste Prototypen überführt werden. Kreative Prozesse können so ideal gelebt werden, da Gedanken und Konzepte nicht nur visualisiert, sondern auch konkret im Team umgesetzt werden können.

Foto: KTmfk/S. Schwarz

Zeichnen, Modellieren, Erklären – der Kreativität sind keine Grenzen gesetzt



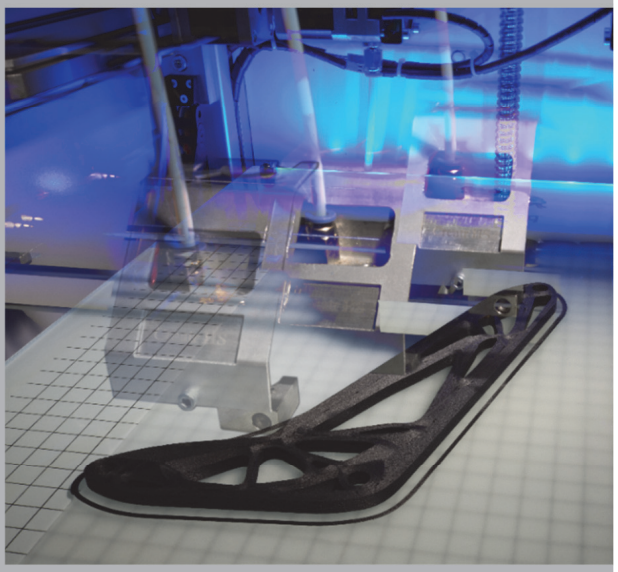


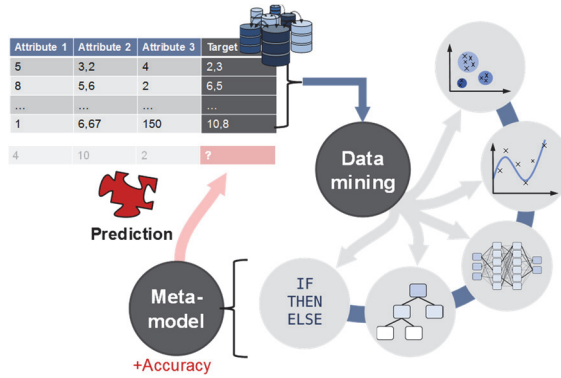
Foto: Riese Photography

Forschungs-
schwerpunkte

Digital Engineering

Die Fachgruppe Digital Engineering befasst sich mit digitalen Methoden und Werkzeugen sowie der ganzheitlichen Datennutzung und Datenauswertung in der virtuellen Produktentwicklung und Prozessplanung. Das Engagement des KTmfk gliedert sich dabei in die Bereiche „Machine Learning", „Systems Engineering" und „VR und AR in der Produktentwicklung".

Machine Learning

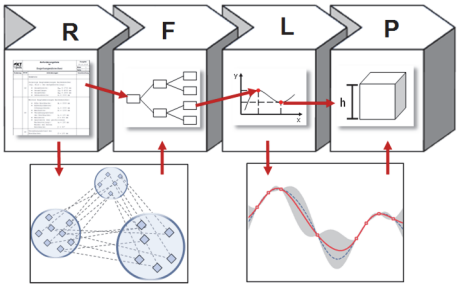


Vor dem Hintergrund des wissensbasierten Konstruierens hat der KTmfk frühzeitig das enorme Potential der Daten-auswertung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses erkannt. So werden am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik gezielt Verfahren des Machine Learning zur Generierung von Wissen aus Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus eingesetzt, welches dem Produktentwickler wiederum Hilfestellung bei verschiedensten Tätigkeiten im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung bietet und somit einen wesentlichen Baustein des Digital Engineerings bildet. Eine Unterscheidung der Verfahren des Machine Learning kann beispielsweise nach Art des Lernverfahrens (überwachtes, unüberwachtes, bestärkendes Lernen, etc.) oder nach Einteilung der verwendeten Algorithmen (Regression, Clustering, Klassifikation, etc.) erfolgen. Innerhalb des Machine Learning setzt die Fachgruppe ihren Fokus vor allem auf Data- und Text-Mining-Methoden.

Der KTmfk befasst sich dabei mit der Generierung von Ontologien als Grundstruktur wissensbasierter Systeme in der Produktentwicklung. Darüber hinaus werden im Rahmen der fertigungsgerechten Konstruktion selbstlernende wissensbasierte Systeme entwickelt, die eine Optimierung bestehender Bauteilentwürfe ermöglichen. Daneben werden Methoden erforscht um mittels Deep Learning die Plausibilität von FE-Simulationen zu überprüfen. Der KTmfk nutzt dabei sowohl Daten als auch Expertenwissen, um Produktentwicklern frühzeitig relevantes Wissen bereitstellen und ihnen ihre Arbeit erleichtern zu können.

Systems Engineering

Globale Trends wie Funktionsintegration, Individualisierung und interdisziplinäre Ansätze haben zu einem rapiden Anstieg der Produktkomplexität geführt. Das hierfür notwendige Verständnis für den Produktentwicklungsprozess verlangt nach neuen Methoden und Vorgehensweisen. Mit innovativen Ansätzen aus dem Systems Engineering stellt sich der KTmfk dieser Herausforderung.



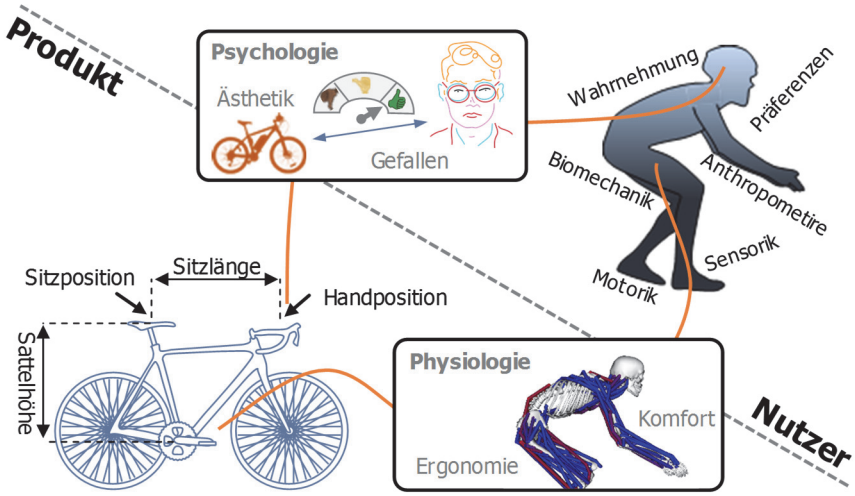
In diesem Kontext werden derzeit digitale und durchgängig verknüpfte Modelle für alle Phasen des RFLP-Ansatzes entwickelt und erforscht, wie der dokumentenbasierte Produktentwicklungsprozess in einen modelbasierten überführt werden kann. Dieser erhöht die Nachverfolgbarkeit und trägt zur Transparenzsteigerung bei der Entwicklung von komplexen Produkten bei. Er vereinfacht das Auffinden von kritischen Entwicklungsschritten, welche den kreativen Entwickler benötigen. Außerdem bietet er Schnittstellen zur Automatisierung durch maschinelles Lernen für Routinetätigkeiten, welche den Produktentwickler beim Lösen unnötig behindern. Darüber hinaus erstrecken sich die Forschungsaktivitäten des Lehrstuhls auch auf die automatisierte Anpassungskonstruktion mechatronischer Produkte und das Anforderungsmanagement.

VR und AR in der Produktentwicklung

Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) sind Mensch-Maschine-Schnittstellen, die es ermöglichen, computergenerierte Inhalte in Ansprache mehrerer Sinne realitätsnah wahr-zunehmen. Entwürfe können in Design Reviews realitätsnah betrachtet und besprochen werden. In diesem Kontext beschäftigt sich der KTmfk zum einen mit der Synthese von Produktgestalt durch natürliche Finger-Interaktion und zum anderen mit der realitätsnahen Visualisierung von virtuellen Umgebungen durch Eye-Tracking. Hierbei steht auch die Erzeugung von Tiefenschärfe mittels maschineller Lernverfahren im Fokus.

Nutzerzentrierte Produktentwicklung

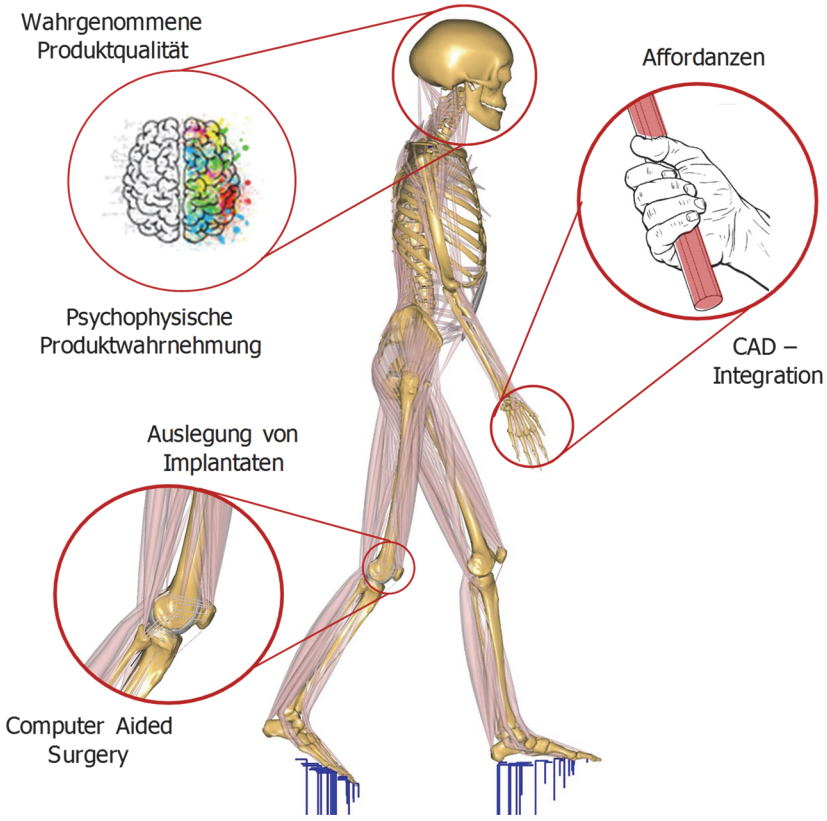
In der nutzerzentrierten Produktentwicklung wird der Mensch als Nutzer mit seinen individuellen Fähigkeiten und Bedürfnissen in den Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses gestellt. Dabei ist insbesondere die Interaktion zwischen Produkt und Nutzer zu berücksichtigen. Am KTmfk haben wir es uns deshalb zur Aufgabe gemacht, innovative Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, mit denen Interaktionsschnittstellen nutzerzentrierter Produkte virtuell gestaltet werden können.



Ganzheitliche Betrachtung von Nutzer und Produkt in Interaktion

Grundlage für eine nutzerzentrierte Gestaltoptimierung ist die Abbildung der Interaktion zwischen Nutzer und Produkt, wofür eine Beschreibung der Produkteigenschaften und -merkmale notwendig ist. Dabei wird das Produkt als Teil eines rückgekoppelten Systems zwischen Nutzer und Produkt betrachtet. Entsprechend sind vor allem jene Produkteigenschaften von Bedeutung, die Einfluss auf die Nutzer-Produkt-Interaktion nehmen. Ein wesentlicher Teil unserer Forschungsaktivität ist daher die Identifikation nutzerorientierter Eigenschaften. Darüber hinaus muss auch der Nutzer selbst, mit seinen individuellen Fähigkeiten, Eigenschaften sowie Bedürfnissen und Erwartungen beschrieben werden. Hierbei werden die Wahrnehmung, persönliche Werte und Einstellungen, motorische, sensorische und kognitive Fähigkeiten ebenso wie die Biomechanik und Anthropometrie des Nutzers erfasst und abgebildet.

Wie eine solche Nutzermodellierung ziel- bzw. lösungsorientiert gestaltet werden kann, welche Nutzercharakteristiken ausschlaggebend sind und wie diese virtuell abgebildet werden können (etwa mittels digitaler Menschmodelle), wird im Rahmen der Forschung am KTmfk untersucht. Neben der starken Fokussierung auf Produktentwicklung, beschäftigen wir uns zunehmend auch mit der Weiterentwicklung von Menschmodellen für den Einsatz in der Computer Aided Surgery sowie der gezielten Auslegung von Implantaten.



Übersicht aktueller Forschungsschwerpunkte

Letztlich bietet eine weitestgehend holistische Nutzerbeschreibung die Möglichkeit, Interaktionsschnittstellen optimal, aber auch individuell auszulegen und bildet damit die Grundlage für eine Entwicklung nutzerorientierter Produkte. Dies gilt besonders für Produkte aus den Bereichen der Orthopädie, Reha und Automotive aber auch für Sportgeräte, Konsumgüter und Exoskelette, da sich diese durch eine stark ausgeprägte Nutzerinteraktion bzw. -integration auszeichnen.

Toleranzmanagement

Geometrische Bauteileigenschaften beeinflussen maßgeblich die Qualität technischer Produkte. Die Beschränkung dieser Abweichungen durch Toleranzen stellt daher eine bedeutende Aufgabe während der Produktentstehung dar. Das ganzheitliche Toleranzmanagement ist somit eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg im internationalen Wettbewerb. Daher ist das Toleranzmanagement seit über 30 Jahren ein wesentlicher Bestandteil der Forschungsaktivitäten am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik. Der Leitgedanke hinter diesen Forschungsaktivitäten ist die integrative Betrachtung aller im Produktentstehungs- und Produktlebenszyklus unweigerlich auftretenden qualitätsmindernden Bauteilabweichungen über alle Phasen der virtuellen Produktentwicklung hinweg.

Forschungsschwerpunkte im Toleranzmanagement

Leitgedanke hinter den Forschungsschwerpunkten am KTmfk ist die ganzheitliche Berücksichtigung aller qualitätsmindernden Bauteilabweichungen in der virtuellen Produktentwicklung. Hierzu werden Werkzeuge und Methoden entwickelt, die Konstrukteure bei der verantwortungsvollen Aufgabe der Toleranzvergabe unterstützen.

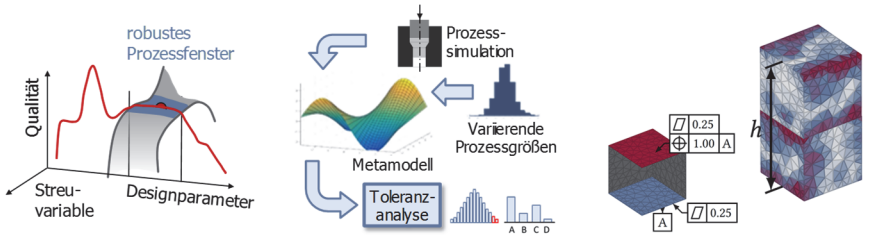
In frühen Stadien des Toleranzmanagements liegt der Fokus auf dem Robust Design. Die Herausforderung besteht dabei darin, mit wenig Informationen zu Fertigungs- und Montageprozessen sowie zur Bauteilgeometrie (etwa lediglich in Form von Konstruktionsskeletten) Toleranzanalysen durchzuführen. Hierzu werden am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Analysemethoden entwickelt, die auf der Basis geringer Informationen belastbare Ergebnisse liefern. Einerseits werden hierzu bestehende Methoden wie die Sensitivitätsanalyse für frühe Phasen angepasst. Andererseits werden neue Methoden entwickelt, wie beispielsweise die automatische Identifikation zu tolerierender funktionsrelevanter Features.

In späteren Phasen der Produktentwicklung müssen verschiedenste Informationen zu geometrischen Abweichungen berücksichtigt werden, um den steigenden Ansprüchen an die Genauigkeit und Qualität technischer Produkte gerecht zu werden. Zu diesem Zweck werden am KTmfk Methoden und Werkzeuge für das interdisziplinäre prozessorientierte Toleranzmanagement erforscht. Diese ermöglichen es, Ergebnisse aus Fertigungsprozesssimulationen und Messdaten im Rahmen von statistischen Toleranzanalysen zu verarbeiten. Für eine möglichst genaue Abbildung der abweichungsbehafteten Bauteile, werden in diesem Kontext Toleranzanalysen auf Basis von Punktwolken und Oberflächennetzen eingesetzt.

Die Anwendung dieser Methoden zur Toleranzanalyse bewegter Systeme erlaubt zudem die Evaluierung der Auswirkungen von Toleranzen, Verformungen und Gelenkspielen auf das präzise Bewegungsverhalten von Mechanismen.

Darüber hinaus wird mit der statistischen Toleranz-Kosten-Optimierung eine optimale Vergabe der Bauteiltoleranzen unter Berücksichtigung von fertigungs- und betriebsbedingten Abweichungen sichergestellt. Hierzu wird das Problem „so groß wie möglich, so eng wie nötig" als Optimierungsproblem formuliert und mittels geeigneter Verfahren der numerischen Optimierung gelöst. Produktentwickler sind somit in der Lage, die optimale Vergabe der Bauteiltoleranzen statisch bestimmter, aber auch unter- und überbestimmter sowie bewegter Systeme zu identifizieren, die sowohl den gestellten Anforderungen gerecht wird als auch mit möglichst geringen Herstellkosten einhergeht.

Um all die obigen Teilaspekte aus Produktentwicklung, Fertigung, Montage und Messtechnik zu vereinen, werden in der Forschungsgruppe "Prozessorientiertes Toleranzmanagement" ganzheitliche Vorgehensweisen und effiziente Werkzeuge für die umfassende Steuerung geometrischer Abweichungen im Produktentstehungsprozess entwickelt.



Robust Design

Entwicklung von Methoden zum robusten Produktdesign unter Berücksichtigung von Unsicherheiten

Prozessorientiertes Toleranzmanagement

Integration von Fertigung, Montage und Messung in die Methoden des Toleranzmanagements

Toleranzsimulation und -optimierung

Entwicklung von Methoden zur statistischen Toleranzanalyse und -synthese für die verschiedenen Produktentwicklungsphasen

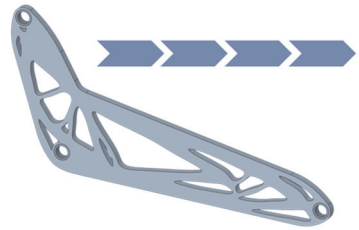
Kooperationen in Forschung und Industrie

Neben der Erarbeitung wichtiger Forschungsergebnisse stehen die Stärkung internationaler Kooperationen sowie die Zusammenarbeit mit Partnern aus der industriellen Praxis an vorderster Stelle. Gemeinsam bewältigen wir heutige und zukünftige Herausforderungen des Toleranzmanagements.

Leichtbau

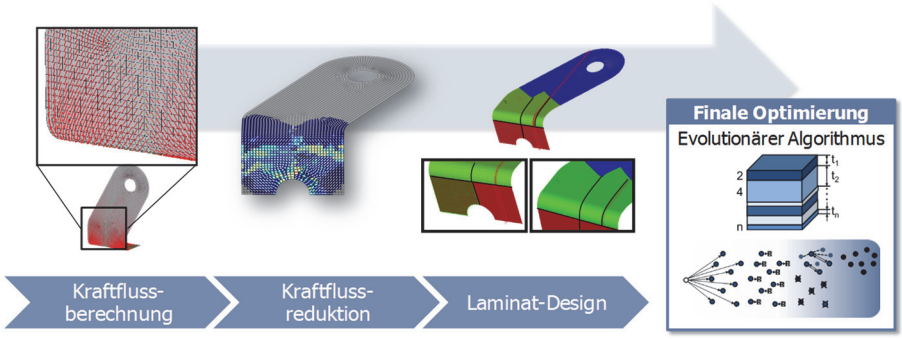
Die Energieeffizienz technischer Systeme hat in den letzten Jahren in vielen verschiedenen Industriezweigen an Bedeutung gewonnen. Im Zuge dieses Umdenkens nimmt vor allem der Leichtbau eine Schlüsselstellung bei der Produktentwicklung ein, da durch die Reduktion unnötiger Masse deutlich ressourcenschonendere Produkte entwickelt werden können. Die Tätigkeiten des KTmfk im Leichtbau können dabei in drei unterschiedliche Bereiche unterteilt werden: **Lightweight Design, Lightweight Engineering** und **Lightweight Validation**. In verschiedenen Arbeiten und Forschungsprojekten konnten so bereits neuartige Lösungen entwickelt werden, die zu einer weitreichenderen Ausnutzung des Leichtbaupotentials technischer Systeme beitragen.

Lightweight Design: Integration von Strukturoptimierungsmethoden in den Konstruktionsprozess



Diskrete und kontinuierliche Strukturoptimierungsmethoden sind dabei, sich im Produktentwicklungsprozess als effiziente Werkzeuge zur leichtbaugerechten Gestaltfindung zu etablieren. Der Vorteil der Strukturoptimierung wird jedoch häufig durch die zeitaufwändige Rekonstruktion und Interpretation der Optimierungsergebnisse vermindert. Am KTmfk werden deshalb Methoden und Werkzeuge entwickelt, die eine Überführung von Strukturoptimierungsergebnissen in featurebasierte CAD-Modelle ermöglichen.

Lightweight Engineering: Auslegung faserverstärkter Kunststoffbauteile in den frühen Phasen



Faserverstärkte Kunststoffbauteile werden aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften zunehmend in modernen Leichtbaustrukturen verwendet. Doch die Auslegung faserverstärkter Bauteile stellt Produktentwickler vor große Herausforderungen, denn die mechanischen Eigenschaften dieser Verbundwerkstoffe hängen erheblich von einer beanspruchungsgerechten Faserorientierung ab. Ein zentrales Thema ist daher die Entwicklung von Strategien und Methoden zur Auslegung faserverstärkter Kunststoffbauteile und -strukturen in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dabei stehen vor allem kurzfaserverstärkte Thermoplaste sowie endlosfaserverstärkte CFK-Bauteile im Fokus.

Lightweight Validation: Charakterisierung von Leichtbauwerkstoffen unter hochdynamischer und zyklischer Belastung

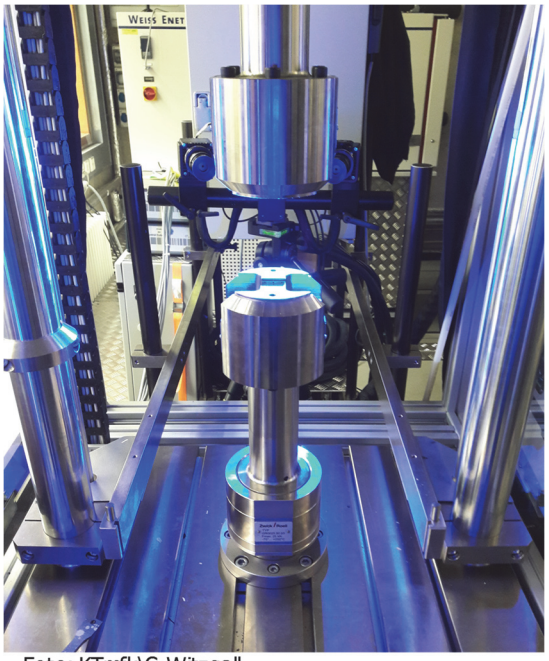


Foto: KTmfk\C. Witzgall

Zur Simulation des Crashverhaltens von Bauteilen ist eine genaue Ermittlung des Werkstoffverhaltens unter hochdynamischer Lastaufbringung unerlässlich. Mit einer servohydraulischen Schnellzerreißanlage und einem optischen Auswertungssystem mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras steht dazu am KTmfk eine leistungsstarke Ausrüstung zur Verfügung. Ein servohydraulischer Pulser ergänzt die Ausstattung und ermöglicht die Untersuchung des Materialverhaltens unter zyklischer Belastung.

Tribologische PVD-/PACVD-Schichtsysteme

Die stetig wachsenden funktionalen Anforderungen an Maschinenelemente, Werkzeuge und Motorenelemente sowie an Implantate bringen die eingesetzten Basiswerkstoffe vielfach an ihre Einsatzgrenzen. In Bezug auf Reibungsminimierung (Energieeffizienz) und Verschleißschutz (Lebensdauer) können die gestiegenen Anforderungen häufig nur durch den Einsatz von Mikro- und Nanotechnologie in Form tribologisch wirksamer PVD-/PACVD-Schichtsysteme erfüllt werden, welche hierdurch als eigenständige Konstruktionselemente anzusehen sind.

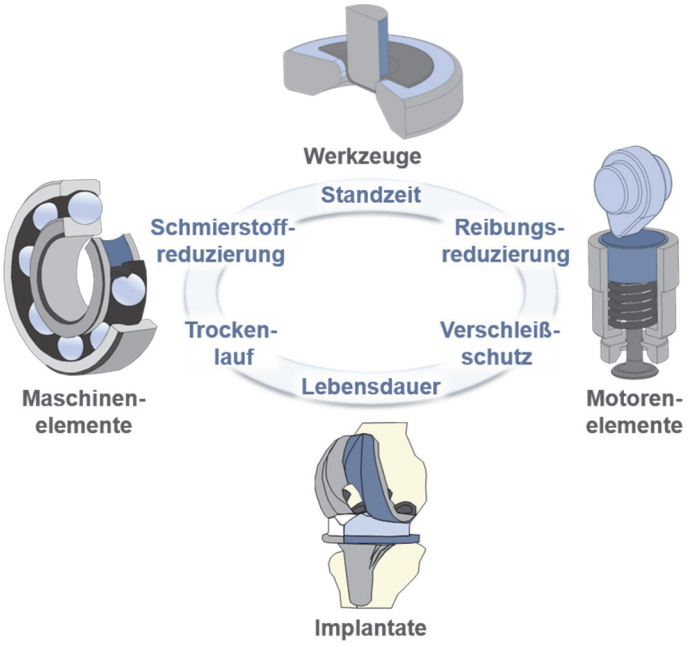
Die Vision der Forschungsaktivitäten am KTmfk ist daher die Unterstützung des Produktentwicklers in jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses bei der Umsetzung energieeffizienter und verschleißarmer technischer Systeme durch das Konstruktionselement „Tribologisch wirksame Schicht". Darüber hinaus werden sensorische Funktionen in den Schichten integriert, mit deren Hilfe Prozesskenngrößen beschichteter Bauteile in-situ erfasst werden können. Insbesondere können Schichtsysteme auf den Oberflächen von lasttragenden Implantaten, wie Knie-Totalendoprothesen, die Standzeit und Biokompatibilität deutlich verbessern. Durch Applizieren von lokalen angepassten tribologisch wirksamenen Schichtsystemen auf Umformwerkzeuge lässt sich der Schmierstoff reduzieren bis sogar komplett darauf verzichten.

Anwendungsbezogene Schichtentwicklung

Basis dieses Forschungsschwerpunkts ist eine methodische Herangehensweise bei der Schichtentwicklung für unterschiedliche technische Anwendungen und bei der Erarbeitung eines besseren Verständnisses für die vorherrschenden Reibungs- und Verschleißmechanismen. So werden am KTmfk verschiedene Schichtsysteme, insbesondere amorphe Kohlenstoffschichten, Festschmierstoffschichten und Hartstoffschichten, mittels einer industriellen Beschichtungsanlage unter Vakuumbedingungen auf diversen Substratwerkstoffen und Bauteilgeometrien abgeschieden. Anschließend werden sie umfangreich mechanisch-physikalisch und tribologisch untersucht. Ein fortlaufender Ausbau der Möglichkeiten zur Schichtcharakterisierung kennzeichnet die Aktivitäten des KTmfk ebenso wie die projektspezifische Entwicklung von Prüfständen, mit deren Hilfe Schichtsysteme sowohl in Modellversuchen, als auch unter realistischen Einsatzbedingungen erprobt werden können. Hierdurch ist der KTmfk in der Lage, die komplette Prozesskette der anwendungsbezogenen Schichtentwicklung abzudecken.

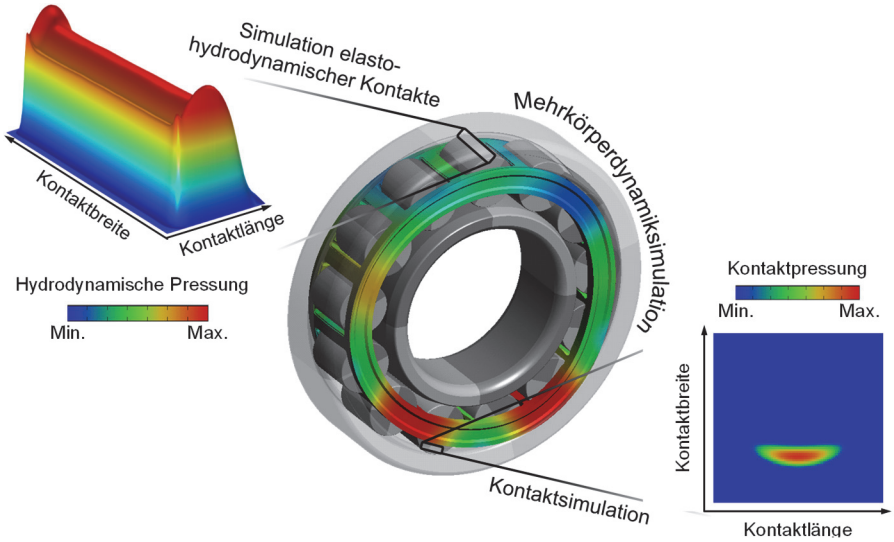
Beschichtungsgerechtes Konstruieren

Neben der anwendungsorientierten Schichtentwicklung stellt das beschichtungsgerechte Konstruieren einen weiteren Forschungsschwerpunkt dar. Der Fokus liegt auf der Auswahl geeigneter Schichtsysteme sowie der Auslegung von Schichtsystemen für die jeweilige Anwendung, insbesondere Wälz-Gleitkontakte, wie sie beispielsweise in Wälzlagerungen, im Nocken-Stößel-Kontakt oder in artikulierenden Implantatkomponenten anzutreffen sind. Hierbei kommen sowohl moderne Simulationsverfahren, zum Beispiel zur Ermittlung der Anforderungen an das tribologisch wirksame Schichtsystem, als auch Verfahren des Data Mining zum Einsatz. Zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten für die Simulationsmodelle sowie zur Erzeugung einer empirischen Datenbasis für die Data-Mining Modelle dienen neben Ergebnissen aus den zeit- und kosteneffizienten Modellversuchen auch Ergebnisse aus speziell für den Anwendungsfall am KTmfk konstruierten und in Betrieb genommenen Bauteilprüfständen. Die damit gewährleistete hohe Übertragbarkeit der tribologisch wirksamen Systemgrößen Reibung und Verschleiß ermöglicht genauere Vorhersage- und Simulationsmodelle. Ergebnisse dieser Forschungsaktivitäten sind somit die Bereitstellung individueller Beschichtungslösungen, Dimensionierungsgrundlagen sowie Gestaltungsrichtlinien.



Wälzlagertechnik

Steigende Anforderungen in der Wälzlagertechnik an die Langlebigkeit, die akustischen Eigenschaften oder die Genauigkeit der Führung erhöhen die Komplexität der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Durch intensive und langfristige Kooperation mit Partnern sowohl aus dem industriellen wie auch dem akademischen Umfeld leistet der KTmfk seinen Beitrag an den aktuellen Entwicklungen im Bereich der Wälzlagertechnik. Die Forschungsarbeiten beinhalten rechnerunterstützte Untersuchungen von der Makro- bis zur Mikroebene sowie experimentelle Prüfstandsuntersuchungen. Durch die Verknüpfung der rechnerunterstützten Untersuchungen mit den experimentellen Versuchen können zudem weitere Synergieeffekte geschaffen werden.



Rechnerunterstützte Auslegung von Wälzlagern

Zielsetzung der auf Simulationen beruhenden Forschungsarbeiten ist, ein besseres Verständnis der Mechanismen des komplexen Systems Wälzlager zu erlangen, beispielsweise im Hinblick auf Dynamik oder Reibungsverhalten. Hierbei kommen von der Makro- bis zur Mikroebene verschiedene Simulationsansätze zum Tragen.

Auf der Makroebene wird das Wälzlager als Ganzes sowie das Zusammenspiel seiner einzelnen Komponenten betrachtet. So liefern speziell auf Wälzlager angepasste Mehrkörpersimulationen einen Einblick in die Dynamik der Wälzlagerkomponenten.

So erlauben sie die Untersuchung des Verhaltens von Wälzlagerungen unter hohen Zentripetalbeschleunigungen oder bei hochdynamischen Bewegungen der Wälzlagerkomponenten. Mithilfe der eingesetzten Dynamiksimulationssoftware kann unter anderem die elastische Deformation des Wälzlagerkäfigs und dessen Bewegungsverhalten untersucht werden. Auf Basis dieser Ergebnisse können Gestaltungsrichtlininen oder Empfehlungen für den Betrieb abgeleitet werden.Auf der Mikroebene erfolgt die Fokussierung auf der detaillierten Betrachtung einzelner thermo-elastohydrodynamischer (TEHD) Kontakte innerhalb der Lager. Mithilfe eines eigenentwickelten, Finite Elemente basierten Simulationstools wird das tribologische Verhalten zweier Kontaktpartner untersucht. Auf diese Weise lassen sich Aussagen über zu erwartende Verschleißerscheinungen treffen oder Oberflächenmikrotexturen sowie tribologisch wirksame Dünnschichten beanspruchungsgerecht auslegen. Gewonnene Erkenntnisse und Ergebnisse zum Kontaktverhalten können wiederum in die Verbesserung der makroskopischen Simulationen einfließen.

Experimentelle Untersuchungen an Wälzlagerungen

In Wälzlagerungen sind verschiedene physikalische Effekte noch nicht ausreichend genau anhand theoretischer Ansätze beschreibbar. Entsprechend ist die Durchführung von Versuchen in der Wälzlagertechnik unabdingbar; auch um Ergebnisse von Simulationen zu validieren. Charakteristisch für die experimen-telle Forschung am KTmfk ist die Entwicklung innovativer und anspruchsvoller Prüfstände. Beginnend mit ersten Skizzen entstehen unter Nutzung modernster CAD- und FEM-Werkzeuge einzigartige Prüfstandkonstruktionen, welche nach ihrer Inbetriebnahme intensiv für experimentelle Forschungsarbeiten in den Laboren des KTmfk genutzt werden. Derzeitige experimentelle Arbeiten befas-sen sich mit der Reibung in Wälzlagern, dem Verhalten von Wälzlagern unter Zentripetalbeschleunigung oder der Wälzlagerbelastung und -kinematik für kleine Schwenkbewegungen. Wälzlager die hohen Zentripetalbeschleunigungen ausgesetzt sind, besitzen ein wesentlich höheres Reibmoment, da insbesondere die Käfigkontakte aufgrund der hohen wirkenden Beschleunigungen einen deutlich höheren Anteil am Gesamtlagerreibmoment besitzen. Am KTmfk werden daher Berechnungsmodelle für die Wälzlagermehrkörpersimulation mithilfe eines Wälzlagerschleuderprüfstands validiert. Die so gewonnen Erkentnisse dienen zusätzlich der Optimierung dieser Simulationsprogramme. Weitere Prüfstände ermöglichen die Untersuchung von Wälzlagern unter schwingender Belastung sowie neuartige Schmierungs- und Oberflächenkonzepte. Die einzigartigen Prüfstände bilden zusammen mit klassischen Messgeräten, wie dem Tribometer oder dem Zweischeibenprüfstand eine individuelle und hochwertige technische Ausstattung.

Foto: KTmfk/T. Schröppel

Ausgewählte Forschungsprojekte

Deutsche Forschungsgemeinschaft

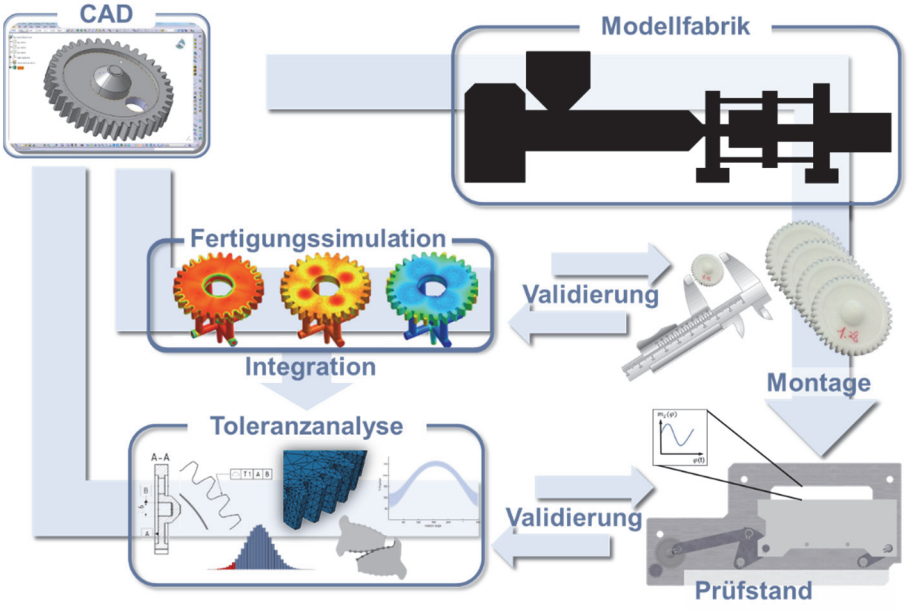
Forschergruppe Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Förderzeitraum	*01.06.2016 bis 31.12.2019*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Koordination	Kathrin Koppenwallner
Bearbeiter	B. Heling

Das Begreifen geometrischer Bauteilabweichungen und deren fertigungs- und montagebedingter Ursachen sowie die Erforschung der Folgen dieser Abweichungen für die Funktion und Qualität technischer Produkte stellt den Rahmen der Forschergruppe „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden" dar. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, ganzheitliche Vorgehensweisen und effiziente Werkzeuge für die umfassende Steuerung geometrischer Abweichungen im Produktentstehungsprozess bereitzustellen und anhand einer Modellfabrik zu validieren. Hierbei wird besonderer Fokus auf die Erarbeitung einer Vorgehensweise für die nutzbringende Kooperation aller am Toleranzmanagementprozess beteiligter Bereiche von der Produktentwicklung, Fertigung, Montage bis hin zur Messtechnik gelegt, die es Unternehmen ermöglicht, gezielt und schnell funktions-, fertigungs- und prüfgerechte Toleranzen zu spezifizieren und so Kosten zu sparen sowie die Produkteinführungszeit zu verkürzen.

Hierbei ist es die Vision der Forschergruppe, die enge Zusammenarbeit von Produktentwicklung, Fertigung, Montage und Metrologie bei der rechnerunterstützten Toleranzvergabe, das heißt die gemeinschaftliche Erarbeitung fertigungs-, prüf- und funktionsgerechter Toleranzen, zu ermöglichen.

Durch diese enge Zusammenarbeit lassen sich alle fertigungs- und montagebedingten Ursachen für spätere Funktionseinschränkungen und Qualitätsminderungen identifizieren und bereits in frühen Phasen der virtuellen Produkt- und Prozessentwicklung berücksichtigen. Dies ermöglicht einerseits die effiziente Toleranzvergabe und andererseits die Ableitung von funktions- und abweichungsoptimierten Prüfplänen sowie von Prozess- und Betriebsfenstern zur Entwicklung robuster Produkte, die schnell und kostengünstig hergestellt und geprüft werden können.



Vorgehen der Forschergruppe "Prozessorientiertes Toleranzmanagement"

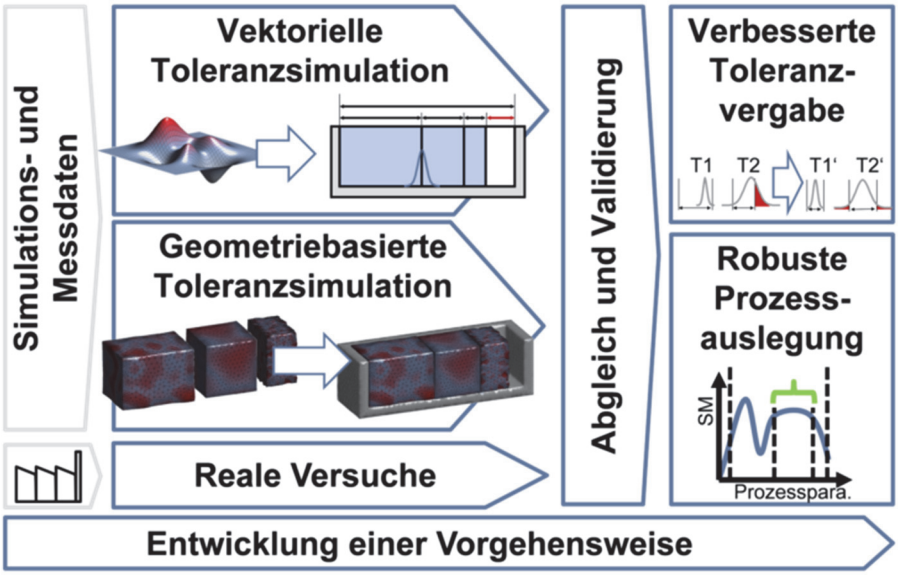
Um in diesem Kontext die virtuellen Absicherungsmethoden bewerten zu können, erfolgt zum einen eine Validierung der Fertigungssimulationen auf Bauteilebene, bei der in der Modellfabrik gefertigte Bauteile mit simulierten Bauteilen verglichen werden. Ausgehend von den Erkenntnissen aus diesem Validierungsschritt werden anschließend die gefertigten Bauteile an einem Prüfstand untersucht, dessen Ergebnisse mit den virtuellen Toleranzanalysen abgeglichen werden. Dies erlaubt nicht nur die Validierung unterschiedlicher Toleranzanalyseverfahren, sondern ermöglicht auch eine qualitative Bewertung der unterschiedlichen Modellierungsansätze.

TP 1: Virtuelle und experimentelle Toleranzuntersuchungen abweichungsbehafteter Baugruppen

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/19-1*
Förderzeitraum	*01.06.2016 bis 31.12.2019*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	B. Heling

Die DFG Forschungsgruppe 2271 hat sich zum Ziel gesetzt, ganzheitliche Vorgehensweisen und effiziente Werkzeuge für die umfassende Steuerung geometrischer Abweichungen im Produktentstehungsprozess bereitzustellen und anhand einer Modellfabrik zu validieren. In diesem Zusammenhang ist die Zielsetzung des Teilprojekts 1 die Ermöglichung einer prozessorientierten Tolerierung, bei der alle geometrischen Abweichungen, deren unterschiedlichen Ursachen sowie Messunsicherheiten berücksichtigt werden. Zur Erreichung dieses Ziels werden im Rahmen des Teilprojekts besonders Fragestellungen bezüglich der Vorgehensweise zur prozessorientierten Toleranzvergabe, der Integration von verschiedensten Abweichungsinformationen in Toleranzsimulationen und der Nutzung von Toleranzsimulationsergebnissen für eine optimierte Toleranzvergabe und Prozessauslegung beantwortet.

Hierzu werden im Rahmen des Teilprojekts virtuelle Toleranzuntersuchungen durchgeführt, die durch experimentelle Toleranzanalysen am Demonstrator der Forschergruppe validiert werden. Dafür werden zunächst Toleranzsimulationsmodelle entwickelt, die die Unzulänglichkeiten etablierter Toleranz- und Abweichungsrepräsentationsformen überwinden, und auf Basis deren Ergebnisse Strategien für eine funktions-, fertigungs- und prüfgerechte Toleranzvergabe sowie für die Identifikation robuster Prozessfenster bereitgestellt.



Zentrale Ziele des TP 1 der Forschergruppe

Neben der Entwicklung von Werkzeugen für die Toleranzsimulation und deren Validierung werden zudem auch Methoden und Vorgehensweisen für das durchgängige Toleranzmanagement, welche die Besonderheiten entwickelter Toleranzsimulationswerkzeuge berücksichtigen, erarbeitet und in Zusammenarbeit mit den Partnern der Forschergruppe auf ihre Eignung hin geprüft.

Wesentlicher Gewinn des Teilprojekts ist somit eine Vorgehensweise, die es erlaubt während der Produktentwicklung prozess- und betriebsbedingte Ursachen für geometrische Abweichungen zu berücksichtigen und aufbauend auf den Ergebnissen Rückschlüsse auf relevante Prozess- und Betriebsparameter zu ermöglichen, sowie entwickelte Toleranzsimulationswerkzeuge für die ganzheitliche Toleranzvergabe. Hiermit können Fertigungs-, Montage- und Prüfprozesse gezielt optimiert und Fertigungskosten gesenkt sowie Produkteinführungszeiten verkürzt werden.

In der zweiten Förderperiode sollen zukünftig nicht nur Prozessschwankungen während der Produktentstehung, sondern auch Verschleißeinflüsse, die während des Betriebs unweigerlich auftreten, mit validierten Methoden virtuell abgesichert werden. Dies ermöglicht eine virtuelle Absicherung der gesamten Produktnutzung mit Werkzeugen des Toleranzmanagements.

SFB/TR73 – TP B1: Simultane Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*TRR 73/2–2013 (2. Phase)*
	TRR 73/3–2017 (3. Phase)
Förderzeitraum	*01.01.2013 bis 31.12.2016 (2. Phase)*
	01.01.2017 bis 31.12.2020 (3. Phase)
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	C. Sauer, M. Sc.

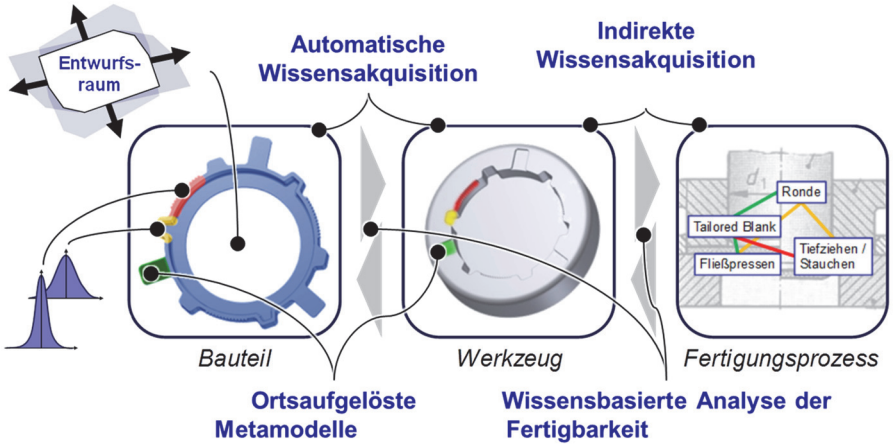
Die Verfahren der Blechmassivumformung, die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 73 (SFB/TR73) erforscht werden, bieten aufgrund ihrer gesteigerten Gestaltungsfreiheiten neue Möglichkeiten, Bauteile an erhöhte Anforderungen anzupassen. Für die Produktentwicklung ergibt sich aus der Zusammenführung von Massiv- und Blechumformung ein enormes Potential, für dessen Nutzung geeignete rechnerunterstützte Werkzeuge bereitgestellt werden müssen.

Diesem übergeordneten Ziel widmet sich das Teilprojektes B1 mit der Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems (SLASSY). SLASSY ermöglicht die wissensbasierte Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entwicklung von blechmassivumgeformten Bauteilen mit komplexen Nebenformelementen. Das notwendige konstruktionsrelevante Fertigungswissen wird durch den Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens zeitgleich zur Fertigungsprozessentwicklung erhoben. Anschließend wird es in der multidimensionalen Wissensbasis in Form von Meta- oder Vorhersagemodellen gespeichert. Die Architektur von SLASSY unterstützt die Synthese eines Bauteils aus Haupt- und Nebenformelementen, sowie dessen wissensbasierte Analyse.

Ein wesentliches Ziel der dritten Phase ist der Einsatz ortsaufgelöster Metamodelle zur Vorhersage von lokalen Bauteil- und Werkzeugeigenschaften. Um zum Beispiel den Umformgrad auf der Bauteiloberfläche direkt vorherzusagen.

Daneben werden Stellgrößen zur Aufweitung des Entwurfsraumes unter Berücksichtigung zweier oder mehrerer Zielgrößen erforscht und der in Phase zwei entwickelte genetische Mehrzieloptimierungsalgorithmus um entsprechende Vorhersagegrößen erweitert. So wird es möglich, dem Produktentwickler konkrete Aussagen liefern zu können, in wie weit er seine Fertigungsparameter und –maschinen einstellen bzw. abändern muss, um zum gewählten Ergebnis zu gelangen.

Zuletzt wird die mehrdimensionale Wissensbasis von SLASSY um die entsprechenden Bausteine ergänzt mit lokalen Metamodellen, neuen Mehrzieloptimierungsmethoden und dem Einfluss der Prozessabfolge der Blechmassivumformung fertig zu werden.



Weg und Methoden der 3. Förderperiode

Deutsche Forschungsgemeinschaft

SFB/TR73 – TP B4: Tribologische DLC-Beschichtungen in Kombination mit Oberflächenstrukturierungen für Umformwerkzeuge zur Erhöhung der Standzeit und Verbesserung der Prozessqualität

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*TRR 73/2 2013 (2. Phase)*
	TRR 73/3 2017 (3. Phase)
Förderzeitraum	*01.01.2013 bis 31.12.2016 (2. Phase)*
	01.01.2017 bis 31.12.2020 (3. Phase)

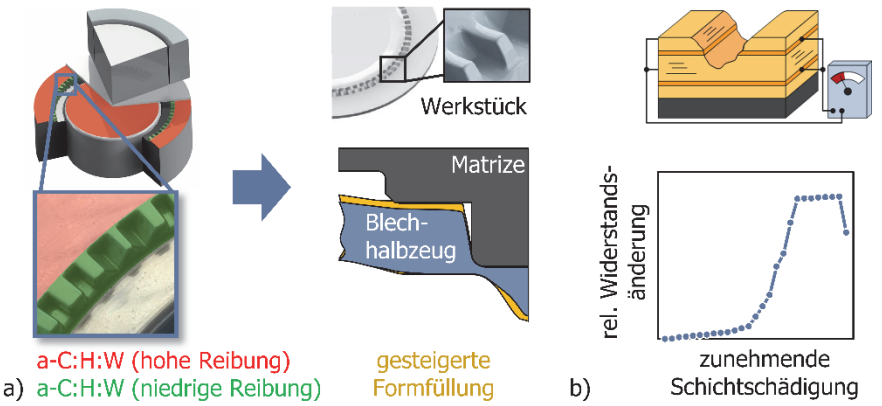
Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	Dr.-Ing. H. Hetzner
	T. Weikert, M.Sc.

Das Ziel des SFB/Transregio 73, die Vorzüge und Gestaltungsmöglichkeiten der Blech- und Massivumformung in dem Fertigungsverfahren der Blechmassivumformung (BMU) miteinander zu kombinieren, geht mit hohen Anforderungen an das Umformwerkzeug einher. Für eine wirkungsvolle Steuerung des Werkstoffflusses sind gezielt angepasste lokale Reibungsbedingungen in der Wirkfuge von essentieller Bedeutung. Nur so ist es möglich, komplexe Nebenformelemente der Blechbauteile unter Einhaltung hoher Qualitätsanforderungen auszuformen und gleichzeitig unerwünschte Änderungen der Bauteilgeometrie zu vermeiden. Darüber hinaus ist die Standzeit der Werkzeuge vorrangig durch adhäsiven Verschleiß begrenzt.

Das Teilprojekt B4 leistet mit der Erforschung tribologischer DLC-Beschichtungen einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von Werkzeugaktivflächen mit einem an den Umformprozess angepassten tribologischen Verhalten.

Aus der Gruppe der DLC-Schichten zeigen wolframmodifizierte amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H:W) in anwendungsorientierten Modellversuchen und werkstoffkundlichen Analysen für die Werkzeugbeschichtung das vorteilhafteste Eigenschaftsprofil. Sie zeichnen sich insbesondere durch eine niedrige Reibungszahl und einen geringen Verschleiß aus. Unter Zuhilfenahme statistischer Versuchsmethoden ist es möglich, charakteristische Schichteigenschaften vorherzusagen und gezielt einzustellen. Durch den Einsatz verschiedener Maskierungs- und Abtragungsstrategien können Schichten unterschiedlichen tribologischen Verhaltens auf einer Oberfläche miteinander kombiniert und somit eine lokal angepasste Reibung in der Wirkfuge realisiert werden.

Auf Grundlage der in den ersten beiden Phasen im Hinblick auf eine gezielte Reibungsanpassung kontinuierlich weiterentwickelten a-C:H:W-Schichtsysteme wird in der 3. Phase erforscht, inwieweit die Schichtsysteme auch zu einer effektiven Verlängerung der Standzeit beschichteter Werkzeuge beitragen können. Hierbei stehen vor allem die Ermüdungslebensdauer und die Verschleißbeständigkeit der Schichtsysteme im Fokus, die durch multilagige und mehrphasige Schichtarchitekturen sowie durch Maßnahmen der Substratvorbehandlung weiter gesteigert werden sollen. Der Beitrag der Schichten zu prozessangepassten Reibungsbedingungen wird vermehrt in anwendungsnahen Modell- und Realversuchen analysiert. Darüber hinaus erhalten die tribologischen Schichten eine ergänzende, sensorische Funktion. Durch die Erfassung elektrischer Kenngrößen in Schichtsystemen mit hoch- und niederohmigen Schichtlagen wird es möglich, Schichtverschleiß zu detektieren und somit die Schichtlebensdauer präziser und werkzeugindividuell vorherzusagen.



Beitrag wolframmodifizierter amorpher Kohlenstoffschichten zu lokal angepassten Reibungsbedingungen eines Fließpressprozesses (a) und schematische Darstellung und charakteristisches Verhalten einer sensorischen Schicht zur Detektion von Schichtverschleiß (b).

Deutsche Forschungsgemeinschaft

SPP 1551: Reibungsreduzierung in geschmierten tribologischen Kontakten durch mikrotexturierte Bauteiloberflächen

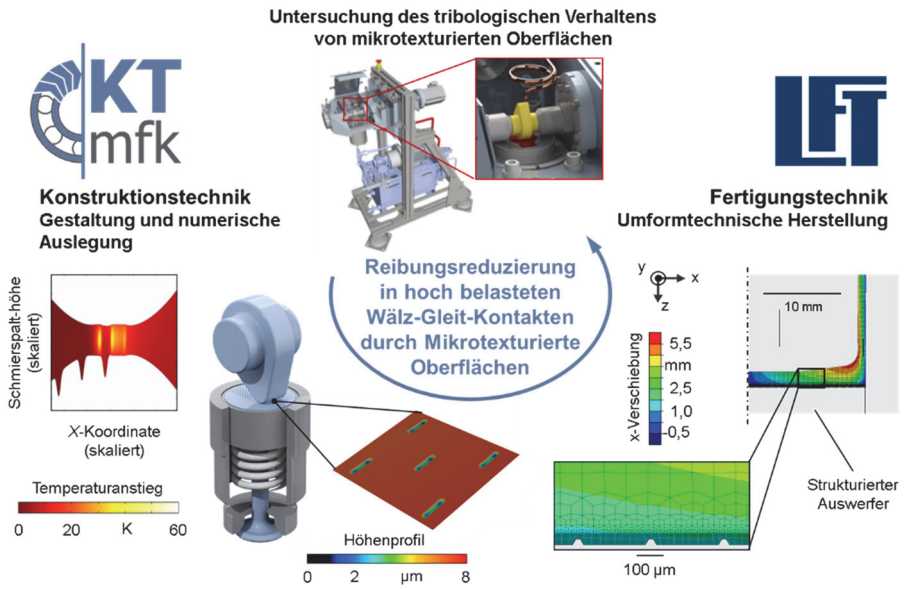
Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA2913/3-1 (1. Phase SPP 1551)*
	WA2913/3-2 (2. Phase SPP 1551)
Förderzeitraum	*01.03.2012 bis 01.03.2015*
	01.05.2015 bis 30.04.2018
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
	Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	Dipl.-Ing. M. Weschta
	M. Marian, M.Sc.

Steigende Anforderungen an eine höhere Leistungsdichte und Zuverlässigkeit technischer Systeme bei gleichzeitig knapper werdenden Ressourcen, zunehmendes Umweltbewusstsein und strengeren legislativen Randbedingungen erfordern ressourceneffiziente Maschinen- und Motorenelemente. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden Konstruktionselemente benötigt, bei denen Relativbewegungen mit geringen Reibungsverlusten erfolgen. Die Kraftübertragung erfolgt dabei häufig in höher belasteten Wälz-Gleit-Kontakten, bei denen überlagerte Effekte von Thermo- und Hydrodynamik sowie elastischer Deformation auftreten. Man spricht in diesem Zusammenhang von Thermo-Elastohydrodynamik (TEHD).

In diesen TEHD-Kontakten wurde der Einfluss von gezielt eingebrachten, definierten Mikrotexturen auf die Schmierfilmbildung, Reibung und Verschleiß bislang noch vergleichsweise wenig untersucht. Für niedrig belastete Kontakte haben mikrotexturierte Oberflächen dagegen bereits Einzug in die industrielle Fertigung gefunden.

Daher wurde im Rahmen des gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) bearbeiteten Projektes sowohl die Wirkung von Mikrotexturen in höher belasteten Kontakten untersucht, als auch eine Vorgehensweise zur maßgeschneiderten Auslegung und allgemeine Gestaltungsrichtlinien unter Berücksichtigung einer effizienten Fertigungsprozesskette erarbeitet.

Durch die Entwicklung eines transienten, dreidimensionalen TEHD-Simulationsmodells war es möglich, die Wirkung von Oberflächenmikrotexturen zu untersuchen und die maßgeblichen Einflussparameter, wie die Texturgeometrie, die Schmierstoffeigenschaften oder die Kontaktbedingungen, zu identifizieren. Der Einsatz von Metamodellen sowie Optimierungsalgorithmen erlaubte schließlich eine Ableitung von vorteilhaften und robusten Texturdesigns mit vertretbarem numerischen Aufwand. Die Untersuchung des tribologischen Verhaltens und damit eine Validierung erfolgte auf Modell- und Komponentenebene. Für letztere wurden Kurz- und Langzeitversuche mit mikrotexturierten Tassenstößeln auf einem Nocken/Stößel-Komponentenprüfstand durchgeführt.



Untersuchung von Oberflächenmikrotexturen über mehrere Produktlebensphasen hinweg, von der Gestaltung und numerischen Auslegung, über die umformtechnische Herstellung bis zur anwendungsbezogenen Prüfung.

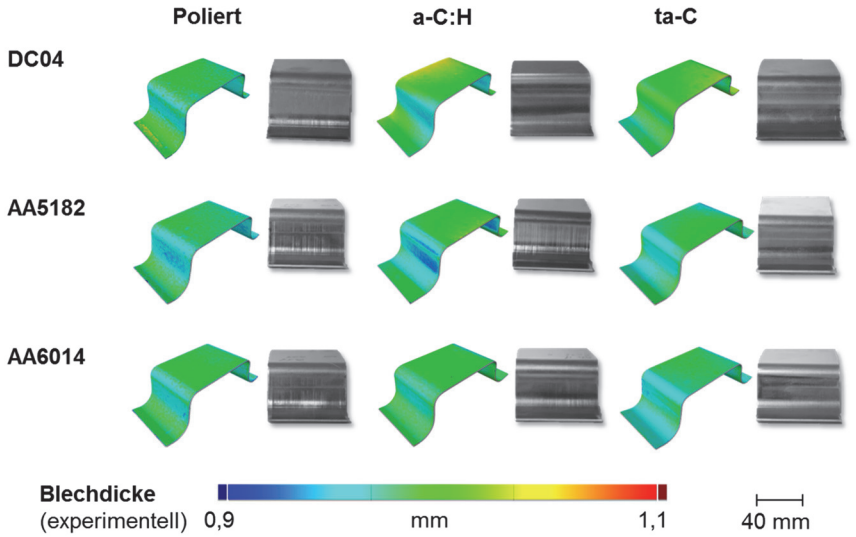
Deutsche Forschungsgemeinschaft

SPP 1676: Trockenumformung mit lokal angepassten tribologischen Bedingungen

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*TR 1043/5-1, TR 1043/5-2*
Förderzeitraum	*02.09.2015 bis 01.09.2017*
	02.09.2017 bis 01.09.2019
Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	R. Zhao, M. Sc.,
	B. Rothammer, M. Sc.

Im Schwerpunktprogramm 1676 werden energieeffiziente und nachhaltige Umformprozesse erforscht, bei denen auf konventionelle Schmierstoffe verzichtet wird. Bevor die geformten Werkstücke anschließenden Arbeitsschritten, wie Fügen und Lackieren, zugeführt werden, müssen die darauf verbleibenden Schmierstoffe entfernt und anschließend getrocknet werden. Durch einen schmierstofffreien Umformprozess lassen sich die Kosten zum Entfernen von Schmierstoffen und Trocknen der geformten Werkstücke sparen. Mit konventionellen Umformwerkzeugen ohne Schmierstoff ist das Trockenumformen aufgrund hoher Reibung und intensiven Verschleißes nicht möglich. Ein Lösungsansatz stellt die werkzeugseitige Anpassung der tribologischen Bedingungen dar. Die Anpassung von tribologischen Bedingungen auf dem Werkzeug erfolgt durch Oberflächenmodifikation, wie Beschichtung und Lasertexturierung. Das Projekt unterteilt sich in drei Phasen zu je zwei Jahren. In der bereits abgeschlossenen ersten Phase wurde die grundsätzliche Machbarkeit des trockenen Umformprozesses durch Streifenziehtests unter Laborversuchsbedingungen validiert. Der dominierende Verschleißmechanismus unter schmierstofffreien Prüfbedingungen stellt die Adhäsion des Blechwerkstoffs, insbesondere bei Aluminiumlegierungen, auf der beschichteten Oberfläche dar.

Die Applikation von amorphen Kohlenstoffschichten auf der Werkzeugoberfläche ermöglicht die Reduzierung von Adhäsion und somit der Reibungszahl. Eine Reibungszahlreduktion bis zu 60 % kann durch die Beschichtung von Werkzeugen mit einer ta-C-Schicht erzielt werden. Eine alternative Option stellt die kostengünstige a-C:H-Schicht dar, die ebenfalls ähnlich niedrige Reibungszahlen aufweist und adhäsionshemmend wirkt. Basierend auf den erworbenen Erkenntnissen der ersten Phase, lag das Ziel der zweiten Phase auf der Realisierung von Trockentiefziehprozessen mit anspruchsvoller Bauteilgeometrie. Dabei liegt das Augenmerk auf der zielgerichteten Adaption von amorphen Kohlenstoffschichten auf Tiefziehwerkzeugoberflächen. Nachdem die ta-C- und a-C:H-Schichten in den bisherigen Ergebnissen ein zuverlässiges reibungs- und verschleißreduzierendes Einsatzverhalten zeigen, steht in der aktuell laufenden dritten Projektphase die Anpassung des Schichtdesigns zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit im Fokus. Zur Einstellung der mechanischen Eigenschaften wird ein multilagiges Schichtdesign eingesetzt, um ein günstiges Härte-Elastizitätsmodul-Verhältnis (H/E) zu ermitteln. Dadurch soll eine Reduzierung des Abrasivverschleißes durch H/E-Anpassung sowie eine bessere Schicht-Substrat-Haftung durch das rissstoppende multilagige Design realisiert werden. Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse sollen zu einem besseren Verständnis der Reibungsmechanismen beitragen und die gezielte Einstellung des Reibungsverhaltens ermöglichen.



Blechdickenverteilung und Oberflächenqualität der umgeformten U-Profile jeweils mit den unbeschichteten, polierten Referenzwerkzeugen und mit den beschichteten Werkzeugen.

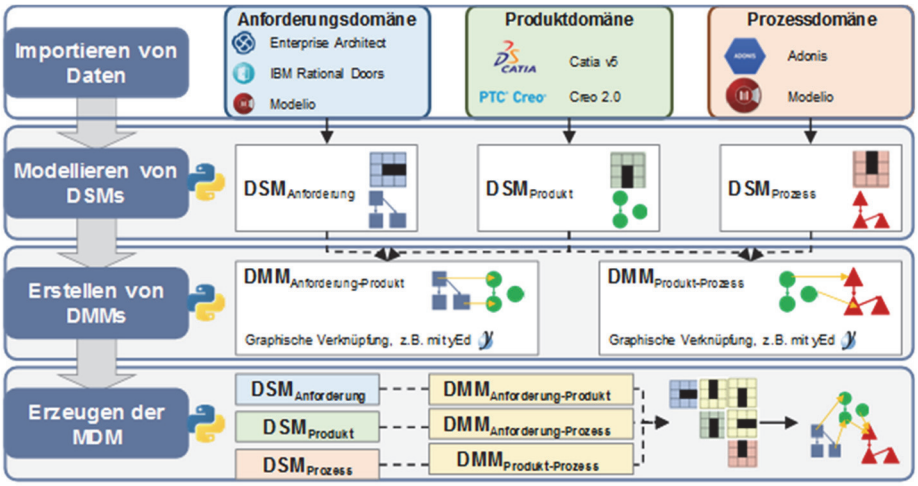
Produktorientiertes Prozessmanagement (ProPro) – Computerunterstützte Modellierung sowie graphbasierte Analyse und Visualisierung der matrixbasierten Produktbeschreibung

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA2892/2-2*
Förderzeitraum	*01.01.2016 bis 31.03.2018*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Dipl.-Ing. T. Luft

Die Zunahme von kundenspezifischen und individualisierten Anforderungen sowie die Steigerung der Komplexität moderner Produkte, stellt den Produktentwickler vor Herausforderungen. Insbesondere bei der Festlegung geeigneter Produktmerkmale, durch die vom Kunden geforderte Produkteigenschaften erreicht werden, können kleine Änderungen zu unvorhersehbaren Veränderungen an den Gesamtsystemeigenschaften führen. Dadurch wird ein effizientes, zielgerichtetes und kontextspezifisches Entwicklungsmanagement stark erschwert. Vor diesem Hintergrund war das zentrale Ergebnis von ProPro 1.0 ein Vorgehensmodell zum Iterations- und Produktreifegradmanagement in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung, das im Rahmen von ProPro 2.0 um computergestützte Werkzeuge erweitert wurde. Dieses stellt insbesondere die Produkteigenschaften in den Mittelpunkt. Die Hauptbestandteile des Modells sind ein eigenschaftsorientiertes Vorgehensmodell, ein Mikrozyklus der Synthese und Analyse sowie die matrixbasierte Produktbeschreibung. Zudem wurde letztere im Rahmen um graphbasierte Analyse- und Visualisierungswerkzeuge erweitert, die eine effizientere Navigation durch die Produktbeschreibung und damit ein transparenteres Iterations- und Reifegradmanagement ermöglichen.

Insbesondere die Anforderungsdokumentation stellte sich als wesentlich für die Produkteigenschaftsbetrachtung heraus. Neben dieser Anforderungsdomäne wurden zudem CAD-Dokumentation für die Produktdomäne und Prozessmodellierungstools für die Integration der Prozessdomäne in die Matrixschreibweise untersucht.



Konzept für ein Assistenzsystem zur computerunterstützten Modellierung

Für die computergestützte Modellierung der matrixbasierten Produktbeschreibung wurde ein Konzept für ein Assistenzsystem entwickelt, um die drei genannten Domänen in der Matrixschreibweise zu vereinen. Eine wesentliche Herausforderung war hierbei die prototypenhafte Implementierung einer Schnittstelle für die Übertragung von Produktmerkmalen und deren Relationen insbesondere aus dem CAD für die Abbildung der Produktdomäne. Die Vielzahl der in der Produktentwicklung generierten Datenformate stellte dabei eine Schwierigkeit dar, da für jedes Format eine passende Schnittstelle geschaffen werden muss. Ausgehend von der matrixbasierten Produktbeschreibung wurden sowohl individuelle, als auch holistische Analysenmethoden untersucht, die einerseits ein detaillierteres Verständnis der jeweiligen Domäne unterstützen, andererseits einen Gesamtüberblick über die jeweiligen Domänengrenzen hinweg ermöglichen. Die Visualisierung durch Graphen ist durch Knoten und Kanten gegeben. Der wesentliche Mehrwert aus den Projektergebnissen ist insbesondere in der starken Erhöhung der Transparenz und des Verständnisses der Komplexität im produktorientierten Prozessmanagement zu sehen.

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Gestaltbasiertes rechnergestütztes Toleranzmanagement: Entwicklung eines neuen methodischen und rechnergestützten Frameworks für die Montage- und Bewegungssimulation basierend auf Skin Model Shapes (ShapeCAN)

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/15-1*
Förderzeitraum	*01.07.2016 bis 30.06.2019*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Dr.-Ing. B. Schleich
	A. Aschenbrenner, M.Sc.

Geometrische Abweichungen sind aufgrund von unvermeidlichen Fertigungsungenauigkeiten an jedem gefertigten Bauteil beobachtbar. Diese Bauteilabweichungen setzen sich über komplexe Baugruppen fort und beeinflussen maßgeblich die Qualität und Funktion mechanischer Produkte. Daher müssen die erlaubten Abweichungen in Form von Toleranzen während der Konstruktion spezifiziert werden, was aufgrund der weitreichenden Auswirkungen von Toleranzentscheidungen auf die Fertigungs- und Prüfkosten sowie die Produktqualität mit einer großen Verantwortung einhergeht. Zur Unterstützung bei der Toleranzvergabe bieten Toleranzsimulationen die Möglichkeit, die Folgen von Bauteilabweichungen auf montage- und funktionskritische Schließmaße vorherzusagen. Bestehende Ansätze hierzu haben aber insbesondere hinsichtlich der Berücksichtigung von Formabweichungen und der normkonformen Abbildung von Toleranzzonen schwerwiegende Schwächen. Motiviert hierdurch wurde das Konzept der Skin Model Shapes entwickelt [1], das die Toleranzsimulation auf Basis von Punktwolken und Oberflächennetzen abwei-

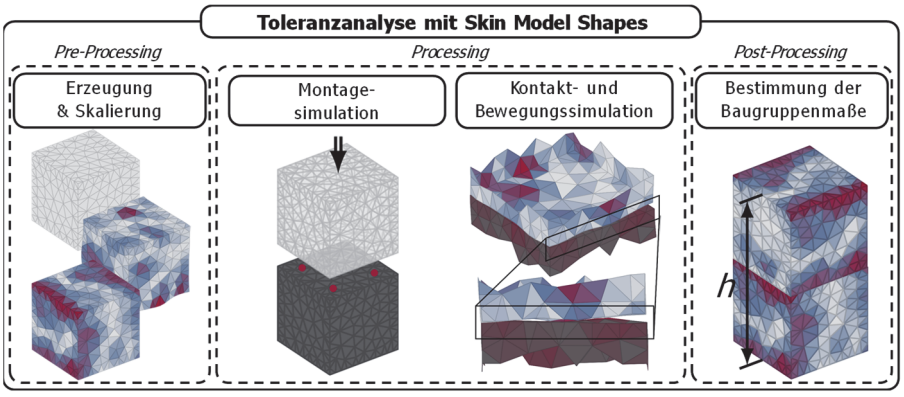
chungsbehafteter Bauteilrepräsentanten erlaubt und so die Nachteile bestehender Verfahren ausräumt. In diesem Zusammenhang bestand der Beitrag des Forschungsvorhabens in der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen für die Erzeugung [2], Montage [3] und kinematische Analyse [4] von solchen Skin Model Shapes für deren Nutzung im rechnerunterstützten Toleranzmanagement. Diese Methoden und Werkzeuge erlauben einen kontinuierlichen Transfer geometrischer Spezifikationen unter Einbezug aller Facetten der Entwicklung, der Fertigung und der messtechnischen Qualitätssicherung entlang des Produktlebenszyklus. Darüber hinaus wurden die entwickelten Algorithmen in eine prototypische Toleranzsimulationsanwendung integriert und eine ganzheitliche Methode zur Toleranzanalyse auf Basis von Skin Model Shapes (siehe Bild) entwickelt. Aufbauend darauf können schließlich die Potentiale eines durchgängigen und kompletten virtuellen Toleranzmanagementprozesses gehoben werden.

[1] Schleich, B., Wartzack, S. (2017). Skin Model Shapes: ein neuer Ansatz zur Toleranzsimulation auf Basis von Punktwolken und Oberflächennetzen. *Konstruktion*, *69*(4), 86-90.

[2] Schleich, B., Wartzack, S. (2015). Evaluation of geometric tolerances and generation of variational part representatives for tolerance analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *79*(5), 959-983.

[3] Schleich, B., Wartzack, S. (2018). Novel approaches for the assembly simulation of rigid Skin Model Shapes in tolerance analysis. *Computer-Aided Design*, *101*, 1-11.

[4] Schleich, B., Wartzack, S. (2018). Gap hull estimation for rigid mechanical joints considering form deviations and multiple pairs of mating surfaces. *Mechanism and Machine Theory*, *128*, 444-460.



Toleranzanalyse auf Basis von Skin Model Shapes nach [1]

Toleranzmanagement in frühen Produktentwicklungsphasen

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/17-1*
Förderzeitraum	*01.11.2016 bis 31.01.2019*

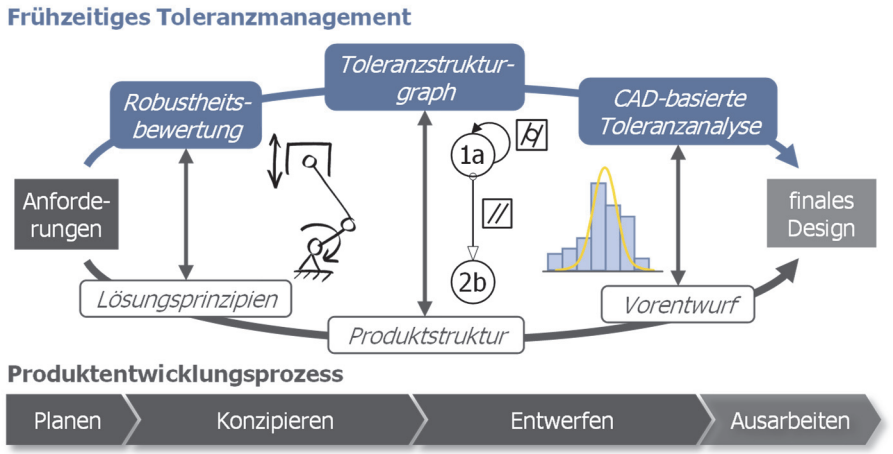
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	S. Götz, M. Sc.

Entscheidungen in frühen Produktentwicklungsphasen haben enormen Einfluss auf die Kosten und die Qualität des Produktes. Dies gilt ebenso für geometrische Bauteiltoleranzen, die maßgeblich die Funktion und Qualität des Produktes sowie dessen Herstellkosten beeinflussen. Die Berücksichtigung geometrischer Bauteilabweichungen bei Tätigkeiten und Entscheidungen in frühen Produktentwicklungsphasen birgt somit enormes Potential zur Kostensenkung, zur Verkürzung der Entwicklungsdauer und zur gleichzeitigen Erhöhung der Produktqualität.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, die Tätigkeiten des Toleranzmanagements zum frühestmöglichen Zeitpunkt durchführen und Erkenntnisse daraus im weiteren Verlauf der Produktentwicklung berücksichtigen zu können. Wie in der Abbildung dargestellt, impliziert dies eine enge Verknüpfung der Domänen Produktentwicklung, Robust Design und Toleranzmanagement. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll somit eine durchgängige Methodik erarbeitet werden, die eine Toleranzbetrachtung früher als in bisherigen Ansätzen ermöglicht. Die zentrale Herausforderung liegt dabei in der Entwicklung von konkret anwendbaren Methoden, die zuverlässig auf Basis der in frühen Phasen der Produktentwicklung meist qualitativ oder implizit vorliegenden Informationen angewendet werden können.

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens stehen somit Methoden zur Beurteilung unterschiedlicher Lösungskonzepte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Robustheit des finalen Produktes zur Verfügung, die so den Auswahlprozess adäquater Lösungsprinzipien unterstützen. Außerdem ermöglicht ein neuartiger Graphen-basierter Ansatz eine nachvollziehbare Visualisierung von Baustrukturen und Toleranzstrukturen sowie eine semantische Abbildung von implizit vorliegendem Konstruktions- und Tolerierungswissen. Damit lässt sich sowohl die Optimierung der Baustruktur hinsichtlich der nötigen Tolerierung unterstützen als auch eine teilautomatisierte erstmalige Toleranzvergabe auf Basis der Baustruktur eines Produktes vornehmen. Darüber hinaus ermöglicht ein CAD-gestütztes Toleranzanalyseverfahren bereits auf Basis des Produktentwurfs eine entwicklungsbegleitend anwendbare Absicherung der Tolerierungssituation.

Schließlich wurden die neu entwickelten Ansätze sowohl untereinander als auch mit den etablierten Tätigkeiten der Toleranzsimulation späterer Phasen der Produktentwicklung (insbesondere während des nachfolgenden Gestaltens des gesamten Produktes) verknüpft. Damit wird der Produktentwicklungsingenieur dazu befähigt, bereits vor der finalen Ausgestaltung ein robustes Produkt zu entwerfen, um so aufwändige Iterationen beim abschließenden Toleranzdesign zu vermeiden.



Einbindung des frühzeitigen Toleranzmanagements in den Produktentwicklungsprozess

SPP 1921: EVOWIPE – Explizites Vergessen ontologiebasierten Wissens in der Produktentwicklung

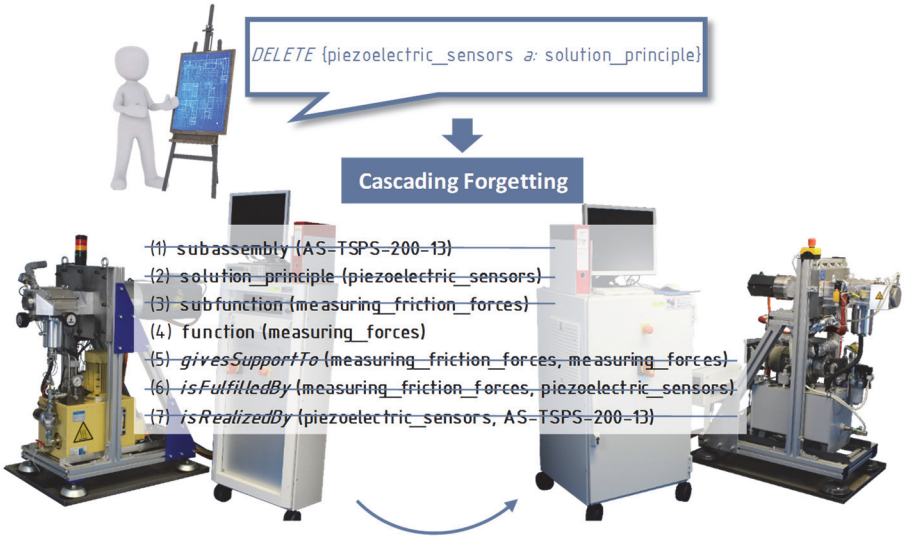
Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/22-1*
Förderzeitraum	*01.01.2017 bis 31.12.2019*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Dipl.-Ing. P. Kestel
	P. Kügler, M. Sc.

Die Wiederverwendung von Wissen in der Produktentwicklung kann Aufwand und Kosten reduzieren. Dieses Wissen liegt oft in digitalen Modellen und Dokumenten vor, wie z. B. CAD-Modellen und Anforderungslisten. Durch die immer höhere Komplexität von Produkten und die wachsenden Wissensbasen wird es dabei allerdings zur Herausforderung diese auf die für die Wiederverwendung relevanten Elemente zu reduzieren. Dabei mangelt es derzeit an effizienten Vorgehensmodellen und IT-Unterstützung, sodass manuelles Löschen von Einzelelementen oft zu Inkonsistenzen in der Wissensbasis und Fehlern bei der Wiederverwendung führt. Zum Beispiel können Zusammenhänge und Abhängigkeiten in Baustrukturen oder zwischen Funktionen schlicht übersehen werden.

Zur Steigerung der Effizienz und Zielgerichtetheit der Wiederverwendung wird in EVOWIPE die Methode Intentional Forgetting (IF) für Produktwissen konzipiert. „Vergessen" geht über das Löschen einzelner digitaler Objekte hinaus, da es z. B. berücksichtigt, welche zusammenhängenden Elemente gemeinsam vergessen werden müssen oder ob das Ersetzen von Modellelementen das vergessen oder verändern weiterer Objekte nach sich zieht.

In Zusammenarbeit mit dem Institut West der Universität Koblenz-Landau werden Operatoren entwickelt, die in ontologischen Wissensbasen intentionales Vergessen unterstützen. Die ontologische Wissensbasis ist daher essentiell, da Ontologien in der Lage sind Wissen zu vereinheitlichen und zu verknüpfen, das aus unterschiedlichen Quellen stammt. Für das Konzipieren der IF-Operatoren dient u. a. ein Beispiel aus der Prüfstandsentwicklung, das sehr stark auf Wiederverwendung einer früheren Entwicklungsdokumentation basiert. Hierbei sind insbesondere die Elemente interessant, die nicht in die neue Entwicklung übernommen wurden und welche Auswirkungen dies auf den gesamten Entwicklungsprozess hat.



Effiziente Wiederverwendung von Produktmodellen und –wissen

Die wissenschaftliche Herausforderung besteht einerseits darin, ein einheitliches, ontologisches Wissensmodell des relevanten Produktwissens zu generieren, das den Entwickler in die Lage versetzt relevantes Wissen abzufragen. Andererseits intentionales Vergessen über Abfragen durch geeignete Methoden der Wissensrevision umzusetzen. Zum Beispiel kann über Meta-Eigenschaften das Löschen von zusammenhängenden Elementen aus unterschiedlichen Phasen des Produktentwicklungsprozesses erzwungen werden (siehe Bild). Durch Intentional Forgetting kann so die Wiederverwendung von Produktwissen effizienter und zielgerichteter gestaltet werden.

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Tolerierung bei der Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundbauteile

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/29-1*
Förderzeitraum	*15.11.2017 bis 14.11.2020*

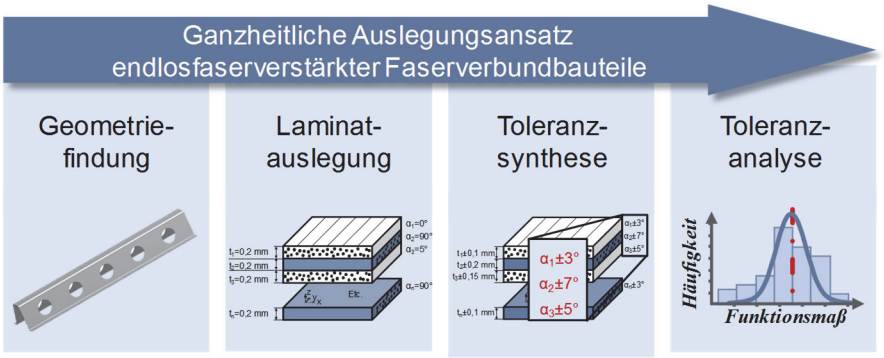
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	M. Franz, M.Sc.

Im Zuge globaler Megatrends, wie steigendem Interesse an Nachhaltigkeit und einem wachsenden Bedürfnis nach Mobilität, wird dem Leichtbau eine zunehmend wichtigere Bedeutung während der Produktentwicklung zugeschrieben. Durch ihre guten mechanischen Eigenschaften bei geringer Dichte sind endlosfaserverstärkte Faserverbundkunststoffe ein beliebter Leichtbauwerkstoff.

Doch Faserverbundwerkstoffe stellen den Produktentwickler auch vor neue Herausforderungen. Einerseits gestaltet sich die Auslegung der Nominalgestalt eines Produkts, durch eine Vielzahl zusätzlicher, festzulegender Design-Parameter, aufwendiger. Andererseits weist jedes Produkt einen Unterschied zu seiner Nominalgestalt auf. Dieser Unterschied entsteht aufgrund unvermeidlicher Unsicherheiten und Abweichungen, wie beispielsweise streuenden Materialwerten oder variierenden Lasten. Diese Streuungen können dazu führen, dass auch ein gut ausgelegtes Bauteil seine Funktion nicht mehr erfüllt, was insbesondere bei Faserverbundstrukturen aufgrund der Vielzahl an Design-Parametern und der speziellen mechanischen Eigenschaften der Fall sein kann. Bisherige Ansätze des Toleranzmanagements fokussieren jedoch in der Regel konventionelle isotrope Werkstoffe und können lediglich als Grundlage für die Tolerierung von Faserverbundbauteilen angesehen werden.

Bestehende Ansätze zur Auslegung von Faserverbundstrukturen geben hingegen keine Möglichkeit, Streuungen über eine Tolerierung mit in das Auslegungsergebnis einfließen zu lassen und phänomenologische Untersuchungen an Faserverbundstrukturen zielen lediglich auf den Fertigungsprozess ab.

Das Ziel des Forschungsprojekts ist daher die Bereitstellung eines Vorgehens zur Tolerierung von endlosfaserverstärkten Faserverbundstrukturen während der Auslegung. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen vier Aufgaben gelöst werden. Die zwei wesentlichen Aufgaben sind die Entwicklung eines Vorgehens zur Toleranzanalyse auf Basis der Formänderungsenergie sowie die Erweiterung des Vorgehens um eine Toleranzsynthese auf Basis der Toleranzanalyse. Damit wird es möglich, zuerst den Einfluss der auslegungsrelevanten Parameter auf das Funktions- bzw. Verzugsverhalten zu ermitteln und diese im Anschluss mit einem Definitionsbereich zu versehen, innerhalb dessen trotz Streuung noch eine Funktionserfüllung gewährleistet werden kann. Mit den hierbei erarbeiteten Vorgehensweisen ist das Vorgehensmodell zur Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen nach KLEIN und WARTZACK um die Toleranzanalyse und –synthese zu erweitern. Darüber hinaus ist es eine wichtige Aufgabe den Einfluss lokaler Verstärkungen auf das Verzugsverhalten von FVK-Bauteile zu untersuchen und beim Aufbau der Methoden eine Möglichkeit zur Berücksichtigung lokaler Verstärkungen vorzusehen. Am Ende des Projekts steht dem Produktentwickler ein ganzheitlicher Auslegungsansatz zur Verfügung, der ihn ausgehend von einer ersten Geometrieidee bis hin zu einem fertigen Laminataufbau mit einer geeigneten Tolerierung durch die Auslegung führt.



Ablauf des ganzheitlichen Auslegungsansatzes endlosfaserverstärkter Faserverbundbauteile mit der integrierten Toleranzsynthese und -analyse

Statistische Toleranzanalyse additiv gefertigter Gelenkgetriebe unter Berücksichtigung anlagenspezifischer Fertigungseinflüsse

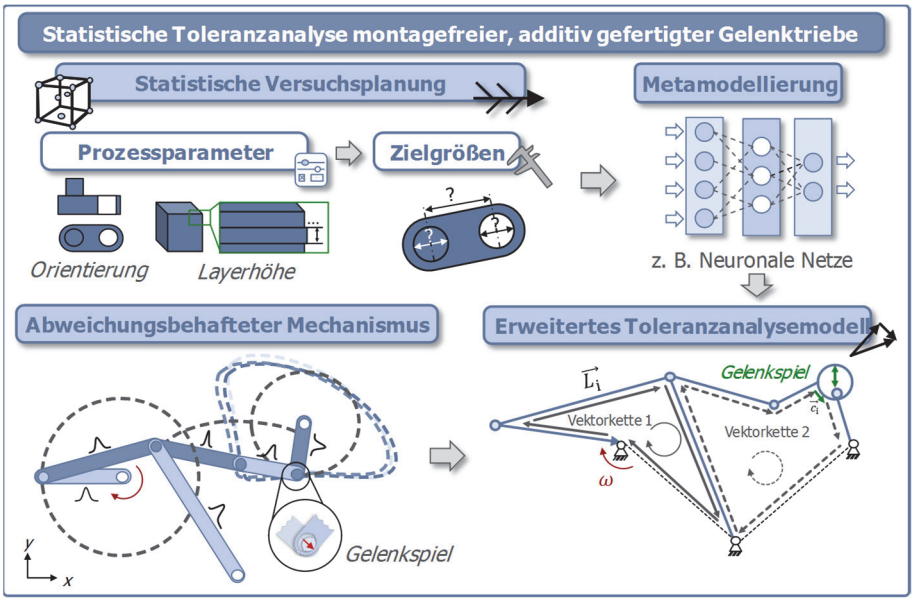
Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/27-1*
Förderzeitraum	*01.01.2018 bis 31.12.2020*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	P. Schächtl, M.Sc
	M. Hallmann, M.Sc.

Die additive Fertigung konnte sich in den letzten Jahren zu einer der vielversprechendsten Schlüsseltechnologien in der modernen Fertigung entwickeln. Vor allem bei der Herstellung individualisierter Teile komplexer Geometrie und Innenstruktur bei losgrößenunabhängigen Fertigungskosten können die innovativen Fertigungsverfahren überzeugen und ergänzen somit zunehmend die industrielle Fertigungslandschaft. Darüber hinaus erlaubt die additive Fertigung die Herstellung von beweglichen Baugruppen in einem einzelnen Fertigungsschritt. Hierbei beeinflussen die anlagenspezifischen Prozessparameter sowohl das Gelenkspiel als auch die geometrische Genauigkeit der Gelenke. Die Bewegungsgenauigkeit montagefreier Gelenkgetriebe hängt somit stark von der Wahl der Prozessparameter ab. Obwohl bestehende Methoden der Toleranzanalyse ihr Potenzial zur Untersuchung bewegter Systeme bewiesen haben, beschränken sich diese derzeit auf konventionelle Fertigungsverfahren und bilden das Gelenkspiel zumeist nicht realitätsgetreu ab.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wird im Rahmen dieses Forschungsprojekts ein neuer Ansatz für die prozessorientierte, statistische Toleranzanalyse zur virtuellen Absicherung des Bewegungsverhaltens additiv gefertigter Mechanismen entwickelt.

Zur Analyse der Bewegung wird ein erweitertes Toleranzanalysemodell entwickelt, mit dem sich die Abweichungen der zeitabhängigen Bewegungskurven von ihren Idealbahnen statistisch vorhersagen lassen. Eine realistische Simulation der Bewegung wird durch die Integration der vergleichsweise großen Gelenkspiele mit ihren zeitvarianten Gelenkkräften aus der Mehrkörpersimulation in das vektorielle Toleranzmodell erreicht. Die prozessorientierte Abbildung der geometrischen Abweichungen der einzelnen Gelenkglieder aus dem additiven Fertigungsprozess gelingt über Metamodellierung wie z. B. künstliche neuronale Netze und Support Vector Machines. Hierzu wird im Rahmen von experimentellen Versuchsreihen der Einfluss der Prozessparameter wie Schichthöhe, Bauteilorientierung oder Füllgrad auf die funktionalen Zielgrößen der relevanten Geometrieelemente untersucht und die daraus gewonnenen Erkenntnisse anschließend in geeignete Metamodelle überführt. Abschließend werden zur Validierung der Methodik Bewegungsbahnen real gefertigter Gelenkgetriebe mit Hilfe optischer Hochgeschwindigkeitsmessung erfasst und den Vorhersagen aus der Toleranzanalyse gegenübergestellt. So liegt als Ergebnis des Forschungsprojekts eine validierte Methode zur Toleranzanalyse additiv gefertigter, montagefreier Mechanismen vor.



Analyse der Fertigungseinflüsse auf die Bewegungsgenauigkeit additiv gefertigter Mechanismen

Toleranzoptimierung statisch unter- und überbestimmter Systeme

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/25-1*
Förderzeitraum	*01.08.2018 bis 31.01.2021*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	M. Hallmann, M.Sc.

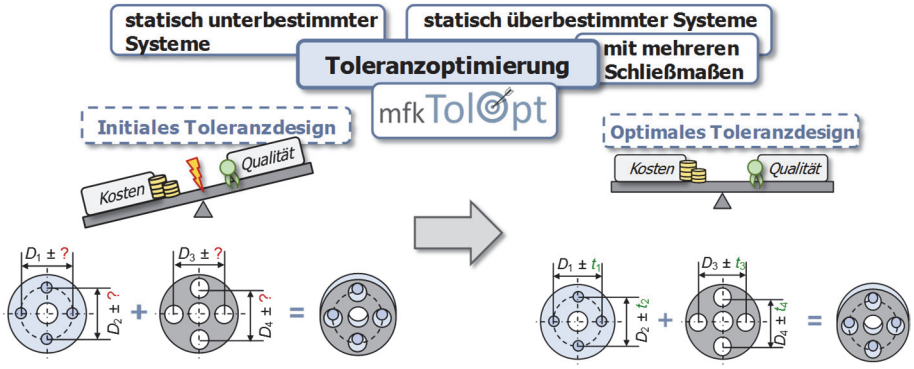
Hohe Qualitätsanforderungen, steigender Kundendruck und zunehmender Hohe Qualitätsanforderungen, steigender Kundendruck und zunehmender internationaler Wettbewerb setzen Industrieunternehmen mehr denn je unter enormen Kosten- und Qualitätsdruck. In diesem Kontext ist die Produktentwicklung stets einem Zielkonflikt ausgesetzt: Während zu groß gewählte Toleranzen die Funktionserfüllung nicht gewährleisten können, haben zu klein Gewählte hohe Kosten zur Folge. So ist die Toleranzspezifikation eine Gratwanderung nach dem Motto "so eng wie nötig, so weit wie möglich". In diesem Kontext zielt die Toleranzsynthese darauf ab, bei gegebenen Randbedingungen Toleranzen so zu vergeben, dass sowohl technische als auch wirtschaftliche Gesichtspunkte bestmöglich erreicht werden.

Zur Lösung dieses Zielkonflikts wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Toleranzsyntheseverfahren entwickelt. Obwohl immer wieder Bauteile, wie z. B. Gehäusedeckel oder Getriebeelemente, gezielt statisch über- oder unterbestimmt verbaut werden, existieren derzeit jedoch keine geeigneten Verfahren zur Toleranzoptimierung von statisch über- sowie unterbestimmten Baugruppen. Zudem lassen bestehende Ansätze eine simultane Toleranzoptimierung von mehreren, verknüpften Schließmaßen kaum zu.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wird im Rahmen des Forschungsprojekts ein Vorgehen zur Toleranzoptimierung statisch unter- und überbestimmter Baugruppen mit mehreren Schließmaßen entwickelt.

Hierzu wird zunächst untersucht, welche Einflussfaktoren die statische Bestimmtheit eines Systems beeinflussen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussgrößen, wie z. B. Temperatur oder Kraft. Anschließend werden Methoden zur statistischen Toleranzoptimierung sowohl für statisch unter- als auch statisch überbestimmte Baugruppen erarbeitet. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf der in der Industrie üblichen statistischen Toleranzanalyse mit Hilfe von Stichprobenverfahren wie der Monte Carlo Simulation und dem Latin Hypercube Sampling sowie den damit verbundenen Verfahren zur Ausschussratenschätzung. Die wissenschaftliche Herausforderung liegt dabei primär darin, die Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen mathematisch adäquat zu beschreiben, sodass die Toleranzoptimierung unter Zuhilfenahme geeigneter Optimierungsalgorithmen erfolgen kann. Durch die abschließende Erweiterung der erarbeiteten Methoden auf Baugruppen mit mehreren Schließmaßen kann die simultane Toleranzoptimierung gesamter Baugruppen durchgeführt werden.

Als Ergebnisse des Forschungsprojekts liegen somit verifizierte Methoden vor, die eine statistische Toleranzoptimierung von statisch unter- und überbestimmten Baugruppen mit mehreren Schließmaßen erlauben. Durch den Einsatz dieser Methoden können zeit- und kostenintensive Iterationen vermieden werden und Toleranzen bereits frühzeitig in der Produktentwicklung kosten- und funktionsoptimal vergeben werden. So ist die Praxistauglichkeit der Methode durch eine realitätsgetreue Abbildung des technischen Systems gegeben.



Entwicklung von Methoden zur Toleranzoptimierung statisch unter- und überbestimmter Systeme mit mehreren Schließmaßen

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Grundlagen für eine verbesserte Gebrauchsdauerberechnung feststoffgeschmierter Wälzlager durch Multiskalen-Untersuchungen

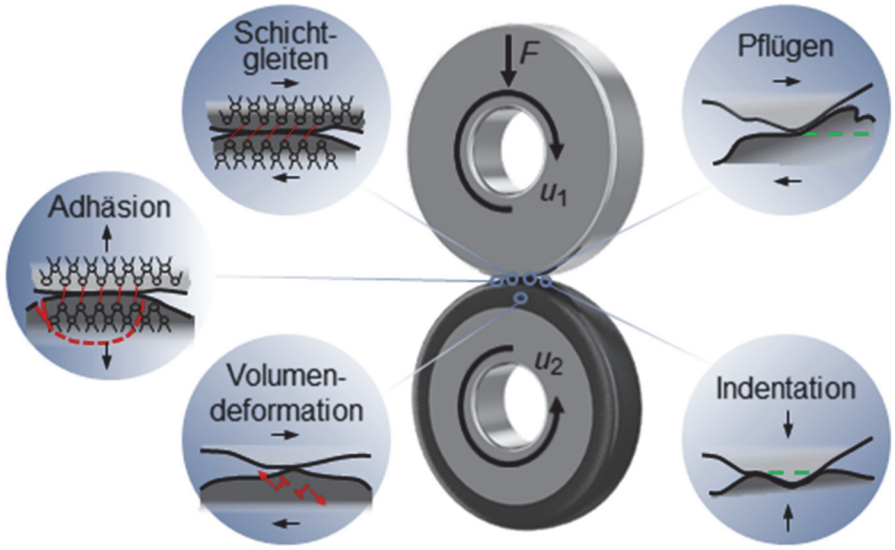
Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*TR 1043/7-1*
Förderzeitraum	*01.10.2018 bis 30.09.2021*

Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	A. Seynstahl, M. Eng.

Die zuverlässige Prognose der Gebrauchsdauer von mit Molybdändisulfid feststoffgeschmierten Wälzlagern ist in der Ingenieurpraxis, insbesondere bei der Bauteilauslegung, wichtig. Das einzig bisher verfügbare Berechnungsmodell liefert jedoch keine ausreichend zuverlässige Prognose. Dieses basiert auf einem empirischen Ansatz, wobei der Materialabtrag auf makroskopischer Ebene mit Kontaktgrößen wie Härte, Kraft und Gleitweg beschrieben wird. Dabei werden wichtige Effekte, wie die Schichteigenschaften, der Schichttransfer sowie der Schichtauftrag nur bedingt berücksichtigt.

Im Rahmen eines Verbundprojekts zwischen KTmfk, Lehrstuhl für Allgemeine Werkstoffeigenschaften (WW I) und Computer-Chemie-Centrum (CCC) werden Multiskalen-Untersuchungen in der Makro-, Mikro- und Nanoebene durchgeführt. Durch das Zusammenwirken soll ein neu entwickeltes Gebrauchsdauermodell, wegen des Einsatzes aufeinander abgestimmter Charakterisierungs- und Simulationsmethoden, die empirischen Anteile deutlich minimieren. Ausgehend von dem neuen Berechnungsmodell werden mehr Effekte berücksichtigt und eine genauere Gebrauchsdauerprognose wird möglich.

Das spezifische Ziel der ersten Projektphase besteht darin, die Elementarmechanismen für den Wälzkontakt, die das tribologische Verhalten der MoS_2-Schichten begründen, zu erforschen. Wie das untenstehende Bild zeigt, gilt es die Mechanismen, welche zum Materialabtrag, -auftrag und -transfer sowie Versagen der MoS_2-Schicht führen, genauer zu verstehen. Dazu werden vergleichend zwei unterschiedlich texturierte MoS_2-PVD-Schichten untersucht: ein basal orientiertes und ein wenig texturiertes Schichtsystem. Die grundlegende Charakterisierung der zwei Festschmierstoffschichten, insbesondere deren Reibung- und Verschleißverhalten sowie der Aufbau der Mikrostruktur, werden mit geeigneten Prüfmethoden erfasst. Aus vorhergehenden Forschungsvorhaben ist bekannt, dass die gezielte Einstellung der Mikrostruktur eine deutliche Beeinflussung des tribologischen Verhaltens der Schicht nach sich zieht. Dieser Einfluss ist durch Modellversuche auf einem 2-Scheiben-Prüfstand und Bauteilversuche auf einem Wälzlagerprüfstand unter Vakuumbedingungen zu untersuchen.



Elementarmechanismen im beschichteten Wälzkontakt am Beispiel des Zwei-Scheiben-Versuchs. Die MoS_2-Schicht ist auf der unteren Scheibe anthrazitfarben und in der Dicke stark überhöht dargestellt.

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Ke:mAP - Kopplung einstellungsbasierter und motorischer (Nutzer-)Ansprüche in der Produktentwicklung

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/32-1*
Förderzeitraum	*01.11.2018 bis 31.10.2021*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	T. Schröppel, M.Sc.

In wachsenden internationalen Märkten mit steigender Anzahl verfügbarer Produkte wird es für Unternehmen zunehmend schwieriger Produkte erfolgreich zu platzieren. Um den wachsenden Herausforderungen begegnen und sich positiv von den Wettbewerbern abgrenzen zu können, wird oftmals eine Fokussierung auf den Nutzer als effiziente Differenzierungsmöglichkeit vorgestellt. Eine Berücksichtigung der Bedürfnisse, Fähigkeiten und Wünsche des Nutzers sorgt in der Regel für eine gesteigerte Gebrauchstauglichkeit sowie eine angepasste Funktionalität und sorgt letztlich für ein positives Nutzungserlebnis.

Im Rahmen einer solchen nutzerzentrierten Produktentwicklung werden u. a. physiologische Aspekte der ergonomischen Produktgestaltung berücksichtigt. Hieraus resultiert im Regelfall ein im physiologischen Sinne nutzergerechtes Produkt. Dieses besitzt häufig jedoch ein weniger attraktives Aussehen und stigmatisiert den Nutzer nicht selten negativ. Als logische Konsequenz daraus, werden derartige Produkte trotz ihrer barrierefreien Gestaltung vom Nutzer gemieden. Als Beispiel sei an dieser Stelle ein „Seniorenhandy" genannt, welches primär den physiologischen Anforderungen der Zielgruppe gerecht wird: große Tasten kompensieren bspw. motorische und sensorische Störungen von Senioren, wohingegen eine große Schrift Menschen mit Sehbehinderung unterstützt.

Zudem sind diese Telefone meist sehr robust, leicht und einfach in der Handhabung. Was aus physiologischer Sicht gesehen positiv ist, ist an anderer Stelle problematisch (siehe Bild). Denn die Form und Gestalt des Telefons transportiert die negativ behaftete Aussage: „Der Nutzer dieses Telefons hat physiologische Einschränkungen".

Negative Stigmatisierung durch ergonomische Produktgestaltung

Diese Problematik gilt es durch die ergänzende Berücksichtigung subjektiver Faktoren zu vermeiden. Denn die eigentliche Nutzungsentscheidung ist abhängig davon, ob sich der Nutzer mit dem Produkt und dessen Produktgestalt identifizieren kann oder nicht. Ein gut für den Nutzer ausgelegtes Produkt integriert somit physiologische sowie subjektive Bedürfnisse gleichermaßen. Vielen bestehenden Methoden der nutzerzentrierten Produktentwicklung fehlt es jedoch an einer solch integrativen Betrachtung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird daher eine Methodik entwickelt, die den Produktentwickler hinsichtlich einer frühzeitigen Berücksichtigung individueller physiologischer Leistungsprofile des Nutzers sowie der Integration subjektiver Nutzererwartungen unterstützt. Hierbei werden die persönlichen Einstellungen und physiologischen Fähigkeit der Nutzer mittels sogenannter semantischer Differenziale (gegensätzliche Wortpaare) erfasst. Eine psychologische bzw. physiologische Bewertung relevanter Produktvarianten mittels derselben Befragungstechnik zeigt notwendige Handlungsbedarfe für eine Produktoptimierung auf, wenn diese nicht mit dem Fähigkeitsprofil des Nutzers übereinstimmt. Mit Hilfe der gewonnenen Nutzer- und Produktdaten können letztlich physiologische, psychologische und/oder duale Auswertungen durchgeführt werden, die eine zielgruppenorientierte Produktgestaltung zulassen.

Multikriterielle Bewertung in der Produktentwicklung (MuBePro) – Computerunterstützter Bewertungsprozess von Lösungsvarianten hinsichtlich aller Anforderungen aus dem Produktlebenszyklus

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/33-1*
Förderzeitraum	*01.01.2019 bis 30.06.2021*

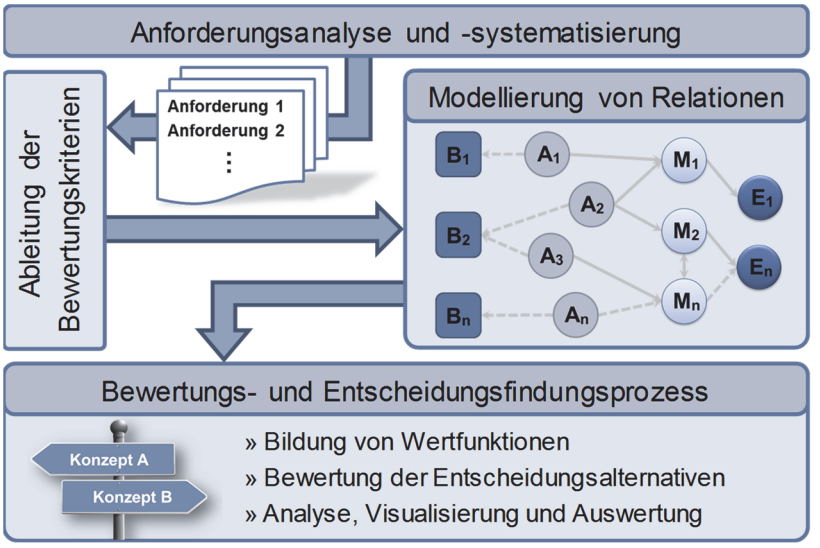
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	D. Horber, M.Sc.

Der Wandel von vorrangig mechanisch geprägten Produktarchitekturen hin zu umfangreichen, mechatronischen Gesamtsystemen zieht eine beständig wachsende Komplexität der Entwicklungsprojekte nach sich. Erschwerend durch die zunehmende Individualisierung aufgrund kundenindividueller Erwartungshaltungen steht der Produktentwickler vor einer bedeutenden Herausforderung, um alle Anforderungen aus dem gesamten Produktlebenszyklus zu berücksichtigen und in dem zu entwickelnden Produkt zu vereinen. Im Allgemeinen dienen Anforderungen als Grundlage für den Produktentwicklungsprozess und übernehmen die Aufgabe die freien Konstruktionsparameter zu steuern, um somit die geforderten Merkmale und damit auch die Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes zu bestimmen.

Des Weiteren stellen Produktanforderungen die Maßgabe für die unterschiedlichen Entscheidungsaufgaben im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses dar. Darunter fallen zum Beispiel Entscheidungen für das zielführendste Konzept, einen ausgearbeiteten Entwurf oder eine konstruierte Produktalternative bzw. -variante.

Die Auswirkungen einer unzureichenden Berücksichtigung relevanter Produktanforderungen führen in erster Linie von einer verminderten bis hin zu einer mangelhaften Qualität des finalen Produktes und im äußersten Fall sogar zum vollständigen Scheitern am Markt. Das Meistern dieser Herausforderung erfordert somit ein zielgerichtetes und methodisch unterstütztes Vorgehen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung einer Vorgehensweise für einen multikriteriellen, computerunterstützten Bewertungsprozess von Lösungsvarianten hinsichtlich aller Anforderungen aus dem Produktlebenszyklus. Ein wesentliches Teilziel ist hierbei die mathematische Beschreibung und Abbildung der verschiedenartigen Relationen zwischen Anforderungen, Produktmerkmalen und -eigenschaften, sowie den für die Entscheidungsfindung relevanten Bewertungskriterien. Ein weiteres Teilziel bildet die methodische Unterstützung des Produktentwicklers durch den Einsatz geeigneter Hilfsmittel zur Analyse und Visualisierung ebendieser relational verknüpften Elemente. Die dadurch aufgeschlüsselten Beziehungen können anschließend durch multiattributive Wertfunktionen abgebildet und als Basis für die multikriterielle Bewertung der Lösungsvarianten herangezogen werden. Mit Hilfe geeigneter Werkzeuge zur Visualisierung und Auswertung können die daraus resultierenden Ergebnisse dem Entscheidungsfindungsprozess als Entscheidungsgrundlage zugeführt werden. Die zu entwickelnde Vorgehensweise erlaubt damit eine zielgerichtete sowie systematische Bewertung und Entscheidungsfindung in den unterschiedlichen Produktentwicklungsphasen.



Modellierung von Relationen als Basis für die Bildung von Wertfunktionen zur Unterstützung der multikriteriellen Bewertung im Rahmen der Entscheidungsfindung.

CAD-Features zur Beschreibung physischer Mensch-Maschine Interaktionen

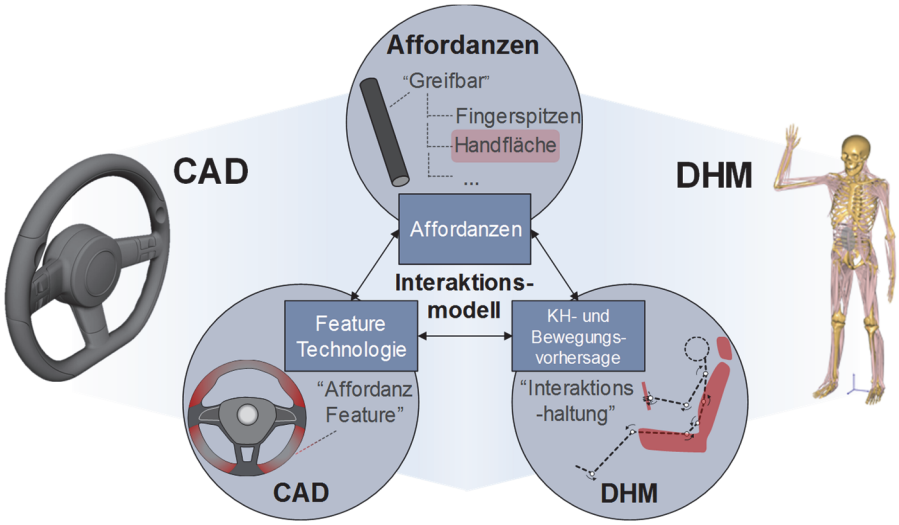
Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
Fördernummer	*WA 2913/31-1*
Förderzeitraum	*01.02.2019 bis 31.07.2021*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	A. Wolf, M. Sc.

Ergonomie, Usability und Komfort gewinnen in der Produktentwicklung zunehmend an Relevanz. Obwohl diese Begriffe vermehrt Einzug in die Lasten- und Pflichtenhefte halten, haben sich die Methoden zur Berücksichtigung von Ergonomie oder Komfort nur wenig weiterentwickelt. Nach wie vor wird sich mehrheitlich auf Nutzertests, Richtlinien oder existierendes Knowhow zur Absicherung diesbezüglicher Anforderungen verlassen. Nutzerzentrierte CAE-Tools werden bisher kaum verwendet. Dies liegt jedoch nicht daran, dass es keine virtuellen Modelle gäbe, die den Menschen (bzw. den Nutzer) abbilden könnten. Anthropometrische oder muskuloskelettale Menschmodelle ermöglichen eine räumlich geometrische Repräsentation sowie biomechanische Simulation des Menschen. Es fehlt in erster Linie an Möglichkeiten zur durchgängigen Modellierung der Interaktionen zwischen Mensch- und Produktmodell.

Aus diesem Grunde wird im Forschungsprojekt „CAD-Features zur Beschreibung physischer Mensch-Maschine Interaktionen" ein Interaktionsmodell entwickelt, welches virtuelle Produktmodelle um Informationen zur physischen Mensch-Maschine Interaktion erweitert und dem Produktentwickler die Möglichkeit gibt, Interaktionsszenarien intuitiv zu modellieren. Als methodisches Gerüst des Modells fungiert das Konzept der Affordanzen.

Dieses beschreibt ein Phänomen, nach welchem mögliche Interaktionen unmittelbar mit der Objektgeometrien verbundenen sind. Elementare Affordanzen sollen methodisch identifiziert und als CAD-Features implementiert werden. Damit können CAD-Modellen ihre entsprechenden Interaktionsmöglichkeiten zugewiesen werden. Aus den dadurch entstandenen Informationen soll mithilfe einer Körperhaltungs- und Bewegungsvorhersage das Interaktionsverhalten des Nutzers mit dem Produkt synthetisiert werden.

Das Interaktionsmodell mit seinen drei Komponenten Affordanzen, Feature Technologie sowie Körperhaltungs- und Bewegungsvorhersage bildet das methodische Framework zur im Projekt angestrebten Integration muskuloskelettaler Menschmodelle in CAD-Systeme (siehe Bild). Dies erfordert eine Kopplung des CAD-Systems mit dem mehrkörperdynamischen System des menschlichen Muskel-Skelett-Systems, welche im Rahmen des Projektes weiterentwickelt und für das CAD-System PTC Creo implementiert wird. Projektziel ist der Prototyp eines neuartigen CAE-Tools zur Absicherung nutzerzentrierter Faktoren bzw. Anforderungen.



Schematische Übersicht des Interaktionsmodells zur Integration digitaler (muskuloskelettaler) Menschmodelle in CAD-Systeme

Gestaltsynthese in der frühen Entwurfsphase (GestEn): Eine rechnerunterstützte Methode zur Modellierung von Vorentwürfe

Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
	WA 2913/34-1
Förderzeitraum	*01.02.2019 bis 31.01.2021*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	J. Harlan, M.Sc

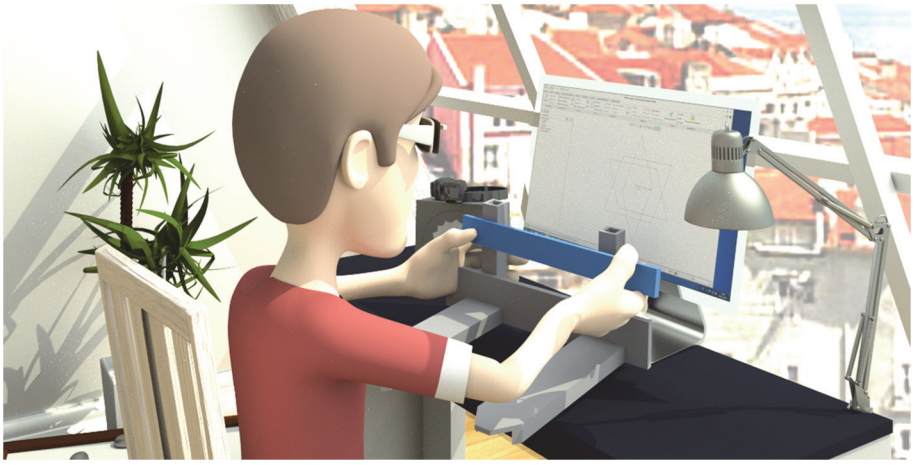
Für die Gestaltsynthese einer neuen Produktidee in der frühen Entwurfsphase werden aktuell hauptsächlich Handskizzen und 3D-CAD-Anwendungen verwendet. Unterschiedliche Aspekte der Nutzung parametrischer 3D-CAD-Anwendungen, wie z. B. das "circumscribed thinking" oder die WIMP-Bedienung, schränken die Kreativität des Produktentwicklers und damit auch den Gestaltungsspielraum für Vorentwürfe ein. Sie stellen somit aktuell kein optimales Werkzeug zur Gestaltsynthese in der frühen Entwurfsphase dar. Gleichzeitig birgt die frühe, rechnerunterstützte Gestaltung von Vorentwürfen jedoch ein hohes Potential für die Verbesserung der Produktqualität. Das Produkt sowie dessen Funktion und Qualität kann im Sinne des Frontloadings früher im Produktentwicklungsprozess abgesichert werden, falls die Geometrie - anders als bei der Verwendung von Handskizzen - in einer für Rechner verarbeitbaren Form vorliegt. Aus dieser Überlegung resultiert die Forschungsfrage dieses Projektes: Wie muss eine rechnerunterstütze Methode beschaffen sein, die den Produktentwickler in der frühen Entwurfsphase bei der kreativen Gestaltung von Geometrie unterstützt?

Ein häufig verfolgter Ansatzpunkt ist die Nutzung natürlicher Interaktionsformen durch Virtual Reality (VR) oder Augmented Reality (AR).

Obwohl einige Forschungsansätze zur Integration von CAD und VR – vor allem zur Erstellung von Freiformflächen – bestehen, wird sowohl der Interaktion durch rein natürliche, auf implizitem menschlichem Wissen basierenden Benutzungsschnittstellen als auch der Gestaltung von Vorentwürfen ausgehend von Wirkflächen und Wirkkörpern nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Daher ist das zentrale Ziel des zweijährigen Forschungsvorhabens, eine durchgängige Methode bereitzustellen, die eine frühere Rechnerunterstützung des Produktentwicklers bei der kreativen Erstellung von Gestaltstudien und Vorentwürfen durch ein funktionales Vorgehen im Sinne des VDI 2221 ermöglicht. Diese Methode enthält einen Baukasten mit Gestaltungselementen, die als Grundbausteine zur Erstellung der Vorentwürfe dienen. Zur Interaktion mit den virtuellen Modellen wird eine Benutzungsschnittstelle für natürliche Finger-Interaktion verwendet, welche am Lehrstuhl entwickelt wurde.

Die wissenschaftliche Erkenntnis, die aus diesem Forschungsvorhaben gezogen werden soll, ist eine Aussage über die Eignung einer rechnerunterstützten Methode zur Gestaltsynthese von Vorentwürfen unter Verwendung natürlicher Interaktionsformen und stereoskopischer Darstellung.



Baukasten zur Gestaltsynthese in der frühen Entwurfsphase

Rückführung fertigungs-, beanspruchungs- und funktionsgerechter Konstruktionsgeometrie aus Ergebnissen der Topologieoptimierung in den Produktentwicklungsprozess

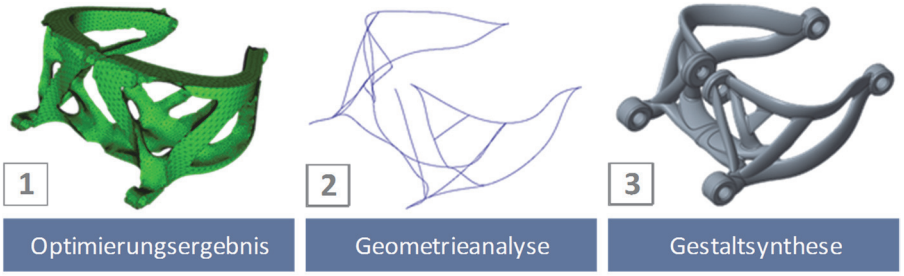
Förderer	*Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*
	WA 2913/36-1
Förderzeitraum	*01.10.2019 bis 01.10.2022*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Johannes Mayer, M.Sc.

Leichtbaumaßnahmen ermöglichen in der modernen Produktentwicklung einen Performancegewinn von Bauteilen sowie eine Kosteneinsparung durch ressourceneffizienten Material- und Methodeneinsatz. Die Topologieoptimierung ist als Werkzeug zur Erzielung von Gewichtseinsparungen sehr gut geeignet.

Doch die Integration dieser Methode in den Produktentwicklungsprozess (PEP) ist nicht ohne weiteren Aufwand möglich. Beim Gestaltfindungsprozess in der Entwurfsphase liefert die Topologieoptimierung einen Designvorschlag in Form einer abstrakten Oberflächenbeschreibung. Dieses Ergebnis kann nicht direkt in ein Bauteil umgesetzt werden kann, sondern erfordert eine Interpretation und eine Rückführung in CAD-Geometrie. Dabei gilt es gleichzeitig, Beanspruchungs-, Fertigungs- und Funktionsgerechtheit des Produkts zu gewährleisten. Diese Aufgabe ist bisher nicht unter Erkennung genereller CAD-Features und Schaffung einer Parametrik automatisiert lösbar. Bestehende Ansätze ermöglichen entweder eine automatisierte Flächenrekonstruktion oder die Erkennung von geometrischen Grundkörpern.

Das Ziel des Forschungsprojektes ist daher die Bereitstellung einer Methode zur automatisierten featurebasierten Rückführung von Konstruktionsgeometrie aus Ergebnissen der Topologieoptimierung in den PEP. Dazu ist eine vollständige Analyse des Optimierungsergebnisses in einer rechnerverarbeitbaren Form notwendig. Auf Basis dieser Analyse muss die Geometrie unter Einbeziehung von Gestaltungs- und Auslegungsregeln rekonstruiert werden. Dazu soll eine Wissensbasis, die gängige Fertigungsverfahren integriert, geschaffen werden. Der neugestaltete Bauteilentwurf liegt in parametrischer und featurebasierter 3D-CAD-Geometrie vor. Die Gestaltsynthese muss automatisiert für generelle Konstruktionsaufgaben funktionieren. Abschließend ist die generalisierte Anwendbarkeit der Methode in einer geeigneten Studie zu prüfen. Am Ende des Projekts steht eine Methode zur Verfügung, die einen ressourceneffizienten Einsatz der Topologieoptimierung im PEP ermöglicht.



Wesentliche Schritte im Restrukturierungsprozess eines Topologioptimierungsergebnisses in einen Bauteilentwurf

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

REAL4HYBRID – Rechnergestützte Auslegung von Fügeverbindungen an Aluminium/CFK-Hybridstrukturen

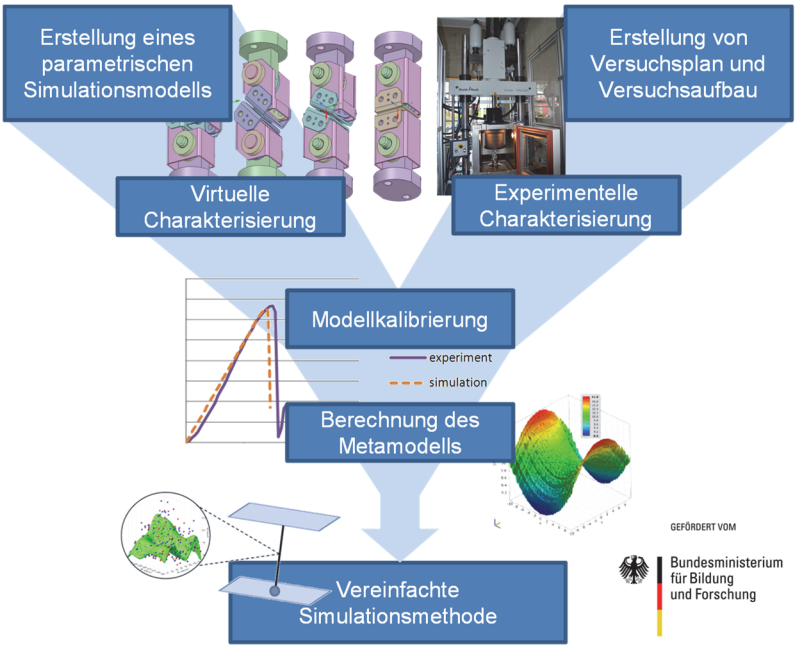
Förderer	*Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*
Fördernummer	*01/S13009*
Förderzeitraum	*01.07.2013 bis 30.09.2015*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	C. Witzgall, M. Sc.

In modernen Leichtbau-Türsystemen im Fahrzeugbau wird zunehmend auf Multi-Material-Strukturen gesetzt, die eine optimale Ausnutzung der jeweiligen Werkstoffeigenschaften erlauben. So kann beispielsweise die sichtbare Türaußenhaut aus Aluminium bestehen, das die Anforderungen an Eigenschaften wie Optik und Oberflächengüte sowie Lackierbarkeit, Korrosions- und Alterungsbeständigkeit bestmöglich erfüllt, während das adhäsiv verbundene Türmodul aus Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen gefertigt wird. Dieser Vorzug bringt jedoch große Herausforderungen bei der Entwicklung mit sich, da die simulative Analyse von Fügeverbindungen besonders für Crashlastfälle sehr modellierungs- und rechenzeitintensiv ist. Daher war die Bereitstellung eines Simulationsverfahrens zur einfachen und schnellen, aber dennoch qualitativ hochwertigen Abbildung von Klebeverbindungen für frühe Produktentwicklungsphasen das Ziel des Konsortiums im BMBF-geförderten Projekt REAL4HYBRID: dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) und den Firmen Brose, CADFEM und Dynardo. Im Rahmen der im Projekt entwickelten Methode wird die aufwendige, detaillierte Abbildung der Klebeverbindung in der Simulation durch für diese Anwendung aufgestellte Metamodelle vereinfacht.

Sie erlauben es, den Zusammenhang zwischen Eingangsparametern wie Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit und der maximal ertragbaren Kontaktkraft der Klebeverbindung kontinuierlich mathematisch zu beschreiben. Die im Metamodell enthaltenen Informationen werden aus einer einmalig aufzustellenden detaillierten Simulation bezogen, die durch eine ausführliche experimentelle Charakterisierung der Klebeverbindungen kalibriert wird. Zur Validierung der Methode werden Seitenaufprallversuche an hybriden Fahrzeugtürstrukturen durchgeführt. Es zeigen sich vergleichbare Simulations- und Testergebnisse beim Versagen der Türstruktur und bei der Eindringtiefe des Pfahls in die Tür.

Mit dem vorgestellten Verfahren kann die Festigkeit und Crashsicherheit der gefügten Strukturen effizienter untersucht werden und mögliche Schwachstellen können früher identifiziert werden. Der Simulationsansatz kann auf weitere als die untersuchten Verbindungsarten angewendet werden, beispielsweise auf Nieten oder Schrauben. Dies qualifiziert die Methode als vielversprechenden Ansatz für die Fahrzeugauslegung der Zukunft.



Ablauf der rechnergestützten Auslegung

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

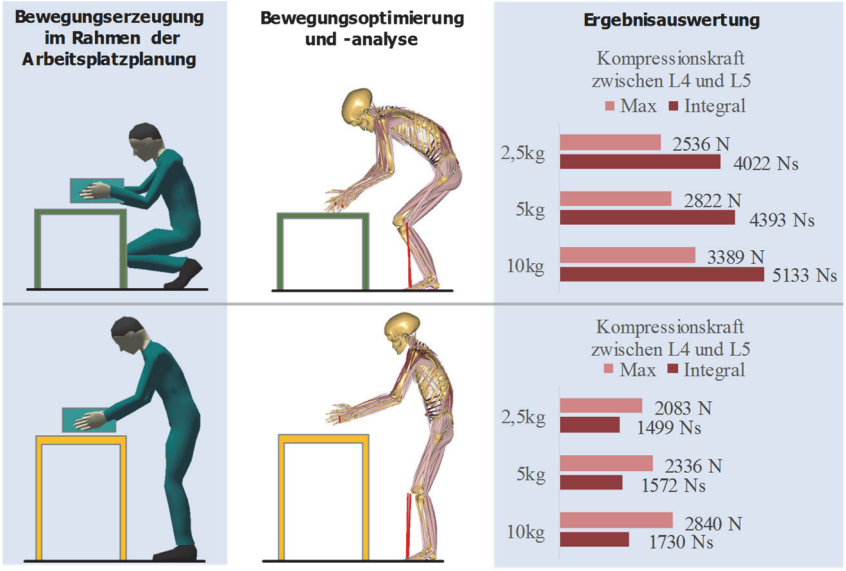
ema2AnyBody – Virtuelles Planen und Bewerten menschlicher Arbeit

Förderer	*Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie*
Fördernummer	*ZF4222603BZ6*
Förderzeitraum	*01.01.2017 bis 30.06.2019*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	A. Wolf, M. Sc.

Projektpartner: CADFEM GmbH, imk automotive GmbH, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Erkrankungen des Muskel- und Skelettsystems verursachen laut des BKK Gesundheitsatlas 2017 fast jeden vierten krankheitsbedingten Arbeitsausfall. Neben dem entstandenen Schaden für den Einzelnen, erwächst aus diesen Ausfällen ein erheblicher volks- und betriebswirtschaftlicher Schaden. Dies wurde von Seiten der Arbeitgeber längst erkannt, weshalb branchenübergreifend verstärkt der Fokus auf eine ergonomische Gestaltung des Arbeitsumfeldes gelegt wird. Dabei werden zunehmend Softwaretools eingesetzt, die eine virtuelle und kostengünstige Planung und Bewertung von Arbeitsplätzen ermöglichen. Der Editor menschlicher Arbeit (ema) ist ein solches Planungstool. Darin wird sowohl die Fabrikumgebung als auch der Mensch virtuell abgebildet. Die Abbildung des Menschen geschieht durch ein arbeitswissenschaftliches Menschmodell, welches selbstständig Bewegungen ausführen kann. Damit bietet der ema die Möglichkeit menschliche Arbeit bereits während der Fertigungsplanung zu simulieren und zu bewerten. Arbeitsplätze und -prozesse können so präventiv optimiert und komplexe Produktionsabläufe frühzeitig effizient und ergonomisch gestalten werden. Neben arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen bestehen sogenannte muskuloskelettale Menschmodelle, welche vor allem auf dem Gebiet der Biomechanik eingesetzt wer-

den, um körperinnere Beanspruchungen für vorgegebene Bewegungen zu berechnen. Diese körperinneren Beanspruchungen können für eine weit differenzierte und direktere Bewertung von Ergonomie genutzt werden, als es mit herkömmlichen Methoden der Fall ist. Aus diesem Grunde wurde das Planungstool ema im Rahmen des staatlich geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekts um das muskuloskelettale Menschmodell des AnyBody Modeling System erweitert. Dazu wurde eine bidirektionale Schnittstelle zwischen den beiden Simulationstools entwickelt, welche den Transfer von Bewegungen und Montagekräften zwischen den beiden Menschmodellen ermöglicht. Ferner wurde ein Verfahren zur automatisierten muskuloskelettalen Simulation der übergebenen Daten entwickelt. Kern dieses Verfahrens ist eine Bewegungsoptimierung, welche die vom ema erzeugten Bewegungen für die muskuloskelettale Analyse aufbereitet. Das unten aufgeführte Bild zeigt am Beispiel einer Hebeverrichtung eine mögliche Anwendung des Verfahrens. Eine Hebebewegung wird für einen konkreten Arbeitsplatz mithilfe des ema erzeugt, an das AnyBody Modeling System übergeben und dort auf das muskuloskelettale Menschmodell aufgebracht. Daraufhin wird der Bewegungsablauf optimiert und analysiert. Damit lassen sich die zu erwartenden biomechanischen Beanspruchungen des Werkers berechnen. Mit diesem Vorgehen kann der Arbeitsplatz iterativ nach ergonomischen Gesichtspunkten optimiert werden.



Vergleich zweier Arbeitsplätze: Heben aus niedriger Position (oben) und hoher Position (unten) bei unterschiedlichen Objektgewichten

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Konstruktionsmethode für Fachwerke auf Basis eines modularen CFK-Baukastensystems und Umsetzung in einem CAE-Werkzeug

Förderer	*Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)*
Fördernummer	*ZF4222610Po8*
Förderzeitraum	*01.04.2018 bis 31.01.2021*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	S. Walbrun, M. Sc.

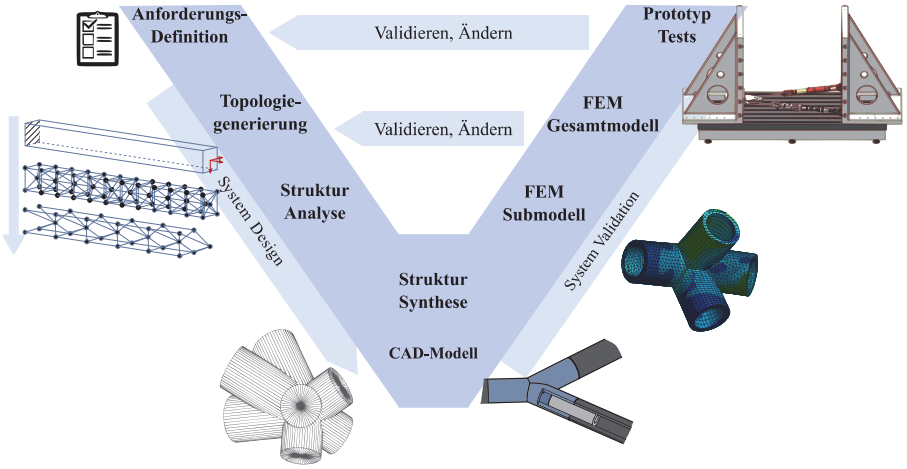
Faserverbundkunststoffe (FVK) haben hervorragende mechanische Eigenschaften wie z. B. eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit sowie eine geringe Dichte bei guten Dämpfungseigenschaften und birgt somit das Potential, Konstruktionen leichter, steifer und vibrationsärmer zu gestallten. Der breiten Anwendung von FKV stehen vor allem die hohen Fertigungs- und Entwicklungskosten von FKV-Bauteilen im Wege. Bei Fachwerken werden die Streben nur mit einem einachsigen Spannungszustand beansprucht, wodurch das Leichtbaupotential von FKV voll ausgeschöpft werden kann, da die Fasern entsprechend der Spannungsrichtung ausgerichtet werden können.

Es wird eine Konstruktionsmethode für die Auslegung von Fachwerken entwickelt, welche auf einem modularen Baukastensystem basiert. Der Baukasten besteht aus standardisierten Streben und Knoten, welche sich zu Fachwerken fügen lassen. Durch die Standardisierung der Streben wird eine Erhöhung der Stückzahlen erreicht, zusätzlich kann das hochproduktive Wickelverfahren für die Fertigung der Hohlprofile angewendet werden, wodurch sich eine deutliche Reduktion der Fertigungskosten ergibt.

Die Senkung der Entwicklungskosten wird durch die Erstellung einer Konstruktionsmethode und deren Umsetzung in einem CAE-Tool erreicht. Die

Konstruktionsmethode reicht von der Definition des Bauraums über die Topologieoptimierung bis zur Validierung der erstellten Konstruktion durch Prototypentests. In der Strukturanalyse werden die Belastungen in der Struktur bestimmt und in der folgenden Struktursynthese wird die Auswahl der Profile für die Streben und Knoten aus dem Baukasten getroffen. Mit den abgeleiteten Parametern lassen sich CAD-Modelle für die Einzelkomponenten und ein Gesamtmodell generieren, welche die Basis einer abschließenden FEM-Analyse sind.

Der Ansatz zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die Kostenreduktion von FKV-Strukturen sowohl im Bereich der Fertigung als auch der Entwicklung forciert wird. Die Standardisierung sorgt für eine Kostenreduktion in der Fertigung und die Konstruktionsmethode ermöglicht die Auslegung von Strukturen auf Basis dieser standardisierten Profile. Durch die Implementierung der Methode in einem CAE-Werkzeug wird die Auslegung zusätzlich automatisiert, beschleunigt und eine optimale Ausnutzung des Leichtbaupotentials erreicht.



Konstruktionsmethode für CFK-Baukasten nach dem V-Modell

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

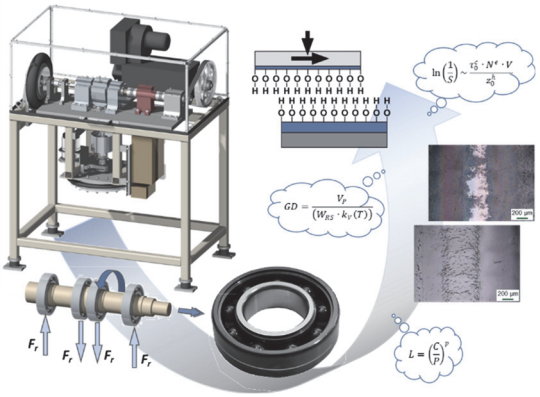
BMWi-POSEIDON II – Energieeffizienz durch Standzeiterhöhung von Lagern unter tribokorrosiven Betriebsbedingungen

Förderer	*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*
Fördernummer	*03ET1477A*
Förderzeitraum	*01.09.2018 bis 31.08.2021*

Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel
	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	J. Kröner, M.Sc.

Im Gesamtprojekt BMWi-Poseidon II liegt der Fokus auf beschichteten Wälzlagern die darüber hinaus nicht „klassisch", sondern mediengeschmiert werden. Ziel der Forschungsarbeiten des Teilprojektes am KTmfk ist eine geeignete Berechnungsmethodik zur Bestimmung der Gebrauchsdauer für solche außergewöhnlichen, zukünftig jedoch immer häufiger anzutreffenden Betriebsbedingungen. Dabei werden grundsätzlich zwei Fälle unterschieden: zum einen das Fehlen eines Schmierstoffs und somit ein Trockenlauf des Lagers und zum anderen das Vorhandensein eines niedrigviskosen Schmiermediums wie beispielsweise Wasser. Im letztgenannten Fall kommt es in der Regel nicht mehr zu einem ausgeprägten hydrodynamisch trennenden Schmierfilm, sondern der Kontakt verbleibt im Misch- oder gar Grenzreibungsregime. Dadurch, und auch im Falle des Trockenlaufs, ist erwartungsgemäß nicht mehr die Tiefenermüdung der ausschlaggebende Faktor für die Lagerlebensdauer, sondern es dominieren andere Schadensmechanismen und ein Verschleißausfall tritt mit zunehmender Wahrscheinlichkeit ein. Um unter diesen Betriebsbedingungen eine längere Gebrauchsdauer zu ermöglichen, werden Elemente der Wälzlager beschichtet. Hierfür werden einerseits tribologisch wirksame Schichtsysteme untersucht, welche die reibungs- und verschleißmindernden Eigenschaften eines Schmierstoffs übernehmen.

Andererseits kommen Korrosionsschutzschichten zum Einsatz, die mit den tribologischen Schichten in Kombination als multifunktionale Mehrlagenschichtsysteme eingesetzt werden können. Für diese Fälle gibt es jedoch aktuell keine allgemeingültige Auslegungsmethode. Ein Ansatz zur Ermittlung der Gebrauchsdauer feststoffgeschmierter, trockenlaufender Wälzlager stammt von BIRKHOFER und KÜMMERLE. Dieser ist jedoch nur ausgelegt für den klassischen Vakuum-Festschmierstoff Molybdändisulfid und hängt von einigen empirischen Eingangsdaten ab, so dass die Anwendbarkeit in der Praxis nicht gegeben ist.



Für das Erreichen des gesetzten Ziels ist die Durchführung von Versuchen eine notwendige Bedingung. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit und der Weiterentwicklung des Ansatzes nach BIRKHOFER für die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Schichtsysteme werden über eine detaillierte Schadensanalyse die zugrundeliegenden Versagensmechanismen identifiziert. Nach Bestimmung der geeignetsten Beschichtungen für den Trockenlauf wird deren Gebrauchsdauer mit weiteren Lebensdauerversuchen statistisch abgesichert. Darüber hinaus wird über Änderungen der Betriebsbedingungen (Drehzahl und Pressung) eine empirisch bestimmte Grenzkurve für die Gebrauchsdauer trockenlaufender Wälzlager aufgestellt. Für die Erstellung der Berechnungsmodelle ist eine ausführliche Literaturanalyse notwendig um ggf. weitere vorhandene Ansätze aufzugreifen und weiter zu entwickeln, da verschiedene Ansätze, je nach Schmiermedium, Schichtsystem und Versagensmechanismus notwendig sein werden. Für Mehrlagenschichtsysteme ist geplant, rechnerisch verschiedene Partialgebrauchsdauern zu ermitteln, wobei die kleinste für die Lagerauslegung ausschlaggebend wäre. Abschließend werden die Berechnungsmodelle mit den Versuchsergebnissen abgeglichen und validiert.

Bayerische Forschungsstiftung

BFS FORPRO²: Effiziente Produkt – und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation

Förderer	*Bayerische Forschungsstiftung (BFS)*
Fördernummer	*AZ-1071-13*
Förderzeitraum	*01.10.2013 bis 16.02.2017*

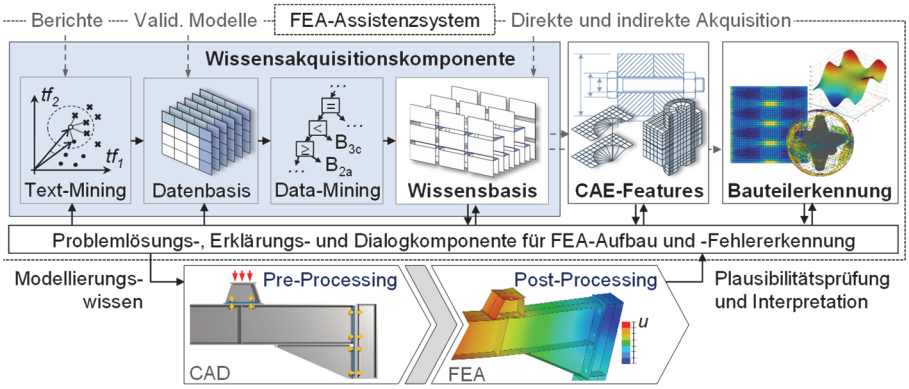
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Dipl. Ing. P. Kestel
	T. Sprügel, M.Sc.

Finite-Elemente-Simulationen werden in der virtuellen Produktentwicklung zunehmend von Benutzern ohne vertieftes FEM-Know-How zur simulativen Absicherung des späteren Produktverhaltens eingesetzt. Dies liegt einerseits in der zunehmenden Benutzerfreundlichkeit der aktuellen FE-Programme begründet, andererseits stehen den Industrieunternehmen nicht ausreichend Berechnungsingenieure zur Verfügung. In dieser Entwicklung liegen sowohl Chancen als auch große Gefahren. In Kooperation mit Industriepartnern wurde daher im Rahmen von FORPRO² durch die beiden Teilprojekt 6 und Teilprojekt 7 am KTmfk ein FEA-Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau (Simulationssynthese) und die wissensbasierte Auswertung (Simulationsanalyse) von strukturmechanischen Simulationen entwickelt, um den Nutzer kontextsensitiv beim Aufbau, bei der Durchführung und der Auswertung von FE-Simulationen zu unterstützen.

Der Aufbau des FEA-Assistenzsystems ist in der Abbildung dargestellt. Es enthält eine Wissensakquisitionskomponente, eine Wissensbasis sowie ein Steuersystem, das sich aus der Problemlösungs-, Erklärungs- und Dialogkomponente zusammensetzt. Durch die Akquisitionskomponente wird zum einen die manuelle Akquisition von Simulationswissen unterstützt, unter anderem durch Experteninterviews.

Diese Akquisitionsprozesse sind jedoch sehr zeitintensiv und Berechnungsingenieure können, aufgrund der hohen Arbeitsauslastung, nur begrenzt für Interviews eingesetzt werden. Daher wurden automatisierte KDD-Prozesse entwickelt und angewendet, um das erforderliche Simulationswissen zu akquirieren. Diese Prozesse dienen dazu, im Unternehmen bereits vorhandene Modelle durchgeführter und validierter Simulationen sowie unstrukturierte, textbasierte Berechnungsberichte zu analysieren. Die Problemlösungskomponente wertet schließlich das zusammengetragene Wissen für gegebene Anwendungsfälle aus und bestimmt geeignete FEA-Modelle durch Inferenzmechanismen.

Darüber hinaus wird die Nachvollziehbarkeit der gefundenen Lösungen über die Erklärungskomponente für den Anwender sichergestellt. Die Dialogkomponente navigiert den Anwender durch den Modellerstellungsprozess im Rahmen des Pre-Processings und unterstützt bei der Interpretation und Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse im Post-Processing. Die Benutzerinteraktion findet jedoch hauptsächlich im Post-Processing in der FEA-Umgebung statt. Da das FEA-Assistenzsystem auf Konstruktionsingenieure zugeschnitten ist und in deren bestehende Arbeitsumgebung integriert wird, erfolgt die Definition berechnungsrelevanter Informationen, wie Lasten und Lagerungen, hauptsächlich im CAD-System.

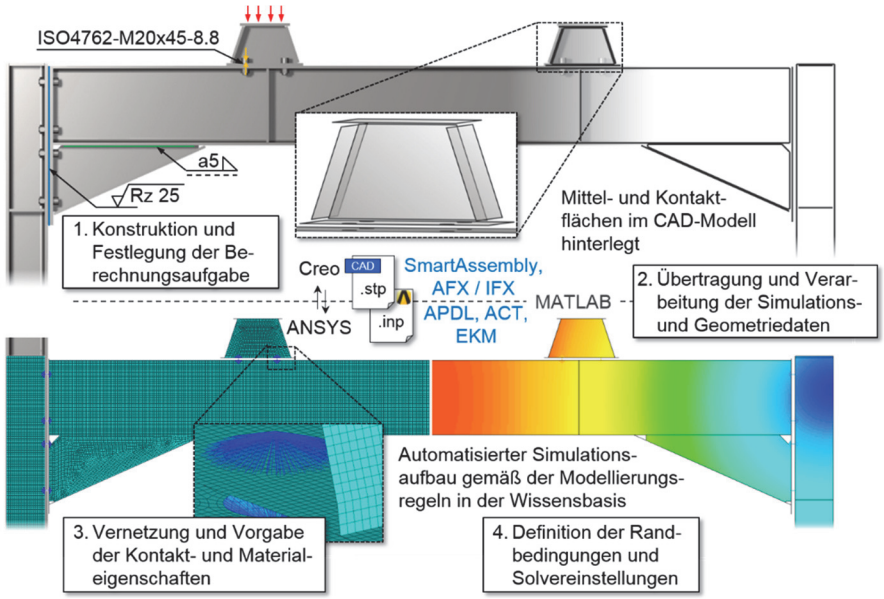


Aufbau des FEA-Assistenzsystems

Hiermit wird eine verbesserte Bedienbarkeit und erhöhte Akzeptanz für das Assistenzsystem sichergestellt. CAE-Features dienen der Kopplung der CAD- und CAE-Systeme sowie zur Verwaltung der erforderlichen Konstruktions- und Simulationsparameter.

Ergänzend zur CAD-Repräsentation eines Bauteils werden wiederkehrende Berechnungsmodelle und -methoden in das durchgängige Produktdatenmodell, in Verbindung mit semantischen Informationen, integriert. Anhand semantischer Informationen wird für Geometrieelemente definiert, um welche Bauteile es sich handelt, beziehungsweise die Lage von Kontaktflächen und relevanten Bereichen festgelegt.

Der wissensbasierte Aufbau strukturmechanischer FE-Simulationen erfolgt automatisiert auf Basis eines CAD-Modells und kann in Abhängigkeit der geforderten Detaillierung vereinfachte oder sehr detaillierte Modelle aufbauen. Vereinfachte Modelle könnten automatisiert aus Mittelflächen inklusive der Berücksichtigung von Verbindungselementen erfolgen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden exemplarisch Verschraubungen und Schweißnähte im FEA-Assistenzsystem abgebildet.



Automatisierter Aufbau von FE-Simulationen auf Basis des CAD-Modells

Ein Beispiel für ein derartiges Modell zeigt die Abbildung mit einem verschraubten und verschweißten Tragwerk aus dünnwandigen Blechbauteilen. Gezeigt ist ebenfalls eine Vereinfachung von Schraubenverbindungen mittels automatisch aufgebauten Balkenspinnen im FE-Modell.

Der Analyseteil FEdelM des Assistenzsystems ermöglicht die kontextsensitive Untersuchung von FE-Simulationen. Der Analyseteil kann einerseits automatisiert aufgebaute FE-Simulationen untersuchen, kann aber auch weniger erfahrenen Produktentwicklern bei der Auswertung und Fehlersuche unterstützen. FEdelM wird durch unterschiedliche Data-Mining Algorithmen bei der Interpretation und Bewertung der Simulationen unterstützt. Ein Modul erlaubt die automatische Bauteilerkennung auf Basis der FE-Netze von Bauteilen mittels Künstlicher Neuronaler Netze. Ein anderes Modul kann mittels bayesschen Wahrscheinlichkeitsnetzen die bedingten Wahrscheinlichkeiten für mögliche Fehler beim Simulationsaufbau berechnen und dadurch dem Nutzer Lösungsvorschläge anbieten. Auch eine Visualisierung von FE-Netzen mit Realgeometrieabweichungen wurde integriert. Die Abbildung zeigt die GUI des Analyseteils FEdelM welches direkt als Plugin aus dem CAD- oder FE-Programm heraus gestartet werden kann.

Bayerische Forschungsstiftung

Pitch it! – Konzeptstudie zu einer neuartigen Rotorblattlagerung für Windenergieanlagen mit individueller Pitch-Regelung

Förderer	*Bayerische Forschungsstiftung (BFS)*
Fördernummer	*AZ–1220–16*
Förderzeitraum	*01.01.2017 bis 30.09.2017*

Projektleiter	Prof. Dr. sc. ETH A. Hasse Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	M. Kapahnke, M.Sc. M. Jüttner, M.Sc.

Im Rahmen dieser Studie wurde die prinzipielle Machbarkeit einer neuartigen Rotorblattlagerung für Windenergieanlagen geprüft. Diese Rotorblattlagerung soll den Einsatz der individuellen Pitch-Regelung (IPC) zur Reduzierung der Ermüdungsbelastung bei höchster Betriebssicherheit und Lebensdauer ermöglichen. Der extensive Einsatz von IPC geht jedoch bislang mit der Unsicherheit möglicher Blattlagerschäden einher. Dieses Problem, das auf kleine Schwenkwinkel bei der IPC zurückzuführen ist, ergibt sich aus den Wälzkontakten, die bei den typischerweise verwendeten Wälzlagern auftreten. Um dieses Problem zu umgehen wird die Verwendung eines Festkörpergelenks vorgeschlagen, das einen bestimmten Bewegungsumfang ausschließlich durch elastische Verformung realisieren kann. Das Konzept sieht eine Kombination eines Festkörpergelenks mit einer konventionellen Lagerung, vorzugsweise einer Gleitlagerung, vor.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Methodik zur Dimensionierung des oben genannten Festkörpergelenks erarbeitet. Hierbei werden zunächst die Belastungen, insbesondere der erforderliche elastische Drehwinkel des Festkörpergelenks, ermittelt.

Anschließend wird ein vielversprechendes Design für das Festkörpergelenk gewählt. Dieses Design wird abschließend an die spezifischen Anforderungen von IPC angepasst.

Durch die Anwendung der beschriebenen Methode wurde erfolgreich ein erstes Konzept der neuartigen Lagereinheit für eine 3-Blatt-Windturbine mit einer Leistung von ca. 3,6 MW entwickelt. Insbesondere der entstandene Gesamtentwurf, als ein wichtiges Ergebnis der Studie, zeigt die prinzipielle Machbarkeit des Konzepts. Abschließend wurden weitere Gestaltungsmöglichkeiten diskutiert, die der Weiterentwicklung des Konzepts dienen können. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und des Gesamtentwurfs wurde für die Konzeptidee der Antrag auf Erteilung eines Patents eingereicht.

Explosionsdarstellung des konzeptionellen Gesamtentwurfs der neuartigen Lagereinheit für eine 3-Blatt-Windturbine

Bayerische Forschungsstiftung

KILL VIB – Reduzierung von Vibrationen und Geräuschemissionen infolge von Käfiginstabilitäten in Wälzlagerungen

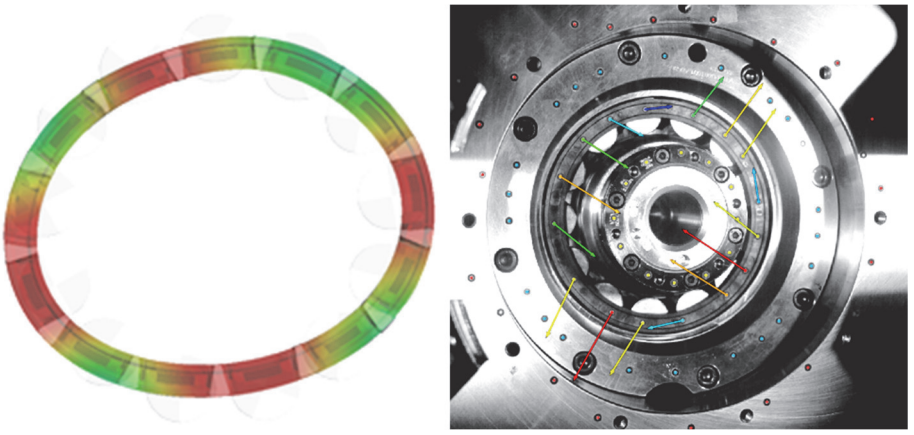
Förderer	*Bayerische Forschungsstiftung (BFS)*
Fördernummer	*AZ-1233-16*
Förderzeitraum	*01.06.2017 bis 30.11.2019*

Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	S. Schwarz, M. Sc.

Käfiginstabilitäten führen in Wälzlagern zu Vibrationen sowie einer erhöhten Geräuschemission und sind daher möglichst zu vermeiden. Kommt es zum Beispiel in den Spindellagerungen von Werkzeugmaschinen zu Vibrationen, können die in der Produktion erforderlichen engen Fertigungsabweichungen nicht mehr eingehalten werden. Führen die Vibrationen zu Lärmemissionen, stellt dies oftmals eine nicht unerhebliche Umweltbelastung dar. So führen Schwingungen in der Lagerung von Ventilatoren, Klimaanlagen oder Computer-Lüftern zu einer erhöhten Geräuschemission und damit zu einer Geräuschbelästigung der Umgebung. Auch im Bereich der Fahrzeugtechnik wird es immer wichtiger, Vibrationen im Wälzlager und die durch Wälzlager hervorgerufene Geräuschentwicklung zu reduzieren. Beispielsweise tritt infolge der Elektrifizierung der Fahrzeuge oder der Miniaturisierung von Aggregaten die Geräuschentwicklung von Lagern gegenüber den bisher die Geräuschemission bestimmenden Komponenten in den Vordergrund. Bisher müssen die kritischen Betriebsbereiche, in denen Vibrationen auftreten, für jedes Wälzlager, den speziellen Anwendungsfall und jeden Betriebszustand anhand kostenintensiver experimenteller Versuche oder validierter Mehrkörpersimulationen ermittelt werden.

Wird insbesondere bei experimentellen Untersuchungen gegen Ende des Produktentwicklungsprozesses die Vibrationsanfälligkeit einer Lagerung festgestellt so bedeutet dies eine größere Iteration im Entwicklungsprozess mit den damit verbundenen Zeitverlusten. Zudem liefert das Versuchsergebnis meist keine Hinweise darauf, inwiefern die Lagerung optimiert werden muss, um die Vibrationsanfälligkeit auszuschließen oder zumindest zu mindern.

Im Rahmen des Projektes werden daher mit Hilfe eines umfangreichen, systematischen Simulationsplans unter Nutzung eines Wälzlager-Mehrkörpersimulationsprogramms physikalisch begründete Kennzahlen und Grenzwerte erarbeitet. Diese sind dazu geeignet, Wälzlager rasch und prädiktiv unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebs- und Umgebungsbedingungen bezüglich ihres Käfigverhaltens zu überprüfen. Zusätzlich werden die rechnerisch bestimmten Kennzahlen und Grenzwerte durch Prüfstandversuche stichpunktartig validiert, indem ein Vergleich zwischen der optisch gemessenen und in der Simulation berechneten Käfigbewegung durchgeführt wird. Zukünftig können die Grenzwerte genutzt werden, um bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung das Käfigverhalten realistisch und rasch einschätzen zu können. Dadurch lassen sich Entwicklungszeiten und -kosten in einer Vielzahl von Anwendungsfällen im Anlagen, Maschinen-, Geräte- und Fahrzeugbau reduzieren und vibrations- und lärmärmere Produkte effizient realisieren.



Deformation eines Kunstoffkäfigs aus Polyamid während einer instabilen Käfigbewegung (links) und optische Messung einer hochdynamischen Käfigbewegung sowie Deformation für den Abgleich mit der Simulation (rechts)

Bayerische Forschungsstiftung

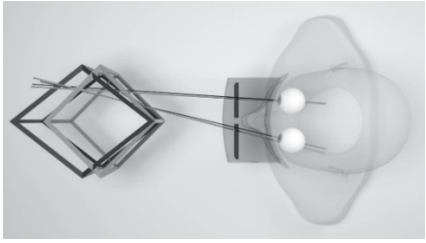
Methoden für die realitätsgetreue visuelle Wahrnehmung durch Eye Tracking im Head Mounted Display

Förderer	*Bayerische Forschungsstiftung (BFS)*
Fördernummer	*AZ-1237-16*
Förderzeitraum	*01.04.2018 bis 31.03.2020*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	B. Gerschütz, M.Sc.

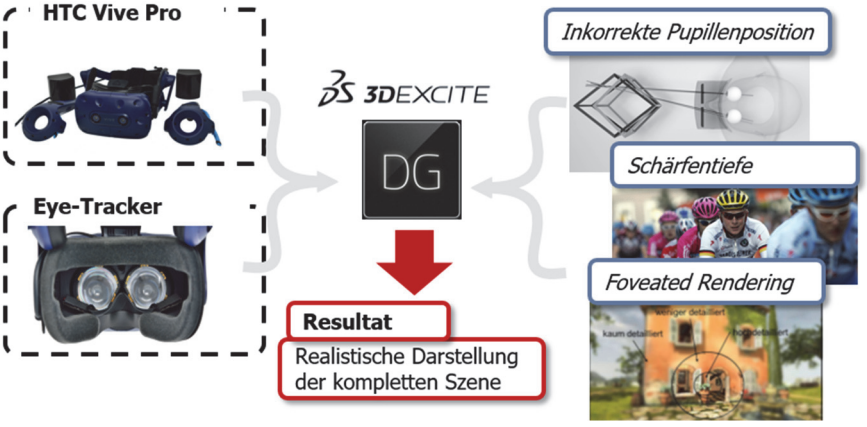
Im Fokus des Forschungsprojekts stehen die Entwicklung und die Evaluierung unterschiedlicher Methoden, die auf Basis moderner Eye-Tracking-Verfahren eine optisch korrekte Ansprache der menschlichen Raumwahrnehmung in Head-Mounted Displays erlauben. Die Bewertung ergonomischer Aspekte eines Produkts ist mit den Methoden der Virtuellen Realität (VR) theoretisch bereits in einer frühen Phase z.B. durch den Einsatz von Head-Mounted-Displays (HMDs) möglich. Jedoch besteht bei der Wahrnehmung von Größe, Distanz und Form eine Diskrepanz zwischen der virtuellen Umgebung und dem realen Modell. Zur Berechnung der Darstellung für die Virtuelle Realität wird bisher lediglich die Lage des Kopfes, jedoch nicht die exakte Pupillenposition herangezogen. Dadurch sind Resultate aus virtuellen Studien, die z.B. die Bewertung der Erreichbarkeit eines Bedienelements zum Ziel haben, nur bedingt belastbar. Die Existenz der angesprochenen Fehlwahrnehmungen wurden zwar in empirischen Studien festgestellt, der Einfluss der Pupillenposition vor dem Display auf die Raumwahrnehmung als Quelle für die Fehlwahrnehmung wurde bisher jedoch kaum untersucht. Zur Bewertung von Bedienkonzepten oder der Raumwirkung eines wird aktuell nach wie vor hauptsächlich auf physische Modelle zurückgegriffen. Ziel ist, bereits in frühen Phasen auf Basis weniger digitaler Daten eine vollständige, virtuelle Bewertung des geplanten Fahrzeugkonzepts durchzuführen.

Da sich die Bewertung eines Bedienkonzepts oder die Raumwirkung nur bedingt an einem Computerarbeitsplatz absichern lassen, würden belastbare Ergebnisse während der Nutzung der Virtuellen Realität einen bedeutenden Vorteil im Entwicklungsprozess bedeuten.



Einfluss der Abweichung der Pupillenposition auf die Wahrnehmung

Im Projekt sind verschiedene Potentiale identifiziert, die eine korrekte Wahrnehmung unterstützen. Zentraler Aspekt ist die Abweichung der Position der Pupillen zu der Position der Kamera zur Berechnung der virtuellen Darstellung. Es soll eine Methode entwickelt werden, um die vom Eye-Tracking-System bestimmte Pupillenposition auf die Kameraposition zu übertragen und so die exakte Perspektive zu berechnen. Die Verzerrung der Optiken hat ebenfalls einen Einfluss auf die Darstellung im HMD. Da die Verzerrung der Optiken für jede Pupillenposition unterschiedlich ist, soll die dargestellte Vorverzerrung deshalb ebenfalls an die aktuelle Pupillenposition angepasst werden. Daneben sollen insbesondere die Aspekte Schärfentiefe und foveated rendering berücksichtig werden. Inwieweit sich die Bewertungsleistung beim Einsatz der entwickelten Methoden, von der beim Einsatz eines realen Modells unterscheidet und wie groß der dadurch erzielte Nutzen ist wird ebenfalls untersucht.



Konzept zur Verbesserung der Darstellung in Head-Mounted-Displays

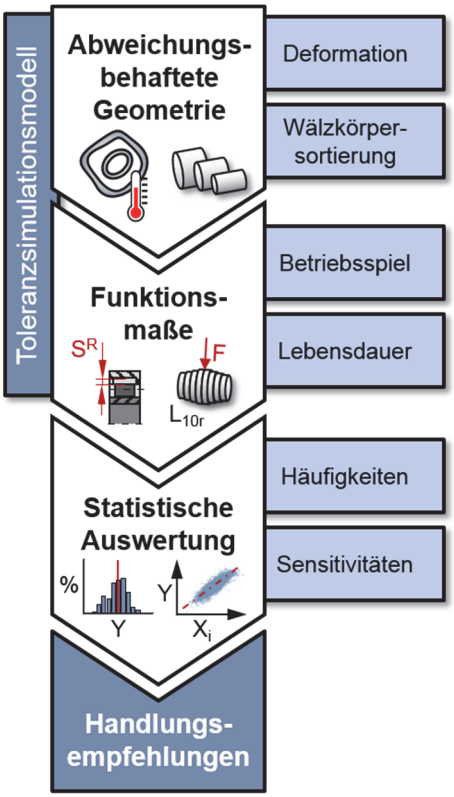
Grundlagen zur Überarbeitung des Wälzlagertoleranzschemas

Förderer	*Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke", über die Forschungsvereinigung Antriebstechnik*
Fördernummer	*AZ-1233-16, FVA 736 I*
Förderzeitraum	*01.11.2014 bis 30.10.2016*

Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	A. Aschenbrenner, M. Sc.

Aufgrund von Schwankungen und Ungenauigkeiten im Herstellungsprozess weicht die Gestalt eines realen Bauteils stets von seiner idealen Gestalt ab. Mithilfe von Toleranzen werden zulässige Abweichungen spezifiziert, für welche Montage, Funktion sowie weitere Qualitätsanforderungen noch gewährleistet sind. Die Vergabe von Toleranzen stellt allerdings einen komplexen Prozess dar, der sich mitunter erheblich auf die Herstellungskosten auswirken kann. Dennoch existieren häufig keine oder nur vergleichsweise allgemeine Empfehlungen, wie ein Bauteil zu tolerieren ist. Im Fall von Wälzlagern und deren Umgebungskomponenten (Welle und Gehäuse) kommt hinzu, dass die aktuell gültigen Toleranzschemata seit mehreren Jahrzehnten nahezu unverändert sind. Ziel des Vorhabens war daher, die aktuell gültigen Toleranzschemata für Wälzlager zu untersuchen, um Handlungsempfehlungen für den effektiven Umgang mit diesen Toleranzschemata sowohl für Wälzlagerhersteller als auch -anwender abzuleiten. Zudem wurden auch Anpassungsmöglichkeiten für die bestehende Normung aufgezeigt. Die Bearbeitung erfolgte hierbei in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Maschinenelement und Getriebetechnik (MEGT) der Technischen Universität Kaiserslautern.

Dort wurden mithilfe von Mehrköpersimulationen Grenzwertbetrachtungen an unterschiedliche Modellfällen durchgeführt. Am KTmfk wurde hingegen ein Toleranzsimulationsmodell entwickelt, mit welchem sich eine statistische Toleranzanalyse an Zylinderrollenlagern durchführen lässt. Die statistische Toleranzsimulation läuft hierbei in drei Schritten ab. Zunächst werden die abweichungsbehaften Einzelkomponenten erzeugt. Eine Besonderheit des erarbeiteten Toleranzsimulationsmodells ist die Berücksichtigung der temperatur- sowie passungsbedingten Deformationen der Lagerringe bei der Geometrieerzeugung. Während die temperaturbedingte Deformation mittels der linearen Wärmedehnung beschrieben wird, wurden für die passungsbedingten Deformationen Ersatzmodelle (sogenannte Metamodelle) mithilfe der Ergebnisse mehrerer hundert FE-Simulationen gebildet. Daneben wurde in die Geometrieerzeugung auch die Durchmessersortierung der Wälzkörper auf Basis der zu erwartenden Lagerluft integriert. Diese führt zu statistischen Abhängigkeiten, welche eine sortenreine Betrachtung in der statistischen Auswertung erforderlich machen. Im zweiten Schritt werden die virtuellen abweichungsbehafteten Lagerkomponenten miteinander kombiniert und die gewünschten Funktionsmaße bestimmt. Diese waren zum einen das Betriebsspiel sowie die Referenzlebensdauer nach DIN 26281. Im letzten Schritt erfolgt die statistische Auswertung der Ergebnisse. Hierbei wurden mehrere Zylinderrollenlagertypen, Lagerluftklassen und Toleranzklassen untersucht. Ausgewertet wurden sowohl die Häufigkeitsverteilungen der beiden Funktionsmaße als auch die Sensitivitäten der Eingangsgrößen. Diese geben Auskunft darüber, welchen Einfluss eine Eingangsgröße (z. B. Wellendurchmesser oder Lageraußendurchmesser) auf ein Funktionsmaß hat.



Ablauf der statistischen Toleranzanalyse für die Ableitung von Handlungsempfehlungen zum Umgang mit aktuellen Toleranzschemata von Wälzlagerungen

Ermüdungslebensdauer von Wälzlagern unter Schwenkbewegungen

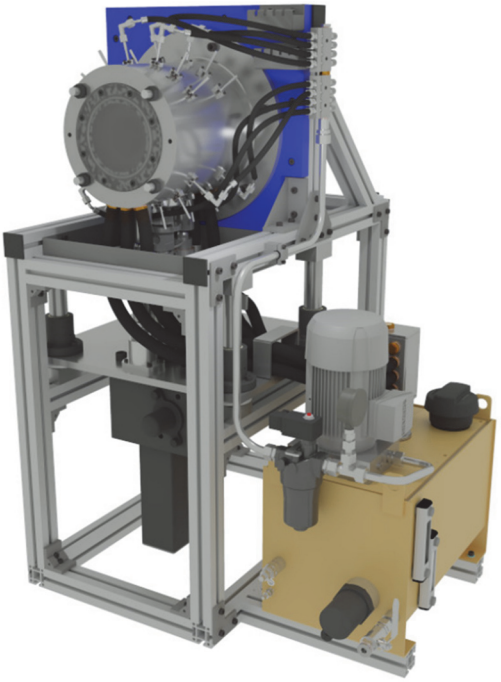
Förderer	*Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke", über die Forschungsvereinigung Antriebstechnik*
Fördernummer	*IGF N02117/17, FVA 824 I*
Förderzeitraum	*01.04.2018 bis 30.09.2020*

Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	F. Halmos, M. Sc.

Wälzlager unter Schwenkbewegungen kommen in einer Vielzahl von Anwendungen vor, ein prominentes Beispiel sind die Rotorblattlagerungen bei Windenergieanlagen. Aber auch in Walzwerken, Pumpen, Robotern, Produktions-, Textil-, Verpackungs- und Sondermaschinen aller Art, in Kopierern und (3D-)Druckern, in der Antriebstechnik, in den unterschiedlichsten Schwenk-, Positioniereinrichtungen und Stellantrieben, in Federbeinlagern sowie in Kardan- und Gleichlaufgelenken sind Schwenkbewegungen zu finden. Jedoch existieren keine validierten Berechnungsmethoden für diesen Anwendungsfall, stattdessen erfolgt in der Regel eine Umrechnung der Schwenkbewegungen in kontinuierliche Umdrehungen. Daher soll in diesem Forschungsvorhaben ein Berechnungsansatz für die Ermüdungslebensdauer unter kleinen Schwenkbewegungen entwickelt werden. Unter „klein" sind Schwenkwege im Bereich von 0,2 x Kontaktellipsenbreite bis 1 x Wälzkörperteilung zu verstehen. Mithilfe experimenteller Untersuchungen sollen grundlegende Phänomene erforscht werden. Eine der entscheidenden Fragestellung ist, inwiefern überhaupt Ermüdung bei kleinen Schwenkwinkeln auftreten kann.

Um die herausfordernden Versuchsbedingungen abbilden zu können, wurde ein spezieller Prüfstand entwickelt, der hochdynamische Schwenkbewegungen zulässt. Der Prüfstand erlaubt das gleichzeitige Testen von vier Versuchslagern bei einstellbarer Belastung, Schwenkbewegungen von wenigen Zehntel Grad bis zu vollen Umdrehungen und einer Schwenkfrequenz von bis zu 25 Hz.

Es werden systematisch mehrere Versuchsreihen durchgeführt, anschließend werden die Lagerschäden analysiert, charakterisiert und statistisch ausgewertet. Darauf aufbauend wird ein Berechnungsansatz formuliert, der das Ermüdungsverhalten von Wälzlagern bei kleinen Schwenkwinkeln korrekt beschreibt.



Übersicht des WSB-Prüfstandes

Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

EFRE E|ASY OPT – Kompetenz- und Analyseprojekt für die „datengetriebene Prozess- und Produktionsoptimierung mittels Data Mining und Big Data"

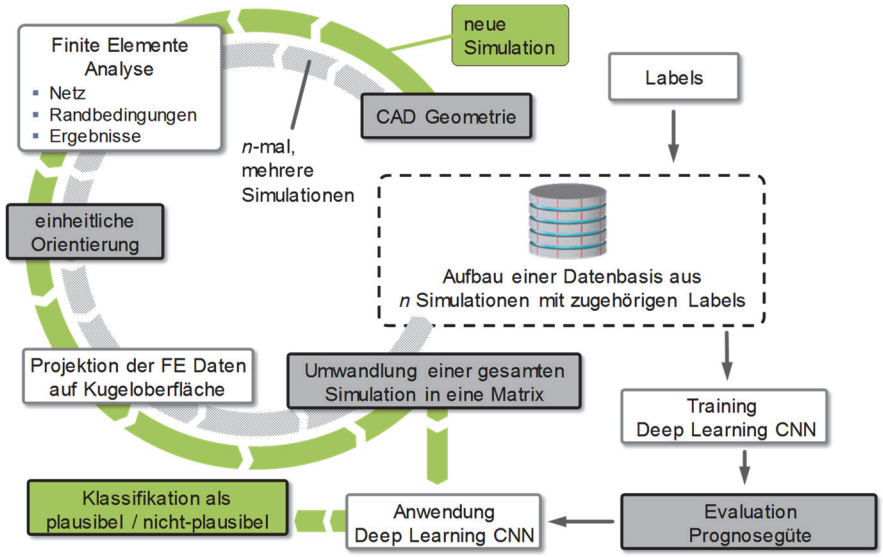
Förderer	*Europäische Union (EFRE)*
Fördernummer	*Az. Nr. 20.2-3410-4-6-3*
Förderzeitraum	*01.01.2017 bis 31.12.2020*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	T. Sprügel, M. Sc. S. Bickel, M. Sc. H. Völkl, M. Sc. Dipl-Ing. T. Rathert

Das volle Potential von verfügbaren Daten wird in Unternehmen kaum genutzt. Dies betrifft Daten aus allen Unternehmensbereichen: Entwicklung, Fertigung, Montage und auch dem späteren Betrieb. Die Gründe hierfür sind vielfältig und reichen von der dezentralen unstrukturierten Ablage und Speicherung bis zu fehlenden Methoden und Software-Werkzeugen. Viele KMUs haben das Potential der Nutzung von Daten erkannt, sind aber ohne erfahrene und systematische Unterstützung nicht in der Lage die entsprechenden Methoden und Werkzeuge auszuwählen und zur Anwendung zu bringen. Im Rahmen des Forschungsprojekts EFRE E|ASY OPT wird durch das Teilprojekt „Vorhersage von Produkteigenschaften mittels Data-Mining-Methoden" untersucht inwieweit Data-Mining-Methoden produktseitig eingesetzt werden können. In sukzessiven Arbeitsschritten sollen folgende Themengebiete im Rahmen von E|ASY OPT durch den KTmfk in enger Kooperation mit den beteiligten Industriepartnern untersucht werden.

Wissensbasierte Produktsimulation: Bereits durchgeführte Produktsimulationen und das in den Daten enthaltene Wissen wird zumeist nicht genutzt, bietet aber erhebliches Potential zur Vermeidung von unnötigen „Fließbandberechnungen" von neuen, ähnlichen Produkten. Ebenso können schnelle Prognosen zur Vorauslegung auf Basis der bereits vorhandenen Daten erstellt werden. Ein Beispiel für die wissensbasierte Produktsimulation ist in dargestellt.

Fertigungsgerechtheiten: Für bestimmte Fertigungsprozesse kann aktuell bereits mittels Data-Mining-Prozessen (z. B. Blechmassiumformung & Gaussprozesse) die Fertigbarkeit und die geometriebedingten Prozesskräfte prognostiziert werden. Dies gilt es auf weitere Fertigungsverfahren (z. B. Additive Fertigung) zu übertragen.

Produktnutzung: Durch die Verknüpfung von auftretenden Beanspruchungen und den zugehörigen Schadensbildern können Produktausfälle frühzeitig erkannt werden oder der Benutzer auf eine Fehlbedienung hingewiesen werden. Es können Produkte generiert werden, welche selbstständig Fehlverhalten erkennen und automatisiert Gegenmaßnahmen einleiten (relevant für komplexe Produkte mit wechselnden unterschiedlichen Nutzern)



Beispielhafte Darstellung des Ablaufs einer wissensbasierten Produktsimulation

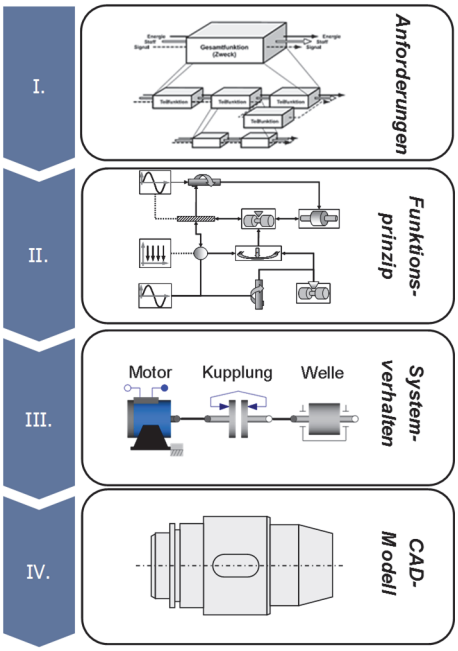
Europäische Union
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

EFRE OptMePro – Optimierungsbasierte Entwurfsmethodik in der frühen Phase der mechatronischen Produktentwicklung

Förderer	*Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)* *Europäische Union, Bayrisches Staats Ministerium* *Kooperierende KMU**
Fördernummer	RMF-SG20-3410-4-11-4
Förderzeitraum	*01.07.2017 bis 31.06.2021*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Dr.-Ing. J. Miehling Dr.-Ing. B. Schleich F. Dworschak, M. Sc. L. Walter, M. Sc. A. Winkler, M. Sc. T. Niering

Die ständige und zunehmend schnellere Veränderung der Marktbedürfnisse erfordert, dass neue Produkte immer effizienter, kostengünstiger, in kürzeren Zeiträumen und im Hinblick auf Industrie 4.0 sogar individualisiert entwickelt werden. Durch die Integration von Elektronik/Elektrik, Mechanik und Software erlaubt der mechatronische Ansatz die Realisierung völlig neuartiger Systemfunktionen auf engstem Raum. Das eröffnet Potenziale für innovative Produkte in allen Bereichen des Lebens, von der Medizin- bis hin zur Automobiltechnik. Der Trend geht dabei zu komplexen Produkten mit einem breiten Funktionsspektrum. Der Wirtschaftsstandort Bayern hat aufgrund seiner mechatronischen Entwicklungskompetenz heute eine sehr gute Position gegenüber anderen Ländern im weltweiten Vergleich.

Um dem internationalen Wettbewerb in Zukunft nicht zu erliegen, müssen die Kompetenzen im Bereich der Analyse und Entwicklung mechatronischer Systeme kontinuierlich ausgebaut und vor allem durch computergestützte Methoden erweitert werden.



Das übergeordnete Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer neuartigen Entwurfsmethodik, mit welcher mechatronische Systeme auf Basis von Modellierung, Simulation und Optimierung automatisiert generiert werden können. Dafür soll ein durchgängiger Produktentwicklungsprozess durch eine Prozesskette mit vier Ebenen abgebildet werden: (I) Erhebung und Abbildung von Anforderungen des technischen Gesamtsystems, (II) Systemmodellierung auf funktionaler Ebene, (III) kaskadierte Entwicklung einer Wirkstruktur auf der logischen Ebene sowie (IV) Entwicklung des virtuellen Produkts auf der domänenspezifischen physikalischen Ebene. Über Parameterschnittstellen werden die verschiedenen Ebenen bidirektional verknüpft, wodurch die Einbindung eines Optimierungsalgorithmus ermöglicht und die Grundlage der automatisierten Entwicklung geschaffen wird. Im besonderem Fokus des Projekts stehen Anpassungskonstruktionen, die nach heutigem Stand der Technik die zeitaufwändigste Tätigkeit eines Konstrukteurs darstellen. Das Projekt EFRE/OptMePro zielt deshalb auf die automatisierte Entwicklung mechatronischer Produkte infolge von kundenspezifischen Änderungen der Produktanforderungen.

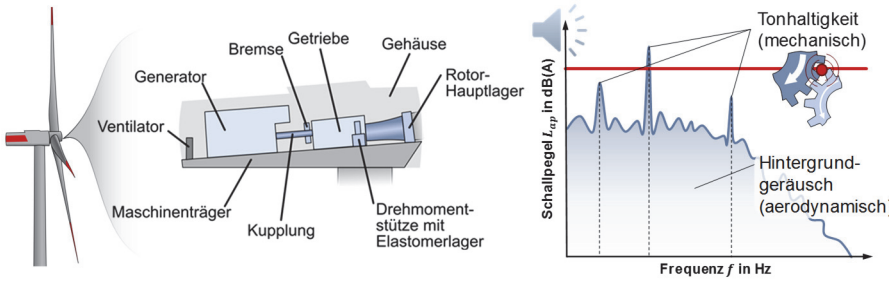
*Kooperiernde KMU:

- db-matik GmbH
- ARCUS Entwicklungs- und Konstruktions-GmbH
- Unimatic Automations-systeme GmbH
- Mühlbauer Maschinen-bau GmbH
- Knoll + Langohr Maschinenbau GmbH
- Ingenieurbüro Zilk Gbr
- Stemplinger GmbH
- Henn GmbH
- Senetics Healthcare Group & Co. KG
- Müssel Maschinenbau GmbH

PRE-Wind – Prognose und Reduzierung der Schallemission von Windenergieanlagen

Förderer	*Zeidler Forschungsstiftung*
Fördernummer	*ZFS-108*
Förderzeitraum	*01.01.2017 bis 31.12.2018*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	Dr.-Ing. B. Schleich
	Dipl.-Ing. C. Küstner

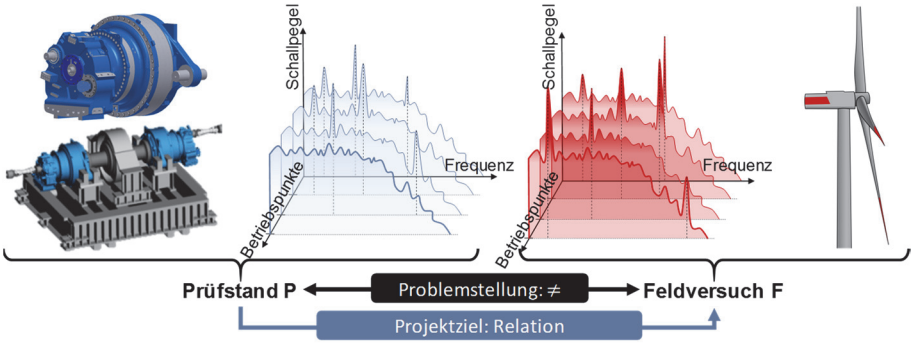
Das akustische Verhalten (Schallemission) nimmt im Abnahmeverfahren einer Windenergieanlage eine Schlüsselrolle ein: Falls im Schallemissionsspektrum einer Windenergieanlage starke Tonhaltigkeiten identifiziert werden, wird die Betriebserlaubnis nicht erteilt. Tonhaltigkeiten sind Spitzen in einem Schallspektrum und werden vom Menschen deutlich als einzelne Töne aus dem Hintergrundgeräusch wahrgenommen.



Eine Windenergieanlage mit wichtigen Komponenten (links) und drei Tonhaltigkeiten in einem Frequenzspektrum (rechts).

Sie gelten in der Psychoakustik als besonders störend, vergleichbar mit einem schrillen Pfeifen oder sonorem Summen. Windenergieanlagenhersteller, Kommunen und Anwohner haben selbstverständlich ein großes Interesse, dass Windenergieanlagen schallemissionsarm betrieben werden.

Die Problemstellung der Produktentwickler besteht bis heute darin, dass Windenergieanlagen, bedingt durch ihre Größe, nicht als Gesamtsystem auf einem Prüfstand getestet werden können. Aus diesem Grund kann das akustische Verhalten der Einzelkomponenten im Zusammenspiel erst nach dem Errichten der Windenergieanlage gemessen werden. Die tonhaltigkeitsverursachenden Einzelkomponenten, wie z. B. das Getriebe oder der Generator, werden deshalb als Prototypen in der Vorserie zum einen auf dem Prüfstand des Herstellers und zum anderen auf einer bestehenden Windenergieanlage getestet (Feldversuch). Durch den unterschiedlichen Aufbau des Prüfstands und der Windenergieanlage im Feldversuch ist das akustische Verhalten der Komponenten im Vergleich unterschiedlich.



Problemstellung und Projektziel

Ziel dieses Projektes war daher die Entwicklung einer neuen Methodik zur Berechnung einer Relation zwischen dem akustischen Verhalten der Serienkomponenten einer Windenergieanlage auf dem Prüfstand (bspw. dem Getriebe) und derselben im Feldversuch. Hiermit werden frühzeitig Schallemission und Tonhaltigkeiten vermieden, den Kommunen die Standortplanung für Windenergieanlagen erleichtert und hierdurch eine nachhaltige Energieerzeugung auf Basis von Windenergie unter Eliminierung der Akustikprobleme ermöglicht.

ZEIDLER
FORSCHUNGS
STIFTUNG

KARSTEN – Kompositauslegung zur Reduktion störender Schwingungen

Förderer	*Zeidler-Forschungsstiftung (ZFS)*
Fördernummer	*ZFS-183*
Förderzeitraum	*01.01.2018 bis 30.06.2019*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	C. Witzgall, M. Sc.

In einer leisen Umgebung empfinden wir selbst Geräusche mittlerer Schallpegel bereits als störend. Im Kontext der Elektromobilität, bei der die im Fahrbetrieb dominierenden Motorgeräusche eines Verbrennungsmotors von leisen, für den Menschen nahezu unhörbaren Elektromotoren abgelöst werden, ergeben sich hieraus ganz neue Herausforderungen für die Fahrzeugentwicklung: neben Roll- und Windgeräuschen, die besonders bei schneller Fahrt auftreten, zeigt sich auch, dass Vibrationen und Klappergeräusche im Insassenraum stärker wahrgenommen werden. Derartige Geräusche können nicht auf der Grundlage zeitlich gemittelter Schalldruckpegel beurteilt werden, denn das menschliche Gehör ist adaptiv und passt sich dem aktuellen Geräuschniveau an, sodass Störgeräusche trotz eines absolut betrachtet geringen Schalldrucks wesentlich die subjektive Wahrnehmung des Fahrzeuginnengeräusches beeinflussen. Im Umfeld der Elektromobilität ist der Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen, beispielsweise CFK, kaum mehr wegzudenken. Besonders deutlich wird dies am Beispiel des BMW i3, dem ersten Serien-Elektrofahrzeug mit einer Fahrgastzelle aus Carbon. Wegen seiner hohen Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte spricht man der Werkstoffklasse für die Zukunft eine weiter zunehmende Rolle in der Elektromobilität zu.

Untersuchungen im Bereich der Zeitfestigkeit zeigen jedoch, dass das Material unter zyklischer Beanspruchung schnell an Steifigkeit verliert. So konnten Steifigkeitsverluste in Größenordnung von 25% bereits bei rund einem Zehntel der maximal ertragbaren Gebrauchsdauer gemessen werden. Ein solcher Verlust von Materialsteifigkeit bringt auch eine Veränderung des Schwing- und Vibrationsverhaltens tragender Teile aus CFK mit sich – beispielsweise eine Verringerung von Eigenfrequenzen. Dies führt zu einer schnelleren und stärker ausgeprägten Bildung störender Klappergeräusche. In der ohnehin anspruchsvollen Auslegung von Faserverbundbauteilen wird in Hinblick auf Vibrationsentwicklung jedoch zumeist nur die Steifigkeit im Neuzustand des Materials herangezogen – eine Lücke, die es zu schließen gilt.

Vordergründiges Ziel des Projekts KARSTEN war daher die Bereitstellung einer Auslegungsmethode, mit der das Schwingverhalten von Strukturbauteilen aus Faserverbundmaterial sowohl im Neu- als auch im gebrauchten Zustand gezielt eingestellt werden kann.

Dies umfasst die folgenden Teilschritte:

- Experimentelle Untersuchung des Steifigkeitsverlusts verschiedener repräsentativer Geometrien über die Gebrauchsdauer
- Simulative Analyse des Einflusses des Steifigkeitsverlusts auf das Schwing- und Vibrationsverhalten auf Bauteilebene
- Ableitung konstruktiver Gestaltungs- und Auslegungsmethoden zur Verringerung schädlicher Einflüsse der Materialalterung auf das akustische Verhalten

Die skizzierten, grundlegenden Forschungsarbeiten werden Automobilbauern und -zulieferern Möglichkeiten und Werkzeuge geben, Strukturbauteile aus Faserverbundmaterial über ihre gesamte Gebrauchsdauer hinweg dahingehend auszulegen, dass die Entwicklung von Störgeräuschen vermindert oder ganz unterbunden wird. Besonders die Attraktivität von Elektrofahrzeugen, bei denen Störgeräusche eine größere Rolle spielen, kann dadurch gesteigert werden, sodass ein weiterer, positiver Beitrag zur zukünftigen Verbreitung der Elektromobilität geleistet wird.

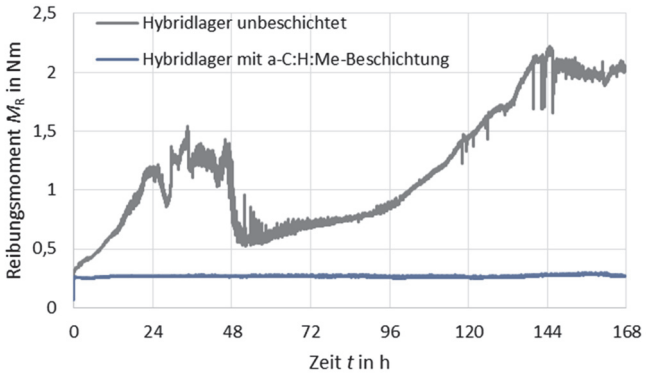
Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst

GreenBearings – Vermeidung konventioneller Schmierstoffe in Wälzlagerungen durch tribologische Schichten und Erhöhung der Gebrauchsdauer trockenlaufender Wälzlager

Förderer	*Green Factory Bavaria, gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst (BayStMWFK)*
Förderzeitraum	*01.08.2013 bis 31.12.2016*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	J. Kröner, M.Sc.

Zu den mit am häufigsten verwendeten Maschinenelementen zählt das Wälzlager, welches in allen industriellen Anwendungsbereichen, in denen Dreh- oder Längsbewegungen ausgeführt werden, zum Einsatz kommt. Die Vielfalt an Lagertypen und Baugrößen von Bohrungsdurchmessern im Millimeterbereich bis hin zu mehreren Metern Außendurchmesser ermöglichen dieses breitgefächerte Einsatzspektrum. Da es zwischen den im Lager miteinander im Kontakt stehenden Körpern unter Relativbewegung zu Reibung und Verschleiß kommt, werden zur Reduzierung dieser meist ungewollten Phänomene Schmierstoffe eingesetzt, die konventionell auf Mineralöl basieren. In vielen technischen Anwendungsbereichen können diese Standard-Schmierstoffe aufgrund von Restriktionen oder physikalische Grenzen allerdings nicht eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind der Einsatz des Lagers in Reinräumen, in der Lebensmittelproduktion, bei extremen Temperaturen oder im Vakuum. Die positiven Eigenschaften des Schmierstoffs zur Reibungs- und Verschleißreduzierung wurden im Rahmen des Projektes mithilfe von tribologisch wirksamen Schichtsystemen realisiert.

Das Gesamtziel des Projektes ist die Erhöhung der Energieeffizienz und der Gebrauchsdauer von Wälzlagern im Trockenlauf mittels geeigneter, tribologisch wirksamer Schichtsysteme. Hierfür wurden zwei unterschiedlich dotierte wasserstoffhaltige amorphe Kohlenstoffschichten (a-C:H:X, a-C:H:Me), eine Graphitschicht und eine titandotierte Molybdändisulfidschicht (MoS_2:Ti) untersucht. Die vier ausgewählten Schichtsysteme wurden auf den Ringen von Rillenkugellagern des Typs 6206 mithilfe von PVD- und PACVD-Prozessen appliziert. Als Gegenkörpermaterialien wurden Kugeln aus einem Standardwälzlagerstahl (100Cr6) sowie aus Siliziumnitrid-Keramik (Si_3N_4) eingesetzt. Ergänzt wurden die wissenschaftlichen Arbeiten in der zweiten Phase durch die Beschichtung der Wälzkörper und anschließender Versuche im Schicht/Schicht-Kontakt. Über Bauteilversuche auf einem Vier-Lager-Prüfstand zur Messung der Wälzlagerreibung wurde die Eignung der Schichtsysteme unter realitätsnahen Betriebsbedingungen überprüft. Im Rahmen einer tiefergehenden Schadensanalyse wurden anschließend die Verschleiß- und Schädigungserscheinungsformen analysiert, um hierüber Rückschlüsse auf die Verschleiß- und Versagensmechanismen zu erhalten.



Gesamtreibungsmomentverläufe M_R eines Prüflaufes eines unbeschichteten, ungeschmierten, ungedichteten Hybridlagers mit Ringen aus 100Cr6 und Kugeln aus Si_3N_4 im Vergleich zu einem Prüflauf mit a-C:H:Me-beschichteten Ringen und Kugeln.

Das Ziel einer signifikanten Reibungsminderung sowie einer Gebrauchsdauererhöhung im Trockenlauf konnte mithilfe der a-C:H:Me-Schicht im „Selbstkonktakt" mit beschichteten Kugeln erreicht werden. Die Abbildung zeigt einen exemplarischen Reibungsmomentverlauf der Schicht/ Schicht-Versuchsreihe im Vergleich zum Verlauf eines Referenzlagers, das einem baugleichen, unbeschichteten, ungeschmierten und ungedichteten Hybridlager entspricht. Die über die gesamte Dauer geleistete Reibungsarbeit ist bei dem Versuchslauf mit beschichteten Lagern um 75 % niedriger.

SCHAEFFLER

Reibungspotential von Wälzlagern unter Zentripetalbeschleunigung

Förderer	*Schaeffler Technologies AG*
Förderzeitraum	*01.03.2012 bis 01.10.2020*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	Dr.-Ing. K. Heider Dipl.-Ing. (FH) D. Hochrein, T. Summ, M.Sc. V. Kramer, M. Sc.

Wälzlagerungen stellen in der Regel in Bezug auf reibungsbehaftete Lagerstellen das Optimum dar. Sie bieten aber auch heute noch erhebliches Potential, Energieverluste in Form von Reibung zu minimieren. Insbesondere ist dies der Fall, wenn sie extremen Betriebsbedingungen wie hohen Zentripetalbeschleunigungen, etwa in Planetenradgetrieben oder Pleueln, ausgesetzt sind.

Im Rahmen dieses Projektes werden daher sowohl experimentell, als auch durch modernste Simulationsmethoden die Einflussgrößen auf das Reibungsverhalten solcher Lager untersucht. Zu diesem Zweck wurde hochspezialisierte Wälzlagerschleuderprüfstand WSP entwickelt und gebaut sowie das Mehrkörpersimulationsprogramm CABA3D der Schaeffler Gruppe gemeinsam mit dem Industriepartner methodisch weiterentwickelt.

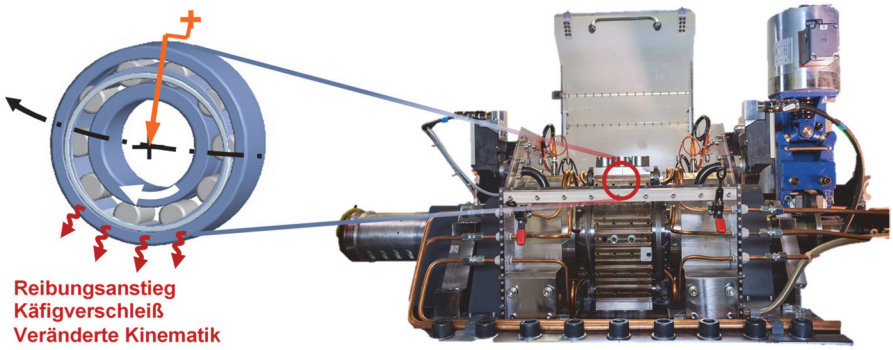
Für die Simulationsmethoden wurde zum einen die bestehende Reibungsberechnung um die im Lager auftretenden, hydrodynamisch geschmierten Kontakte erweitert. Vor allem bei Wälzlagern, die hohen Zentripetalbeschleunigungen ausgesetzt sind, zeigen diese Kontakte, etwa zwischen Käfig und

Ring, einen hohen Einfluss auf das Reibungsmoment und müssen daher sehr detailliert abgebildet werden. Die erweiterte Berechnungsmethode beinhaltet die Bestimmung der Normal-, Reibungs- und Dämpfungskräfte. Zum anderen tritt unter Zentripetalbeschleunigung eine wesentliche Verformung des bordgeführten Käfigs auf. Um die Käfigverformung zu berücksichtigen, wurde das Mehrkörpersimulationsprogramm um ein Modell des elastischen Käfigs erweitert. Die resultierende Schmiegung des Käfigs an den Lageraußenring wird somit realistisch abgebildet.

Im Experiment werden die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter wie Zentripetalbeschleunigung, Drehzahl, usw. auf die Wälzlagerreibung identifiziert. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung werden die relevanten Haupteinflussfaktoren sowie die Wechselwirkungen der Parameter untereinander analysiert. Hierbei werden insbesondere auch Parameter wie die Schmierstoffmenge berücksichtigt, die in der Simulation nur näherungsweise abgebildet werden können.

Anschließend findet eine Validierung der gemessenen Daten mit den berechneten Ergebnissen aus dem Simulationsmodell statt. So kann künftig eine detaillierte Berechnung des zu erwartenden Reibungsmomentes und somit eine fundierte Aussage möglicher energetischer Einsparpotentiale durchgeführt werden.

Dank einer weiterführenden Ausbaustufe des Prüfstandes lassen sich die Reibungsmomente der Lager mit und ohne Zentripetalbeschleunigung direkt miteinander vergleichen und der Einfluss der Beschleunigung kann eindeutig bestimmt werden.



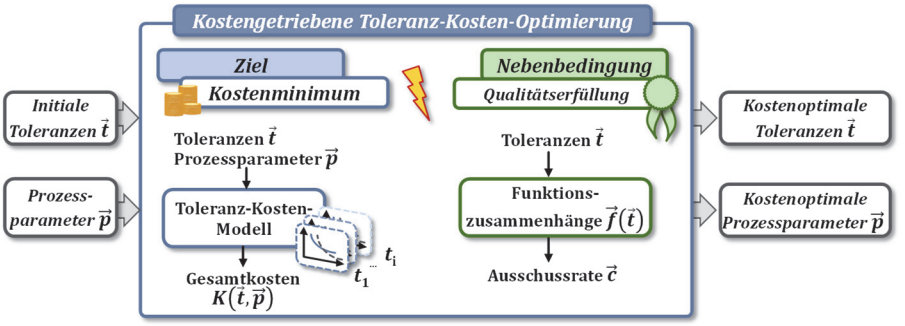
Lagerbelastung unter Zentripetalbeschleunigung und Wälzlagerschleuderprüfstand WSP

Entwicklung eines softwarebasierten Toleranz-Kosten-Optimierungstools

Förderer	*Robert Bosch GmbH*
Förderzeitraum	*01.05.2017 bis 30.11.2017*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack Dr.-Ing. B. Schleich
Bearbeiter	B. Heling, M. Sc.

Hohe Qualitätsanforderungen, steigender Kundendruck und zunehmender internationaler Wettbewerb setzen Industrieunternehmen mehr denn je unter enormen Kosten- und Qualitätsdruck. In diesem Kontext ist die Produktentwicklung stets einem Zielkonflikt ausgesetzt: Während zu weit gewählte Toleranzen die Funktionserfüllung nicht gewährleisten können, haben zu eng gewählte Toleranzen hohe Fertigungs- und Prüfkosten zur Folge. Um diesen Konflikt zu lösen, ist der Einsatz iterativer, statistischer Toleranzanalysen in Kombination mit Beitragsleisteranalysen in der Industrie üblich. Zwar fließt dabei der Kostenaspekt indirekt über den qualitativen Grundsatz „Toleranzen so eng wie nötig, so weit wie möglich zu wählen" ein, eine quantitative Be-rücksichtigung bleibt auf diese Weise jedoch aus. Die Methode der kostenge-triebenen Toleranz-Kosten-Optimierung hingegen lässt eine qualitäts- und kostenangepasste Toleranzvergabe zu. Dabei werden die initialen Toleranz-werte so angepasst, dass ein Kostenminimum bei gleichzeitiger Erfüllung der Qualitätsanforderungen erzielt wird. Als Zielfunktion dient dabei ein Toleranz-Kosten-Modell zur Abbildung der Gesamtkosten als Summe der Einzelkosten je Toleranz, die sich über geeignete Toleranz-Kosten-Kurven beschreiben las-sen. Zur Beurteilung geforderter Qualitätskriterien, wie z. B. Funktion, Ästhe-tik oder auch Bauteilsteifigkeit, werden vorab definierte Funktionszusammenhänge für das technische System mit Hilfe von Stichprobenverfahren analysiert und die Ausschussrate über geeignete Schätzverfahren ermittelt.

Neben Toleranzen können dabei zusätzlich Fertigungsprozessparameter, wie z. B. Drehzahlen und Vorschub, im selben Optimierungsprozess kostenminimal festgelegt werden. Um den Produktentwickler bei der Toleranzvergabe zu unterstützen wurde in diesem Projekt in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH ein anwenderfreundliches Toleranz-Kosten-Optimierungswerkzeug entwickelt und implementiert. Dieses Tool ermöglicht es auf Basis verschiedener Toleranz-Kosten-Zusammenhänge und unterschiedlicher Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der zugrunde gelegten geometrischen Toleranzen die optimale Bauteiltolerierung zu bestimmen. Bei diesem Prozess können nicht nur geometrische Toleranzen, sondern auch Prozessparameter, die sich auf geometrische Größen auswirken, berücksichtigt werden. Beim Optimierungsprozess können zusätzlich unterschiedliche Randbedingungen, wie beispielsweise definierte Ausschussraten, berücksichtigt werden, sodass geforderte Qualitätsziele sichergestellt werden. Dazu wird ausgehend von einer Konstellation an Einzelteiltoleranzen der Funktionszusammenhang und die Ausschussrate bestimmt, wobei unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bauteiltoleranzen durch eine statistische Toleranzanalyse abgebildet werden. Nach Abschluss der Toleranz-Kosten-Optimierung werden dem Anwender zum einen ideale Bauteiltoleranzen und zum anderen ideale Prozessparameter bereitgestellt, sodass konkrete Handlungsempfehlungen für die Fertigung abgeleitet werden können.

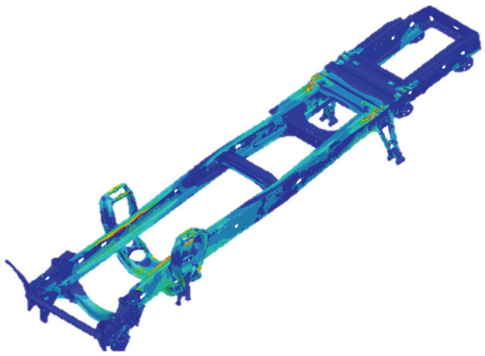


Zielsetzung und Vorgehen bei der Toleranz-Kosten-Optimierung

Virtueller Rahmenprüfstand für die Auslegung eines LKW-Rahmens

Förderer	*MAN Truck & Bus SE*
Förderzeitraum	*01.06.2017 bis 31.05.2020*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	T. Hufnagel, M. Sc.

Nutzfahrzeuge werden in vielfältigen Einsätzen gefahren, was auch eine große Varianz der Fahrzeugtypen mit sich bringt. Die Auslegung der nötigen Betriebsfestigkeit des LKW Rahmens, der mit den dazugehörigen Komponenten das zentrale tragende Element des Fahrzeugs darstellt, ist daher eine herausfordernde Aufgabe für die Produktentwickler. Nach aktuellem Stand erfolgt während des Entwicklungsprozesses eine simulationsgestützte Bewertung des Chassis anhand von Spannungen, die durch statische Ersatzlastfälle hervorgerufen werden. Die finale Erprobung der Lebensdauer aller Komponenten des LKW erfolgt in Hardwareversuchen, über welche die Betriebsfestigkeit der Fahrzeuge bis zu harten Einsätzen, bspw. im Baustellenbetrieb, abgesichert wird. In einem Gesamtfahrzeugprüfprogramm werden verschiedene Abschnitte aus Schlechtweg und dynamischen Fahrmanövern zu einem Testzyklus zusammengesetzt. So können in komprimierter Form die Lasten der gesamten Fahrzeuglebensdauer abgebildet werden.

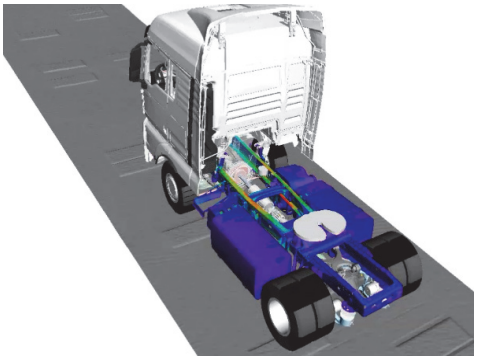


Spannungsverteilung am Rahmenmodell für einen statischen Ersatzlastfall

Das Versagen von Bauteilen in dieser Phase hat lange Iterationen in der Entwicklung zur Folge. Generell ist die Absicherung im Gesamtfahrzeugversuch mit hohen Kosten und Zeitaufwänden verbunden, weshalb die Erprobung nur für einige Fahrzeugkonfigurationen und Einsatzklassen erfolgt. Innerhalb einer Baureihe orientiert sich die entsprechende Einsatzklasse an dem Fahrzeug mit dem härtesten Einsatz. Dies führt bei Fahrzeugen mit leichten Einsatzhärten zu einer Übererfüllung der Lebensdauer und lässt Leichtbaupotentiale ungenutzt.

Durch den verstärkten Einsatz verlässlicher Simulationen zu Beginn des Entwicklungsprozesses können Entwicklungszyklen verkürzt und Versuchskosten gesenkt werden, da die Anzahl der Testfahrten und Prototypen reduziert werden kann. Des Weiteren wird die Auslegung nach spezifischen Einsatzhärten klassifiziert, um vor allem bei leichten Einsätzen die Leichtbaupotentiale gezielt auszuschöpfen.

Ziel des Projektes ist es daher eine Methode zu entwickeln, mit der realistische und einsatzspezifische Lasten virtuell abgebildet werden können. Hierzu wird eine Kombination von Finite-Element (FE) -Simulation, Mehrkörpersimulation (MKS) und dem experimentellen Versuch verwendet. Um realitätsnahe Lastkollektive zu generieren wird ein MKS-Modell genutzt, das durch ein flexibles FE-Modell des Rahmens erweitert wird. Die einzelnen Streckenabschnitte des Schlechtweges liegen ebenfalls digitalisiert vor und werden virtuell mit dem hybriden Simulationsmodell abgefahren. Dies ermöglicht den Vergleich der Fahrmanöver aus dem Versuch mit der virtuellen Methode und auch durch Kombination der einzelnen Abschnitte die simulative Abbildung des gesamten Testzyklus aus dem realen Fahrzeugversuch. Aus diesen validierten Lastdaten werden die für den Rahmen schädigungsrelevanten Lasten ermittelt und synthetische Lastkollektive abgeleitet. Die abgeleiteten Kollektive dienen als Eingangsparameter für einen virtuellen Prüfstand, mit dem der Rahmen und die entsprechenden Komponenten einzeln geprüft werden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine schnelle und verlässliche Bewertung der Rahmenstruktur hinsichtlich der einsatzspezifischen Lebensdauer zu Beginn des Entwicklungsprozesses.



Auftretende Spannungen am flexiblen Rahmenmodell bei Überfahrt der virtuellen Teststrecke

SCHAEFFLER

Angular Roller Unit – Auslegungsgrundlagen und konstruktive Weiterentwicklung

Förderer	*Schaeffler Technologies AG & Co. KG*
Förderzeitraum	*01.09.2017 bis 30.09.2020*
Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	S. Wirsching, M.Sc.

Im Antriebsstrang wird eine Vielzahl an Wälzlagern verwendet. Die Optimierung der Lageranordnung und Wälzlager bezüglich der Verringerung der Reibung bietet ein großes Potential zur Effizienzsteigerung. Dies kann unter anderem mit innovativen Lagerkonzepten erreicht werden.

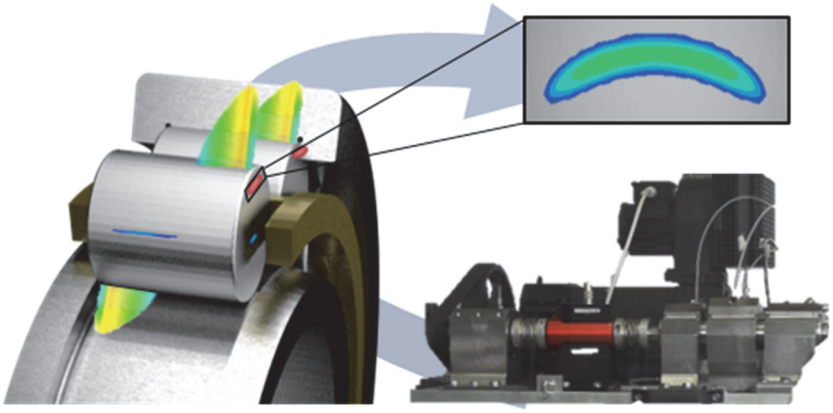
Die Angular Roller Unit (ARU) basiert auf einem Kegelrollenlager und besteht aus einem massiven Innen- und Außenring mit jeweils einem großen Bord, Kegelrollen und einem Schnappkäfig. Die Borde liegen hier diagonal gegenüber. Im Gegensatz zum Kegelrollenlager kann ein einzelnes ARU als Festlager für beide axiale Lastrichtungen eingesetzt werden. Im Vergleich zu Rillenkugellagern weist sie eine höhere Tragfähigkeit oder eine längere nominelle Lebensdauer bei gleichem Bauraum auf. Gegenüber gleich großen Zylinderrollenlagern und Kegelrollenlagern zeichnet sich die ARU durch geringere Reibung aus, ähnlich der gleichgroßer Rillenkugellager. In zukünftigen Einsatzgebieten, wie Getriebelagerungen ist mit der ARU ein Downsizing und damit eine Reduzierung des Energieverbrauchs möglich. Im Rahmen des Projekts soll die Geometrie der ARU bezüglich Reduzierung der Reibung und Erhöhung der axialen Tragfähigkeit optimiert werden. Dazu wird zunächst ein Berechnungsmodell zur besseren Beschreibung der Pressung an den Bordkontakten der ARU entwickelt.

Dieses Modell wird in das zentrale Berechnungsprogramm BEARINX der SCHAEFFLER Gruppe implementiert.

Durch die einzigartige Lagerbauform bestimmen diese Bordkontakte der ARU maßgeblich die entstehende Reibungsleistung, die Lagertragfähigkeit beziehungsweise axiale Belastbarkeit in Vorzugslastrichtung und in Nicht-Vorzugslastrichtung. Daher muss zusätzlich die Elastohydrodynamik (EHD) berücksichtigt werden, um den Schmierfilmaufbau und damit die Reibung zwischen Wälzkörperstirn und Ringbord genauer beschreiben zu können.

Um die Berechnungsmethode für die Reibungsberechnung verwenden zu können, muss diese validiert werden. Hierfür werden Versuche für repräsentative Lastfälle zur Bestimmung der Reibung am Wälzlagerreibungsprüfstand (WRP) durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen abgeglichen. Vor allem soll die axiale Belastbarkeit in Vorzugslastrichtung sowie in Nicht-Vorzugslastrichtung der ARU untersucht werden.

Aufbauend auf dem verbesserten Bordkontaktmodell und den gewonnenen Erkenntnissen zur Schmierung können die Geometrien der Wälzkörperstirnfläche und des Ringbordes für repräsentative Lastfälle optimiert werden. Ziel ist es, die Reibung zu verringern und Tragfähigkeit zu erhöhen. Ein Prototyp der ARU mit optimierter Bordkontaktgeometrie wird bezüglich ihres Reibungsmoments und der axialen Belastbarkeit in Vorzugslastrichtung und in Nicht-Vorzugslastrichtung am WRP getestet. Die Ergebnisse können wiederum mit den Simulationen abgeglichen werden.



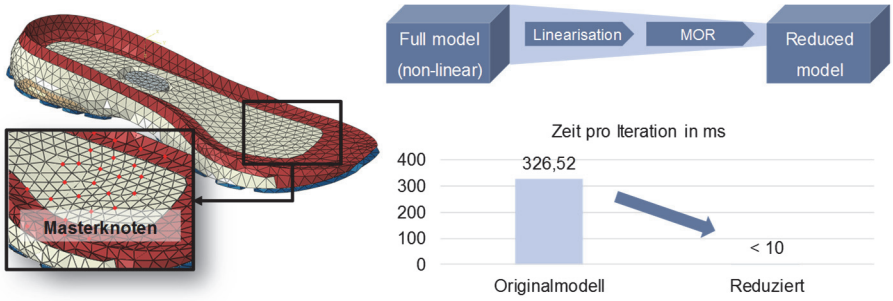
Untersuchung der Kontakte in der Simulation und deren Auswirkung auf das Reibungsmoment

FEA model order reduction to include footwear in predictive simulations of human gait

Förderer	*Adidas AG*
Förderzeitraum	*01.02.2017 bis 31.05.2017, 15.10.2018 bis 15.02.2019*
Projektleiter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter	H. Völkl, M.Sc.

Laufschuhe mit speziell angepasster Mittelsohle ermöglichen eine gezielte Einstellung von Steifigkeit und Dämpfung, um beispielsweise energieeffizientes oder schonendes Laufen zu ermöglichen. Entwicklung und Test solcher High-Tech-Schuhe sind jedoch zeitaufwändig, da Auswirkungen von Änderungen, z. B. von Material oder Geometrie, durch reale Versuche an Probanden erprobt werden müssen.

Die virtuelle Produktentwicklung erlaubt dagegen ein effizientes und kostengünstiges „virtuelles Testing", indem FE-Modelle der Schuhe an Menschmodelle (Mehrkörpersimulation) angebunden werden. Diese Mehrkörpersimulationen weisen eine hohe Anzahl an Variablen auf und werden üblicherweise mit nichtlinearen Solvern gelöst. Der Einbau der FE-Schuhmodelle erhöht diese Variablen- und Randbedingungsanzahl weiter und erschwert die Konvergenz. Ein Einbau mit „üblich" feiner Vernetzung mit mehreren 1.000 bis 100.000 Knoten und der entsprechend hohen Anzahl an Freiheitsgraden ist daher nicht direkt möglich. Abhilfe verschaffen Verfahren zur Modellordnungsreduktion (MOR).



Modellordnungsreduktion von FE-Schuhmodellen

MOR-Verfahren wie die statische GUYAN-Reduktion erlauben eine Verringerung der Anzahl an Freiheitsgraden und nähern dabei das strukturmechanische Verhalten des Originalmodells an. Das bekannte GUYAN-Verfahren eignet sich dabei vorrangig für statische Reduktion ohne starke dynamische Effekte und verliert mit zunehmender Dynamik an Genauigkeit. Daher wurden dessen Erweiterung, das CRAIG-BAMPTON-Verfahren implementiert. Dieses erlaubt eine bessere Abbildung von Dämpfungs- und Trägheitseffekten durch (einstellbare) Einbeziehung des Eigenschwingungsverhaltens der Struktur.

Anhand von Lastfällen aus Standard-Schuhtests wurde das reduzierte Modell mit dem Originalmodell und den Experimenten verglichen. Der Einfluss der Berücksichtigung unterschiedlich vieler Eigenmoden im CRAIG-BAMPTON-Verfahren wurde zusätzlich überprüft.

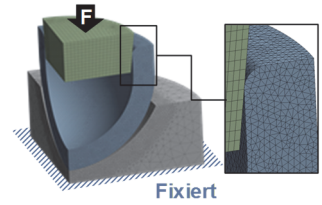
Mit der Eigenimplementierung wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und Testlastfällen erreicht. Die Rechenzeit pro Solver-Iteration im Menschmodell wurde auf einem einfachen Testrechner von 327 auf knapp 6 ms gesenkt, was viele Funktionsaufrufe im Solver pro Zeiteinheit erlaubt und damit die Gesamtrechenzeit im Modell gegenüber einem Gesamt-FE-Modell stark verkürzt. In produktiver Zusammenarbeit mit der Adidas AG und dem Lehrstuhl für Informatik 14 (Maschinelles Lernen und Datenanalytik) wird weiterhin am Einbau in das Menschmodell gearbeitet.

Finite-Elemente-Simulation von Druckversuchen an Zahnkronenprobekörpern

Förderer	*Zahnklinik 1 – Zahnerhaltung und Parodontologie, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Lohbauer, Dr. Renan Belli*
Förderzeitraum	*seit 15.05.2017*
Projektleiter	Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter	H. Völkl, M.Sc.

Moderne Zahnkronen werden CAD- und CAM-unterstützt aus Spezialkeramiken gefertigt. Für Patienten ist eine lange Haltbarkeit wichtig. Statistische Untersuchungen über Zahnkronenbrüche in-vivo haben jedoch gezeigt, dass ein Großteil der Brüche vom Randbereich der Zahnkrone ausgeht. Fraktografie-Analysen deuten darauf hin, dass dies auf den Fräsprozess vor dem finalen Sintern zurückzuführen ist, der insbesondere das keramische Gefüge in Randbereichen negativ beeinträchtigt. Um eine bessere Geometrie bzw. Designrichtlinien für CAD/CAM-Zahnersatz erstellen zu können, wurden Finite-Elemente-Analysen (FEA) durchgeführt, die Aufschluss über den Spannungszustand in Zahnkronenprobekörpern geben.

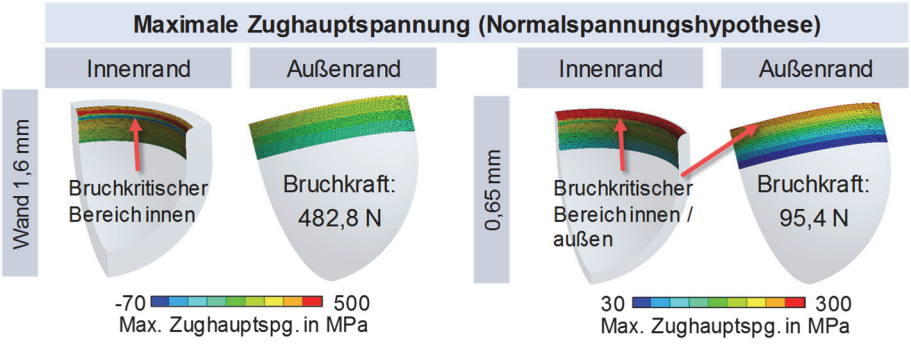
Im gemeinsamen Forschungsprojekt wurde an Zahnkronenprobekörpern aus den Materialien „Vitablocs Mark II" und „IPS e.max CAD" gearbeitet. Die idealisierte Kuppelgeometrie (sog. „Dome", Bild unten) wurde hierbei als abstrahierte Zahnkronengeometrie gewählt, um allgemeingültige und für einen Festigkeitstest reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.



Idealisierte Zahnkronenprobekörper-Geometrie

Der Dome mit dünner (0,65 mm) und dicker (1,6 mm) Wandstärke und den beiden Materialen wurde in jeweils 30 Bruchtests untersucht.

Hierzu wurde auf den Konus oben eine ansteigende Kraft bis zum Bruch aufgebracht und die Bruchkraft als Ergebnis festgehalten. Um innerhalb der FE-Simulation eine möglichst gute Reproduktion der Reibungsverhältnisse im Kontakt Konus/Dome bzw. Dome/Auflage zu ermöglichen, wurden zusätzlich Tribometerversuche durchgeführt, um den Reibkoeffizienten zwischen den Zahnkeramiken und Stahl zu ermitteln. Nach feiner Vernetzung und Aufbringung von Symmetrierandbedingungen auf das Viertelmodell wurden in einzelnen, impliziten FE-Analysen je Wandstärke und Keramik mit entsprechendem Materialmodellen die 30 Bruchkräfte aufgebracht und die sich ergebenden Spannungsverhältnisse (nach Normalspannungshypothese) analysiert. Besonders im Fokus stand hierbei der Probenrand, da in realen Zahnkronen Risse meistens in diesem Bereich initiierten.



Zughauptspannungen am Rand des Zahnkronenprobekörpers

Während für dünne Wandstärken die maximalen Zughauptspannungen am Außen- bzw. Innenrand des Domes ähnlich groß waren, bildet sich bei hoher Wandstärke ein wesentlich größerer Unterschied zwischen innen und außen aus. Die Zugspannungen am Innenrand waren stets größer als am Außenrand. Dieses Ergebnis korreliert stark mit der experimentellen Beobachtung, dass Proben mit hoher Wandstärke immer von innen aus brachen, während Proben mit geringer Wandstärke in etwa gleich oft innen und außen versagten. Dabei wiesen dünne Proben eine hohe Sensitivität gegenüber fertigungsbedingten Verschlechterungen im keramischen Gefüge auf.

Im Zusammenspiel von Druckversuchen, Fraktografie, Tribometerversuchen und FE-Simulation konnte so ein reproduzierbares Vorgehen für Festigkeitsuntersuchungen an Zahnkronenprobekörper entwickelt und Designempfehlungen gegeben werden.

Standzeiterhöhung von Knie-Totalendoprothesen durch amorphe Kohlenstoffschichten

Projektleiter Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter B. Rothammer, M.Sc.

Das Kniegelenk stellt eines der höchstbelasteten Gelenke des Menschen dar. Zum Versagen eines natürlichen Kniegelenks führen zu 96 % Gonarthrosen, welche die Implantation eines künstlichen Gelenkes erfordern. Der häufigste Grund für die Notwendigkeit einer Revisionsoperation besteht in implantatseitigem Verschleiß, da dieser durch Osteolyseprozesse zu einer aseptischen Lockerung des Implantats führt. Die Applikation amorpher Kohlenstoffschichten auf den Implantatoberflächen soll dazu beitragen, die Standzeit von Knie-Totalendoprothesen deutlich zu verlängern.

Im Bereich der Maschinenelemente sind amorphe Kohlenstoffschichten (DLC, Diamond-like Carbon) inzwischen in der Anwendung weit verbreitet. Dagegen werden sie in der Implantattechnik aktuell nur vereinzelt eingesetzt. Ein wesentlicher Grund besteht darin, dass Kohlenstoffschichten bisher nur mit unzureichender Haftung auf Implantatoberflächen appliziert werden. Die zytologischen und tribologischen Herausforderungen in der Knieendoprothetik bedingen eine flächendeckende Oberflächenmodifikation des metallisch-polymeren Implantats. Die Herangehensweise im Projekt zeichnet sich aus durch die enge Verzahnung von Schichtentwicklung und zyto-tribologischer präklinischer in-vitro Prüfung. Die tribologische Prüfung folgt einer stringenten Kette tribologischer Prüfverfahren.

Die Kombination von Stift-Scheibe-Tribometer, Roll-Gleit-Prüfstand und Kniesimulator erlaubt eine umfassende Verschleißanalyse bezüglich dominierender Verschleißmechanismen, typischer Partikelgrößen und -morphologien sowie deren Korrelation über die Glieder der Prüfkette hinweg. Die parallel zu den tribologischen Prüfungen laufenden Untersuchungen zur Biokompatibilität stellen ein weiteres wesentliches Merkmal dar. Der Fokus liegt hierbei auf der zytologischen Wirkung der Schichten und der Abriebpartikel. Somit lassen sich die Wechselwirkungen von tribologischem und zytologischem Verhalten integral beschreiben.

Weisen die abgeschiedenen Schichten als Grundvoraussetzung gute mechanische Eigenschaften, insbesondere eine ausreichend gute Haftung auf, werden sie auf ihr biokompatibles und tribologisches Verhalten hin untersucht. Zeigt die amorphe Kohlenstoffschicht ein vorteilhaftes zyto-tribologisches Verhalten in Tribometerversuchen, so wird die Schicht für weiterführende tribologische Versuche in einem Roll-Gleit-Prüfstand und einem Kniesimulator herangezogen. Der Vergleich mit den Referenzen erlaubt eine Einordnung der mechanischen Eigenschaften, der Biokompatibilität und der tribologischen Wirksamkeit der Schicht. Durch die Möglichkeit, in den ersten beiden Gliedern der Prüfkette mehrere Schichten bezüglich ihres zyto-tribologischen Verhaltens testen zu können, lässt sich zudem eruieren, wodurch sich dieses Verhalten beeinflussen lässt.

Entwicklung zyto-tribologisch wirksamer amorpher Kohlenstoffschichtsysteme: Die dargestellten Abschnitte – von der Schichtarchitektur über die mechanischen Kenngrößen bis hin zum zyto-tribologischen Verhalten – lassen an den einzelnen „Gates" Iterationen zu

Vorhersage von adhäsivem Verschleiß mit Multiskalen- und Multiphysikansätzen

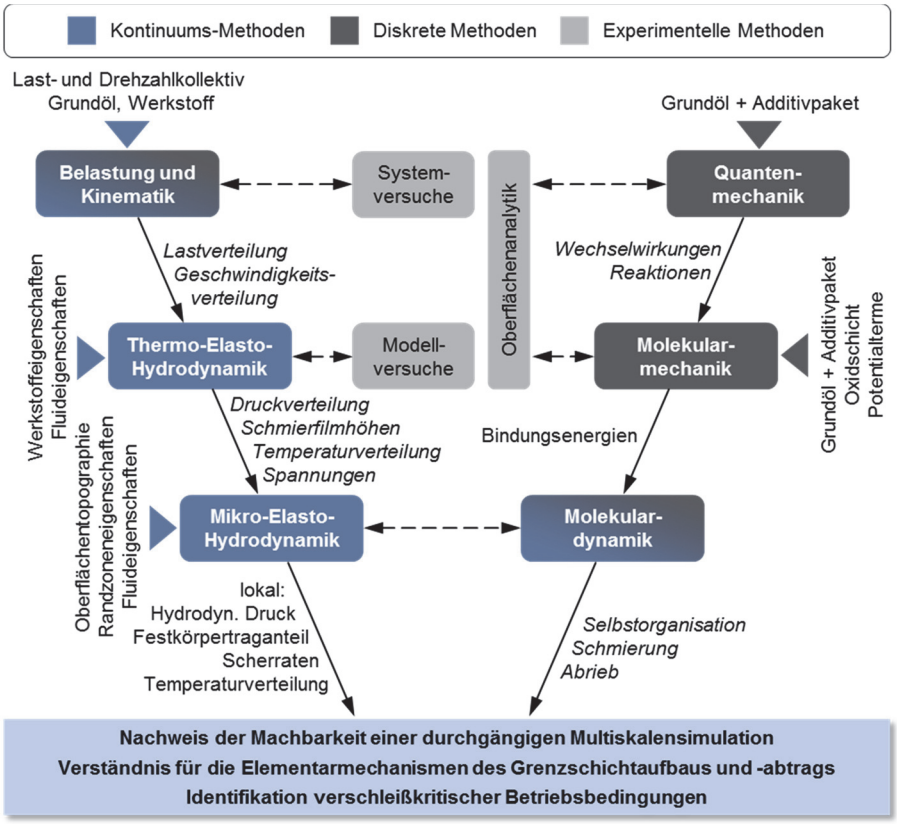
Projektleiter Dr.-Ing. S. Tremmel
Bearbeiter A. Winkler, M.Sc.

In der Antriebstechnik werden zunehmend niedrigviskose Schmierstoffe eingesetzt, um die Energieeffizienz zu erhöhen. Hierdurch kommt es – etwa bei Wälzlagern oder Verzahnungen – zu häufigeren Laufzeitanteilen im Mischreibungsbereich, was zu adhäsivem Verschleiß führen kann.

Mit den heute üblichen, empirisch gewonnenen Modellen lässt sich Verschleiß nicht ausreichend prognostizieren, weil maßgebliche Effekte wie die Organisation von Grenzschichten weitgehend unberücksichtigt bleiben. Bessere Verschleißvorhersagemodelle sind aber zukünftig erforderlich, zum Beispiel für die Selbstdiagnose von Komponenten im „Internet der Dinge". Fortschritte bei Rechnerkapazitäten und Simulationsmethoden erlauben heute Multiskalen- und Multiphysiksimulationen sowie deren Validierung durch hochauflösende Oberflächenanalytik.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, nachzuweisen, dass eine solche Multiskalensimulation zur Beschreibung tribologischer Vorgänge darstellbar ist und sich hieraus unmittelbar Erkenntnisse für die industrielle Praxis gewinnen lassen. Schwerpunkt liegt auf einem Verständnis der Elementarmechanismen des Aufbaus, Umbaus und Abtrags von Grenzschichten bei Wälzlagern und Stirnverzahnungen sowie der Definition von Grenzbedingungen für den Abbau beziehungsweise die Instabilität verschleißhemmender Grenzschichten auf Basis molekularer Simulationen.

Der gewählte Multiskalensimulationsansatz folgt einem systematischen Hochskalieren von der kleinen zur größeren Längen- und Zeitskala und in die Gegenrichtung. Dadurch bietet der Ansatz die Chance, etablierte Methoden, wie Finite-Elemente- oder Mehrkörpersimulationen, zu erweitern. Die Grundlagenarbeiten der Theoretischen Chemie werden dabei so kondensiert, dass dem Ingenieur überschaubare Erweiterungen der bestehenden Simulationsverfahren genügen, um signifikante Verbesserungen der Prognosegüte zu erreichen. Schließlich liefert das Forschungsvorhaben eine Methodik für die Vorhersage adhäsiven Verschleißes.

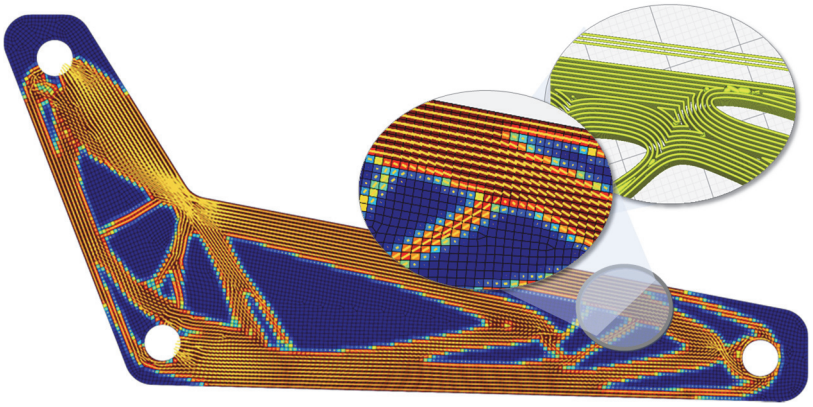


Zusammenwirken der Simulationsmethoden mit Ein- und Ausgangsgrößen der Domänen

Kraftflussgerechter 3D-Druck mit kurzfaserverstärktem Filament

Projektleiter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
Bearbeiter H. Völkl, M.Sc.

Additive Fertigungsverfahren erlauben außergewöhnliche geometrische Designfreiheiten, die mittels Design for Additive Manufacturing (DfAM) genutzt werden können. Der lokale Einsatz bestimmter Materialien beispielsweise lässt eine hohe Beanspruchungsgerechtheit zu, die durch geeignete Konstruktionsmethoden realisiert werden kann. Insbesondere das Fertigungsverfahren Fused Filament Fabrication (FFF) ist weit verbreitet und wird nicht nur zur schnellen und frühzeitigen Erstellung von Prototypen, sondern auch zur Fertigung von individualisierten Bauteilen verwendet. Mit diesem Verfahren wird ein Werkstück schichtweise aufgebaut, wobei jede Schicht aus Extrusionssträngen besteht, welche durch die Druckpfade definiert werden. Die Pfadtrajektorien können, abhängig vom verwendeten Material, einen wesentlichen Einfluss auf Steifigkeit und/oder Festigkeit des fertigen Bauteils haben – was sich nutzen lässt, um beispielsweise besonders widerstandsfähige Bauteile zu erhalten. Kurzfaserverstärkte CFK-Filamente erscheinen dafür besonders geeignet, da die Vorzugsorientierung bei diesem Material deutlich mit den Druckpfaden zusammenfällt. Aktuell wird für die Pfadgenerierung häufig Slicer-Software (Slic3r, CURA etc.) genutzt, deren Druckpfade jedoch die Belastung nicht berücksichtigen.



Topologieoptimiertes Bauteil mit abgeleiteten, beanspruchungsgerechten Extrusionspfaden

Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik an der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) in Erlangen wird daher ein Ansatz verfolgt, in welchem zunächst mittels einer selbstentwickelten Methode zur Topologieoptimierung für transversal isotrope Materialien (*mfk*TOPO) beanspruchungsgerechte Geometrien und lokale Materialorientierungsinformationen abgeleitet werden. Die Übersetzung der Orientierungsinformation in Druckpfade erfolgt anschließend durch verschiedene Pfadgenerierungsalgorithmen. Das Bauteil mit den so erzeugten Pfaden wird in einer FE-Simulation modelliert. Dadurch wird ein Vergleich mit konventioneller Slicer-Software bereits vor dem Drucken möglich. Demonstratoren aus dem 3D-Drucker dienen final der Untersuchung der Effektivität des Ansatzes.

Foto: KTmfk/H. Völkl

Gedrucktes, optimiertes Bauteil

Ziel des fertig entwickelten Ansatzes ist es, eine umfängliche Unterstützung des Produktentwicklers für den 3D-Druck zu gewährleisten, vom abstrakten Bauraum hin zum beanspruchungsoptimierten Bauteil.

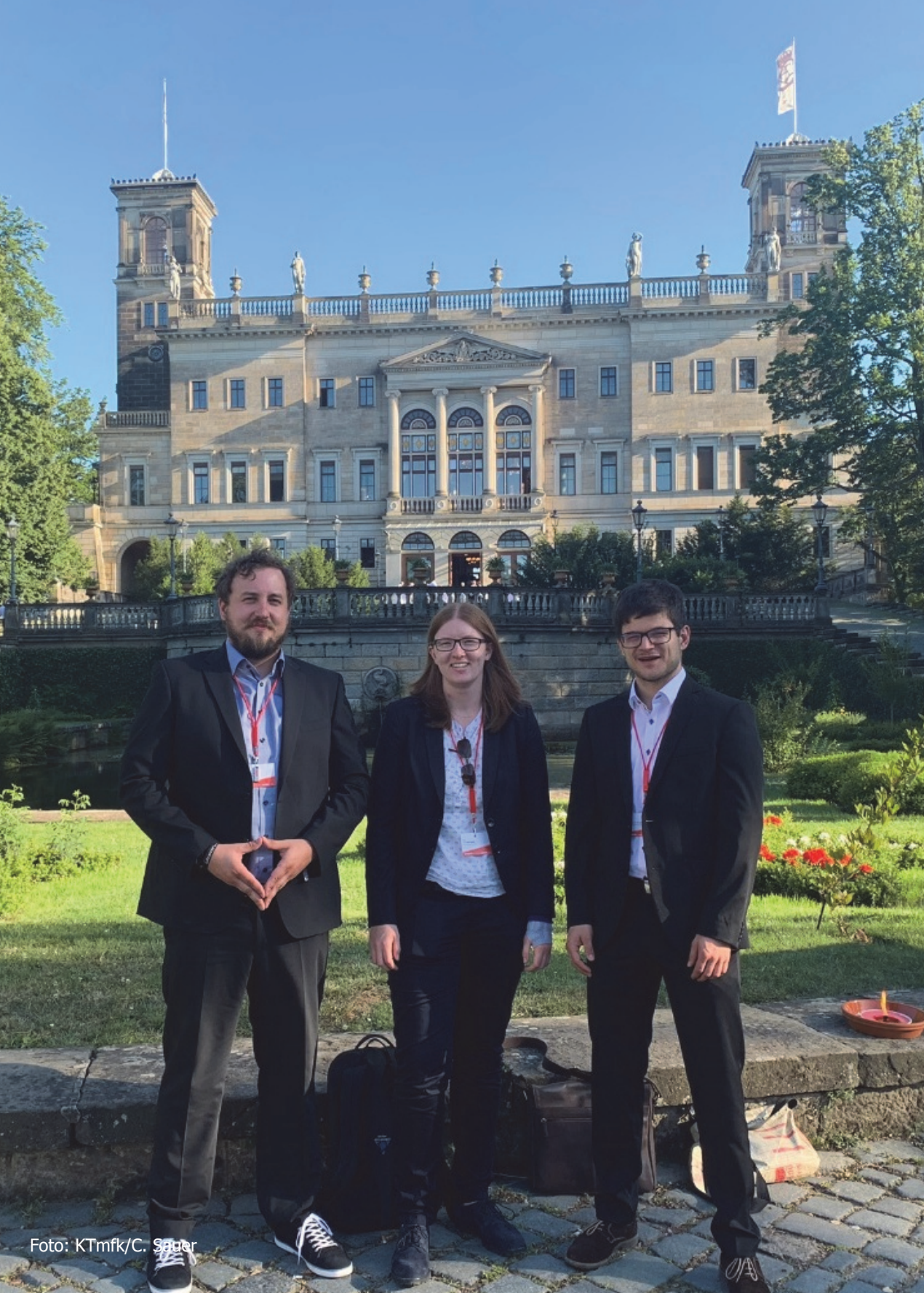


Foto: KTmfk/C. Sauer

Veröffentlichungen

2015

Aschenbrenner A., Heling B., Wartzack S.: *Auswirkungen von passungsbedingten Deformationen auf das Radialspiel von Wälzlagerungen.* 2. Summer School Toleranzmanagement (Erlangen, 23. September 2015 - 24. September 2015).

Breitsprecher T., Kestel P., Küstner C., Sprügel T., Wartzack S.: *Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen.* In: ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015), S. 744-750. DOI: 10.3139/104.111423

Breitsprecher T., Sauer C., Sperber C., Wartzack S.: *Design-for-manufacture of sheet-bulk metal formed parts.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand).

Crostack A., Luft T., Binz H., Wartzack S., Roth D.: *Konzept eines erweiterten Produktbeschreibungsansatzes basierend auf dem Vergleich des Characteristics-Properties-Modelling und der matrixbasierten Produktbeschreibung.* Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP 2015) (Stuttgart, 18. Juni 2015 - 19. Juni 2015).

Dobrenizki L., Musayev Y., Tremmel S., Hosenfeldt T., Wartzack S.: *Energieeffizienz durch Tribometrie: Untersuchung von Reibungsmessgrößen am Beispiel des Kontakts beschichteter Tassenstößel/Nocken.* 56. Tribologie-Fachtagung (Göttingen, 21. September 2015 - 23. September 2015)

Fechter M., Damgrave RGJ., Wartzack S.: *Interactive immersive engineering system for distant collaboration.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Hautsch S., Katona S., Sprügel T., Koch M., Rieg F., Wartzack S.: *Validierung von prozessgerecht strukturoptimierten Bauteilentwürfen mittels integrierter FEM-Realgeometrieanalyse.* 26. DfX-Symposium (Herrsching, 7. Oktober 2015 - 8. Oktober 2015).

Heling B., Aschenbrenner A., Wartzack S.: *Statistische Toleranzanalyse verknüpfter Schließmaße.* Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 2. Summer School - September 2015.

Katona S., Koch M., Wartzack S.: *Generating hybrid geometry models for more precise simulations by combining parametric CAD-models with 3d surface detected geometry inserts.* ICED15 (Mailand, Italien, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015)

Katona S., Sprügel T., Koch M., Wartzack S.: *Structural Mechanics Analysis Using an FE-Mesh Adaption to Real, 3D Surface Detected Geometry Data.* In: Journal of Mechanics Engineering and Automation 5 (2015), S. 387-394. DOI: 10.17265/2159-5275/2015.07.001

Katona S., Sprügel T., Koch M., Wartzack S.: *Adapting FE-Meshes to real, 3D surface detected geometry data to improve FE-simulation results.* NAFEMS World Congress 2015 (San Diego, Kalifornien, 21. Juni 2015 - 24. Juni 2015).

Kellermeyer M., Klein D., Wartzack S.: *Designing of hybrid joints at the early embodiment design stage.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Kestel P., Sprügel T., Katona S., Lehnhäuser T., Wartzack S.: *Concept and implementation of a central knowledge framework for simulation knowledge.* NAFEMS European Conference: Simulation Process and Data Management (München).

Kestel P., Sprügel T., Katona S., Wartzack S.: *Konzept zur Umsetzung einer zentralen Wissensbasis für Simulationswissen in ANSYS Engineering Knowledge Manager.* ANSYS Conference & 33th CADFEM Users' Meeting (Bremen)

Kestel P., Wartzack S.: *Konzept für ein wissensbasiertes FEA-Assistenzsystem zur Unterstützung konstruktionsbegleitender Simulationen.* 26. DfX-Symposium (Herrsching, 7. Oktober 2015 - 8. Oktober 2015).

Kett S., Ringler A., Kamin S., Lang F., Wartzack S.: *Kritische Würdigung eines Werkzeugs zur Messung von Nutzerexklusion im Produktdesign.* 26. DfX-Symposium Design for X. (Herrsching, 7. Oktober 2015 - 8. Oktober 2015).

Kett S., Wartzack S.: *Integration of Universal Design principles into early phases of product design - a case study.* 20th International Conference on Engineering Design (Milan, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Klein D., Malezki W., Wartzack S.: *Introduction of a computational approach for the design of composite structures at the early embodiment design stage.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Klein D., Malezki W., Wartzack S.: *A computational design approach for composite structures at the early embodiment design stage.* NAFEMS World Congress (San Diego, 21. Juni 2015 - 24. Juni 2015).

Koch A., Wittmann S.: *Robuste, verkürzte Prozesskette durch DfX-Workbenches: Praxisbeispiel Gussgerechtheit.* 26. DfX-Symposium (Herrsching)

Kröner J., Tremmel S., Kursawe S., Musayev Y., Hosenfeldt T., Wartzack S.: *GreenBearings: Minimierung und Vermeidung konventioneller Schmierstoffe in Wälzlagerungen durch tribologische Schichten.* In: Tagungsband zum 2. Green Factory Bavaria Kolloquium 2015 Energieeffiziente Produktion, 2015, S. 266 – 273.

Kröner J., Tremmel S., Kursawe S., Musayev Y., Hosenfeldt T., Wartzack S.: *GreenBearings – Friction Behaviour of DLC-Coated Dry Running Deep Groove Ball Bearings.* In: Applied Mechanics and Materials 805 (2015), S. 147–153. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.805.147

Krüger D., Wartzack S.: *Visualisation of biomechanical stress quantities within CAD environments.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Küstner C., Wachsmuth P., Wartzack S.: *Datenakquisition und -analyse im Assistenzsystem zur lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung* (SSP2015) (Stuttgart, 19. Juni 2015 - 19. Juni 2015).

Küstner C., Wartzack S.: *The realization of an engineering assistance system for the development of noise-reduced rotating machines.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015)

Luft T., Schneider S., Wartzack S.: *A methodical approach to model and map interconnected decision making situations and their consequences.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015)

Luft T., Wartzack S.: *Multi-criteria evaluation and decision making on the basis of the matrix-based modeling of the product development.* 3rd International Spring School on Systems Engineering (IS3E 2015) (Paderborn, 4. Mai 2015 - 8. Mai 2015)

Luft T., Wartzack S.: *Was macht ein Wissensingenieur?* In: Wissensmanagement - Magazin für Führungskräfte 17 (2015), S. 8-11

Löffler M., Freiburg D., Gröbel D., Loderer A., Matthias S., Stangier D., Weikert T.: *Untersuchung von Tailored Surfaces hinsichtlich ihres tribologischen Einflusses auf Prozesse der Blechmassivumformung.* 18. Workshop Simulation in der Umformtechnik & 3. Industriekolloquium des SFB/TR73 (Dortmund, 26. Februar 2015 - 27. Februar 2015)

Mauser K., Breitsprecher T., Wartzack S., Hasse A.: *Taking into account the change of geometry in system simulation processes.* International Conference on Engineering Design (ICED 15) (Milan, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Merklein M., Schmidt M., Tremmel S., Wartzack S., Andreas K., Häfner T., Zhao R., Steiner J.: *Investigation of Tribological Systems for Dry Deep Drawing by Tailored Surfaces.* In: Dry Metal Forming Open Access Journal 1 (2015), S. 42-56.

Merklein M., Schmidt M., Wartzack S., Tremmel S., Andreas K., Häfner T., Zhao R., Steiner J.: *Development and Evaluation of Tool Sided Surface Modifications for Dry Deep Drawing of Steel and Aluminum Alloys.* In: Dry Metal Forming Open Access Journal 1 (2015), S. 113-120.

Meyer AW., Heyder A., Brela M., Urban N., Sparrer J., Franke J.: *Fully automated rotor inspection apparatus with high flexibility for permanent magnet synchronous motors using an improved hall sensor line array.* 5th International Conference on Electric Drives Production, EDPC 2015. DOI: 10.1109/EDPC.2015.7323196

Miehling J., Schuhhardt J., Paulus-Rohmer F., Wartzack S.: *Computer Aided Ergonomics Through Parametric Biomechanical Simulation.* ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Boston, Massachusetts, 2. August 2015 - 5. August 2015).

Miehling J., Wartzack S.: *Strength Mapping Algorithm (SMA) for Biomechanical Human Modelling using Empirical Population Data.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015). DOI: 10.1115/DETC2015-46064

Müller M., Tremmel S.: *Die Schmierstoffversorgung von Wälzlagern mittels loser Schmierringe - ein Ansatz zur Reduktion des Wartungsaufwands unter schwierigen Betriebsbedingungen.* DMK 2015 (Dresden, 8. Dezember 2015 - 9. Dezember 2015).

Müller M., Tremmel S., Weschta M., Stangl T., Wartzack S.: *Analyse der Betriebseigenschaften von losen Schmierringen und Ableitung von Gestaltungs- und Auslegungsrichtlinien.* Wälzlagerkolloquium (Kaiserslautern).

Pohrer B., Zürcher M., Westerholt A., Bösmann A., Siebert D., Völkl J., Holweger W., Wehrum N., Arlt W., Wasserscheid P., Schlücker E.: *CO2 as a Viscosity Index Improver for Wind Turbine Oils.* In: Industrial & Engineering Chemistry Research 54 (2015), S. 5810-5819. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b00494

Reitmeier J., Luft T., Wartzack S., Paetzold K.: *Consideration of uncertainties in the product-oriented development process.* 3rd International Conference on Modelling and Management of Engineering Processes (MMEP 2013) (Magdeburg, 20. November 2013 - 21. November 2013). DOI: 10.1007/978-3-662-44009-4_12

Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S.: *Contact and Mobility Simulation for Mechanical Assemblies Based on Skin Model Shapes.* In: Journal of Computing and Information Science in Engineering 15 (2015). DOI: 10.1115/1.4029051

Schleich B., Wartzack S.: *Approaches for the assembly simulation of skin model shapes.* In: Computer-Aided Design 65 (2015), S. 18-33. DOI: 10.1016/j.cad.2015.03.004

Schleich B., Wartzack S.: *A Generic Approach to Sensitivity Analysis in Geometric Variations Management.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 31. Juli 2015).

Schleich B., Wartzack S.: *Tolerance Analysis of Rotating Mechanism Based on Skin Model Shapes in Discrete Geometry.* 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Hangzhou, 11. Mai 2014 - 14. Mai 2014). DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.036

Schleich B., Wartzack S.: *Evaluation of geometric tolerances and generation of variational part representatives for tolerance analysis.* In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 79 (2015), S. 959-983. DOI: 10.1007/s00170-015-6886-8

Schleich B., Wartzack S., Anwer N., Mathieu L.: *Skin Model Shapes: Offering New Potentials for Modelling Product Shape Variability.* 35th Computers and Information in Engineering Conference (Boston, Massachusetts, 2. August 2015 - 5. August 2015). DOI: 10.1115/DETC2015-46701

Seiler K., Tremmel S., Wartzack S., Hahn B., Graf-Goller O.: *Einfluss der Schmierstoffhydrodynamik in der Käfigführung auf die Wälzlagerreibung und –kinematik.* In: 11. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen. 6.5-7.5.2015 Schweinfurt, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2015.

Sprügel T., Hallmann M., Wartzack S.: *A concept for FE plausibility checks in structural mechanics.* NAFEMS World Congress 2015 (San Diego, 21. Juni 2015 - 24. Juni 2015).

Sprügel T., Wartzack S.: *Concept and application of automatic part-recognition with artificial neural networks for FE simulations.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Sprügel T., Wartzack S.: *Methodik zur Validierung, Verifikation und Auswahl mathematischer Metamodelle im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung.* 26. DfX-Symposium (Herrsching, 7. Oktober 2015 - 8. Oktober 2015)

Stangl T., Wartzack S.: *Feature based interpretation and reconstruction of structural topology optimization results.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Vierneusel B., Tremmel S., Wartzack S.: *Einfluss der Mikrostruktur gesputterter Molybdändisulfid-(MoS2) Schichten auf die Lagergebrauchsdauer im Trockenlauf.* 11. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen 2015: Gestaltung, Berechnung, Einsatz (Schweinfurt, 6. Mai 2015 - 7. Mai 2015).

Vierneusel B., Tremmel S., Wartzack S.: *Monte Carlo simulation of the MoS2 sputtering process and the influence of the normalized momentum on residual stresses.* In: Journal of Vacuum Science & Technology A 33 (2015), S. 1-6. DOI: 10.1116/1.4926383

Walter M., Pribek M., Sprügel T., Wartzack S.: *Result Visualization and Documentation of Tolerance Simulations of Mechanisms.* 20th International Conference on Engineering Design (ICED15) (Mailand, 27. Juli 2015 - 30. Juli 2015).

Walter M., Sprügel T., Wartzack S.: *Least Cost Tolerance Allocation for Systems with time-variant Deviations.* 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing (Hangzhou, 11. Mai 2014 - 14. Mai 2014). DOI: 10.1016/j.procir.2015.04.035

Walter M., Sprügel T., Ziegler P., Wartzack S.: *Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Abweichungen in der statistischen Toleranzanalyse.* In: Konstruktion (2015), S. 88-92.

Wartzack S.: *Simulationsstrategie als Basis für Industrie 4.0.* In: CADFEM Journal 2015 (2015), S. 2-4.

Wartzack S., Walter M., Schleich B., Aschenbrenner A., Heling B.: *Der KTmfk und die Arbeitsgruppe "Toleranzmanagement".* Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 2. Summer School - September 2015 (Erlangen, 23. September 2015 - 24. September 2015).

Weikert T., Tremmel S., Wartzack S.: *Gezielte Anpassung lokaler Reibungszustände unter Einsatz wolframmodifizierter amorpher Kohlenstoffschichten (a-C:H:W).* 56. Tribologie-Fachtagung. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen. (Göttingen, 21. September 2015 - 23. September 2015).

Weschta M., Tremmel S., Wartzack S.: *Simulation elastohydrodynamischer Wälz-/Gleit-Kontakte mit Oberflächenstrukturen durch kommerzielle FE-Programme.* Wissenschaftliches Kolloquium Wälzlager (Kaiserslautern, 23. März 2015 - 24. März 2015).

Weschta M., Tremmel S., Wartzack S.: *Influence of microstructure shape, non-Newtonian lubricant and thermal effects on microstructured surfaces in rolling/sliding EHL contacts.* STLE 70th Annual Meeting & Exhibition (Dallas, Texas, 17. Mai 2015 - 21. Mai 2015).

Westerholt A., Weschta M., Bösmann A., Tremmel S., Korth Y., Wolf MJ., Schlücker E., Wehrum N., Lennert A., Uerdingen M., Holweger W., Wartzack S., Wasserscheid P.: *Halide-Free Synthesis and Tribological Performance of Oil-Miscible Ammonium and Phosphonium-Based Ionic Liquids.* In: ACS Sustainable Chemistry & Engineering 3 (2015), S. 797–808. DOI: 10.1021/sc500517n

Witzgall C., Kellermeyer M., Wartzack S.: *Hybride Strukturen einfach und effizient berechnen.* In: Adhaesion Kleben und Dichten 59 (2015), S. 36-41. DOI: 10.1007/s35145-015-0566-6

Witzgall C., Wartzack S.: *Simplified integrative simulation of short fibre reinforced polymers under varying thermal conditions.* 10th European LS-DYNA Conference 2015 (Würzburg, 15. Juni 2015 - 17. Juni 2015).

Witzgall C., Wartzack S.: *Validierung eines Ansatzes zur Simulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste in frühen Entwurfsphasen.* Symposium Design for X (Herrsching).

Witzgall C., Wartzack S.: *Hybrider Zusammenhalt.* In: CADFEM Journal 2015 (2015), S. 42-44.

Zhao R., Tremmel S.: *Tribologisches Einsatzverhalten von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (DLC) auf Werkzeugstahl gegenüber Stahl- und Aluminiumblechwerkstoffen für Trockentiefziehprozesse.* 56. Tribologie-Fachtagung: Reibung, Schmierung und Verschleiß. (Göttingen, 21. September 2015 - 23. September 2015).

Zhao R., Weikert T., Tremmel S., Wartzack S.: *Tribological behaviour of tungsten doped hydrogenated amorphous carbon coatings deposited under various bias voltages and argon flows.* Coatings Science International (Noordwijk, 22. Juni 2015 - 26. Juni 2015).

Ziegler P., Wartzack S.: *Sensitivity Analysis of features in tolerancing based on constraint function level sets.* In: Reliability Engineering & System Safety 134 (2015), S. 31-75. DOI: 10.1016/j.ress.2014.09.017

2016

Aschenbrenner A., Wartzack S.: *A Concept for the Consideration of Dimensional and Geometrical Deviations in the Evaluation of the Internal Clearance of Roller Bearings.* 14th CIRP CAT 2016 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Göteborg, 18. Mai 2016 - 20. Mai 2016). DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.003

Carro Saavedra C., Marahrens NJ., Schweigert S., Kestel P., Kremer S., Wartzack S., Lindemann U.: *Development of a Toolkit of Methods for Simulations in Product Development.* IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (Nusa Dua, Indonesia).

Dobrenizki L., Tremmel S., Wartzack S., Hoffmann D., Brögelmann T., Bobzin K., Bagcivan N., Musayev Y., Hosenfeldt T.: *Efficiency improvement in automobile bucket tappet/camshaft contacts by DLC coatings – Influence of engine oil, temperature and camshaft speed.* In: Surface & Coatings Technology 308 (2016), S. 360 – 373. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.041

Dorschky E., Kurfess N., Krüger D., Schlarb H., Eskofier B., van den Bogert AJ.: *Predicting the Effects of Midsole Materials on Running Using Optimal Control Simulation.* Dynamic Walking 2016 (Holly, Michigan, 4. Juni 2016 - 7. Juni 2016).

Fechter M., Kett S., Luft T., Wartzack S.: *Impact of collaborative space on team work in engineering design education.* DESIGN 2016 14th International Design Conference (Dubrovnik, 16. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Hasse A.: *Topology optimization of Compliant Mechanisms explicitly considering desired kinematics and stiffness constraints.* ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC2016). (Charlotte, North Carolina, 21. August 2016 - 24. August 2016).

Heling B., Wartzack S.: *Methode zur Parameteroptimierung komplexer Mechanismen hinsichtlich kinematischer Anforderungen.* Design for X Symposium (Jesteburg, 5. Oktober 2016 - 6. Oktober 2016)

Hochrein D., Graf-Goller O., Tremmel S., Wartzack S.: *Vorstellung einer neuen Prüfstandsgruppe zur Untersuchung des Fliehkrafteinflusses auf das Reibungsmoment von Wälzlagern.* 57. Tribologie-Fachtagung. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen (Göttingen, 26. September 2016 - 28. September 2016).

Katona S., Koch M., Wartzack S.: *An Approach of a Knowledge-based Process to Integrate Real Geometry Models in Product Simulations.* In: Procedia CIRP (2016), S. 813-818. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.176

Katona S., Koch M., Wartzack S.: *Integrating real geometry models into product simulations: an approach of knowledge-based process.* International Design Conference DESIGN 2016 (Cavtat, Dubrovnik, 16. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Katona S., Lušić M., Koch M., Wartzack S.: *Integrating optical 3D measurement techniques in pipe bending: a model-based approach minimising waste by deriving real functional design behavior.* In: Procedia CIRP (2016), S. 808-812. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.163

Kersting P., Gröbel D., Merklein M., Peter S., Wernicke S., Tekkaya AE., Krebs E., Freiburg D., Biermann D., Weikert T., Tremmel S., Stangier D., Tillmann W., Matthias S., Reithmeier E., Löffler M., Beyer F., Willner K.: *Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming.* In: Production Engineering 10 (2016), S. 37-50. DOI: 10.1007/s11740-015-0651-6

Kestel P., Schneyer T., Wartzack S.: *Feature-based approach for the automated setup of accurate, design-accompanying Finite Element Analyses.* Design Conference 2016 (Dubrovnik).

Kestel P., Sprügel T., Wartzack S.: *Feature-basierte Modellierung und Bauteilerkennung in automatisierten, konstruktionsbegleitenden Finite-Elemente-Analysen.* 34. CADFEM ANSYS Simulation Conference (Nürnberg).

Kestel P., Sprügel T., Wartzack S.: *Assistance system for automated and knowledge-based setup and evaluation of design-accompanying Finite Element Analyses.* Automotive Simulation World Congress.

Kestel P., Wartzack S.: *Wissensbasierter Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen durch ein FEA-Assistenzsystem.* Entwerfen Entwickeln Erleben (Dresden).

Kett S., Wartzack S.: *Considering Emotional Impressions in Product Design: Taking on the Challenges Ahead.* eee2016 (Dresden, 30. Juni 2016 - 1. Juli 2016).

Kett S., Wartzack S.: *Considering Emotional impressions in Product Design: Quality of Life Theory and its impact on Design Strategy.* 14th International Design Conference (Dubrovnik, 16. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Klein D., Kieser C., Wartzack S.: *Auslegung von CFK-Strukturen – ein neuer Ansatz.* In: Lightweight Design (2016), S. 46 – 51.

Klein D., Völkl H., Wartzack S.: *A Simulation-Based Design Approach For Endless-Fiber Reinforced Composite Structures.* Simulation of Composites - Ready for Industry 4.0 (Hamburg, 26. Oktober 2016 - 27. Oktober 2016).

Kröner J., Kursawe S., Musayev Y., Tremmel S.: *Analysing the Tribological Behaviour of DLC-Coated Dry-Running Deep Groove Ball Bearings with Regard to the Ball Material.* In: Applied Mechanics and Materials 856 (2016), S. 143-150. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.856.143

Kröner J., Tremmel S., Kursawe S., Musayev Y., Wartzack S.: *Green-Bearings 2 - Vermeidung konventioneller Schmierstoffe in Wälzlagerungen durch tribologische Schichten und Erhöhung der Gebrauchsdauer trockenlaufender Wälzlager.* In: J. Franke, S. Kreitlein (Hrsg.): Tagungsband zum 3. Green Factory Bavaria Kolloquium 2016 Energieeffiziente Produktion, 2016, S. 447 – 452.

Küstner C., Beyer F., Kumor D., Loderer A., Wartzack S., Willner K., Blum H., Rademacher A., Hausotte T.: *Simulation-based development of Pareto-optimized tailored blanks for the use within sheet-bulk metal forming.* DESIGN 2016 14th International Design Conference (Dubrovnik, 16. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Küstner C., Mitsch J., Hegwein M., Meintker N., Mönks K., Fröhlich M., Wartzack S.: *Zustandsdiagnose von Maschinen im Kontext von Industrie 4.0 unter Einsatz von Data-Mining Methoden.* Design for X Symposium (Jesteburg, 5. Oktober 2016 - 6. Oktober 2016).

Luft T., Lamé G., Ponn J., Le Cardinal J., Wartzack S.: *A business model canvas for idecide - how to design a new decision making app.* 14th International Design Conference (Dubrovnik, 16. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Luft T., Le Cardinal J., Wartzack S.: *Methoden der Entscheidungsfindung.* In: Udo Lindemann (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, München: Carl Hanser Verlag, 2016, S. 759-804.

Luft T., Wartzack S.: *Application, evaluation and future research potential of the matrix and graph based product model.* 14th International Design Conference (Dubrovnik, 16. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Lušić M., Katona S., Hornfeck R.: *Compensating Deviations During Flexible Pin-type Moulding of Spatially Curved CFRP by Using 3D-Surface Detection.* In: Procedia CIRP (2016), S. 158-163. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.028

Löffler M., Andreas K., Engel U., Schulte RK., Gröbel D., Krebs E., Freiburg D., Biermann D., Stangier D., Tillmann W., Weikert T., Wartzack S., Tremmel S., Lucas H., Denkena B., Merklein M.: *Tribological measures for controlling material flow in sheet-bulk metal forming.* In: Production Engineering 10 (2016), S. 459 – 470. DOI: 10.1007/s11740-016-0695-2

Löffler M., Andreas K., Engel U., Weikert T., Tremmel S., Wartzack S., Stangier D., Tillmann W., Merklein M.: *Surface modifications for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming processes.* THE "A" Coatings (Hannover, 31. März 2016 - 1. April 2016).

Marian M., Weschta M., Tremmel S., Wartzack S.: *Einfluss masseerhaltender Kavitationsmodelle bei der Simulation hydro- und elastohydrodynamischer Kontakte. 57. Tribologie-Fachtagung.* Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen (Göttingen, 26. September 2016 - 28. September 2016).

Mauser K., Wartzack S., Hasse A.: *Konzept zur hochdynamischen Kraftregelung mit nachgiebigen Mechanismen.* Design for X Symposium (Jesteburg, 5. Oktober 2016 - 6. Oktober 2016).

Merklein M., Schmidt M., Tremmel S., Andreas K., Häfner T., Zhao R., Steiner J.: *Tailored modifications of amorphous carbon based coatings for dry deep drawing.* In: Dry Metal Forming Open Access Journal 2 (2016), S. 25-39.

Miehling J., Forst R., Wartzack S., Sesselmann S.: *Biomechanischer Simulator zur präoperativen Abschätzung und Optimierung der post-operativen Muskelfunktion am Beispiel der Revisionsendoprothetik des Hüftgelenks.* Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU2016) (Berlin, 25. Oktober 2016 - 28. Oktober 2016).

Miehling J., Krüger D., Quadrat E., Jalali J., Erne HC., Cerny M., Wartzack S., Kovacs L.: *Modellierung bandgeführter Gelenke der Hand zur Anwendung bei klinischen und biomechanischen Fragestellungen.* 6. caMe-Konferenz (Nürnberg, 6. Oktober 2016 - 6. Oktober 2016)

Müller M., Tremmel S.: *Design Criteria for Oil Ring Lubricators to Improve Maintainability of Rolling Bearings* (2016).

Müller M., Tremmel S.: *Design Criteria for Oil Ring Lubricators to Improve Maintainability of Rolling Bearings.* STLE 71st Annual Meeting & Exhibition (Las Vegas, 15. Mai 2016 - 19. Mai 2016).

Pohrer B., Zürcher M., Tremmel S., Wartzack S., Schlücker E.: *Einfluss des tribochemischen Schichtaufbaus auf die Ausbildung elektrisch induzierter Wälzlagerschäden.* 56. Tribologie-Fachtagung. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Band II (Göttingen, 21. September 2015 - 23. September 2015).

Pohrer B., Zürcher M., Tremmel S., Wartzack S., Schlücker E.: *Einfluss des tribochemischen Schichtaufbaus auf die Ausbildung elektrisch induzierter Wälzlagerschäden.* In: Tribologie und Schmierungstechnik 63 (2016), S. 32-39.

Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S.: *Status and Prospects of Skin Model Shapes for Geometric Variations Management.* 14th CIRP CAT 2016 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Göteborg, 18. Mai 2016 - 20. Mai 2016). DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.005

Schleich B., Wartzack S.: *A Quantitative Comparison of Tolerance Analysis Approaches for Rigid Mechanical Assemblies.* 14th CIRP CAT 2016 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Göteborg, 18. Mai 2016 - 20. Mai 2016). DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.013

Scholz M., Kolb S., Kästle C., Franke J.: *Operation-oriented One-piece-flow Manufacturing: Autonomous and Smart Systems as Enabler for a Full-meshed Production Network.* 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP-CMS 2016.DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.125

Seiler K., Hahn B., Plogmann M., Tremmel S., Graf-Goller O., Wartzack S.: *Dynamics simulation of rolling element bearings considering elastohydrodynamic cage contacts.* Bearing World (Hannover, 12. April 2016 - 13. April 2016).

Seiler K., Tremmel S., Wartzack S., Hahn B., Plogmann M., Graf-Goller O.: *Dynamics simulation of rolling element bearings considering elastohydrodynamic cage contacts.* In: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (Hrsg.): Bearing World Journal, Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2016.

Sesselmann S., Miehling J., Wartzack S., Forst R.: *Enhancement of Surgical Planning through Patient-Specific Biomechanical Modeling and Simulation.* 37th SICOT Orthopaedic World Congress (Rom, 8. September 2016 - 10. September 2016).

Sprügel T., Kestel P., Wartzack S.: *FEA-Assistenzsystem – Plausibilitätsprüfung für Finite-Elemente-Simulationen mittels sphärischer Detektorflächen.* Symposium Design for X (Jesteburg).

Sprügel T., Wartzack S.: *Das FEA-Assistenzsystem - Analyseteil FEdelM.* Entwerfen Entwickeln Erleben (Dresden, 30. Juni 2016 - 1. Juli 2016).

Steiner J., Zhao R., Tremmel S., Merklein M.: *Investigation of Tribological Behavior of Carbon Coatings in Dry Sheet Metal Forming.* The "A" Coatings - 12th International Conference in Manufacturing Engineering (Hannover, 31. März 2016 - 1. April 2016).

Wartzack S., Schleich B., Heling B.: *DFG-Forschergruppe "Prozessorientiertes Toleranzmanagement" an der FAU gestartet.* In: WiGeP News 2016 (2016), S. 6.

Wartzack S., Witzgall C., Kellermeyer M., Most T.: *Simplified simulation of aluminum-CFRP adhesive joints.* In: RDO-Journal (2016).

Weikert T., Tremmel S.: *Influence of bias voltage and layer thickness variation on mechanical properties and tribological behavior of a-C:H:W multilayer coatings.* The 17th Nordic Symposium on Tribology - NORDTRIB 2016 (Aulanko, Hämeenlinna, 14. Juni 2016 - 17. Juni 2016).

Weikert T., Tremmel S., Wartzack S.: *Gezielte Anpassung lokaler Reibungszustände unter Einsatz wolframmodifizierter amorpher Kohlenstoffschichten.* In: Tribologie und Schmierungstechnik 63 (2016), S. 5 – 11.

Witzgall C., Kellermeyer M., Wartzack S.: *Analysis of hybrid structures: easy and efficient.* In: Adhesion Adhesives & Sealants 13 (2016), S. 21—24.

Witzgall C., Kellermeyer M., Wartzack S.: *Complexity-reduced Simulation of Hybrid Adhesive Joints.* Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug (Graz, 23. Mai 2016 - 25. Mai 2016).

Witzgall C., Merklein A., Resch T., Starost S., Kellermeyer M., Vogt J., Most T., Will J., Wartzack S.: *Vereinfachte Simulation von Klebeverbindungen an Hybridstrukturen durch Einsatz von Metamodellen.* Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016 (Baden-Baden). In: Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2016.

Witzgall C., Wartzack S.: *Eine Untersuchung mechanisch gealterter kurzfaserverstärkter Thermoplaste unter hochdynamischen Lasten.* Design for X - Beiträge zum 27. DfX-Symposium (Hamburg, 5. Oktober 2016 - 6. Oktober 2016).

Witzgall C., Wartzack S.: *A simplified simulation method for adhesively bonded hybrid structures.* International Conference on Impact Loading of Structures and Materials (Turin, 22. Mai 2016 - 26. Mai 2016).

Yoo IS., Braun T., Kästle C., Spahr M., Kestel P., Wartzack S., Franke J., Bromberger J., Feige E.: *Model Factory for Additive Manufacturing of Mechatronic Products: Interconnecting World-Class Technology Partnerships with Leading AM Players.* 6th CIRP Conference on Learning Factories (Gjøvik).

Zhao R., Steiner J., Andreas K., Merklein M., Tremmel S.: *Investigation of Tribological Behaviour of a-C:H Coatings for Dry Deep Drawing of Aluminium Alloys.* The 17th Nordic Symposium on Tribology - NORDTRIB 2016 (Hämeenlinna, 14. Juni 2016 - 17. Juni 2016).

Zhao R., Tremmel S.: *PVD-/PECVD-DLC Thin Coatings as a Potential Solution for Tailored Friction Conditions for Dry Sheet Metal Forming Tools.* The "A" Coatings - 12th International Conference in Manufacturing Engineering (Hannover, 31. März 2016 - 1. April 2016).

Zhao R., Tremmel S.: *Tribologisches Einsatzverhalten von diamantähnlichen Kohlenstoff-schichten (DLC) auf Werkzeugstahl gegenüber Stahl- und Alumini-umblechwerkstoffen für Trockentiefziehprozesse.* In: Tribologie und Schmierungstechnik (2016), S. 35-42.

von Zitzewitz J., Asboth L., Fumeaux N., Hasse A., Baud L., Vallery H., Courtine G.: *A neurorobotic platform for locomotor prosthetic development in rats and mice.* In: Journal of Neural Engineering 13 (2016). DOI: 10.1088/1741-2560/13/2/026007

2017

Aschenbrenner A., Schleich B., Wartzack S.: *Der Einfluss der Sortierung auf das statistische Verhalten von Funktionsmaßen.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 13. Oktober 2017).

Aschenbrenner A., Wartzack S.: *A Method for the Tolerance Analysis of Bearing Seats for Cylindrical Roller Bearings in respect to the Operating Clearance and the Fatigue Life.* 21st International Conference on Engineering Design (ICED17) (Vancouver, 21. August 2017 - 25. August 2017).

Buerhop C., Winkler T., Wirsching S., Pickel T., Bemm A., Camus C., Hauch J., Brabec C.: *Analyzing the degradation of pre-damaged PV-modules.* SPIE Optical Engineering + Applications (San Diego, California, 23. August 2017). DOI: 10.1117/12.2273978

Buerhop C., Wirsching S., Bemm A., Pickel T., Hohmann P., Nieß M., Vodermayer C., Huber A., Glück B., Mergheim J., Camus C., Hauch J., Brabec C.: *Evolution of cell cracks in PV-modules under field and laboratory conditions.* In: Progress in Photovoltaics (2017). DOI: 10.1002/pip.2975

Fechter M., Wartzack S.: *Natural Finger Interaction for CAD Assembly Modeling.* ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Cleveland, Ohio, USA, 6. August 2017 - 9. August 2017). DOI: 10.1115/DETC2017-67555

Götz S., Schleich B., Wartzack S.: *Toleranzmanagement in Konzept- und früher Entwurfsphase: Erste Ansätze und Potentiale.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 5. Oktober 2017).

Götz S., Schleich B., Wartzack S.: *Graphenbasierte Toleranzbetrachtung in der frühen Entwurfsphase des Produktentwicklungsprozesses.* Summer School Toleranzmanagement 2017 (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Hallmann M.: *Statistische Toleranz-Kosten-Optimierung mit diskreten Toleranzwerten und mehrstufigem Kostenmodell.* Summer School Toleranzmanagement 2017 (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Hasse A., Franz M., Mauser K.: *Synthesis of Compliant Mechanisms with defined kinematics. Microactuators and Micromechanisms (MAMM)* (Ilmenau, 5. Oktober 2016 - 7. Oktober 2016). DOI: 10.1007/978-3-319-45387-3_20

Heling B., Hallmann M., Wartzack S.: *Hybrid Tolerance Representation of Systems in Motion.* 27th CIRP Design Conference (Cranefield, 10. Mai 2017 - 12. Mai 2017). DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.048

Heling B., Oberleiter T., Schleich B., Willner K., Wartzack S.: *Comparison of Different Sensitivity Analysis Methods in the Context of Dimensional Management.* ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Tampa, Florida, USA, 3. November 2017 - 9. November 2017). DOI: 10.1115/IMECE2017-70550

Heling B., Schleich B., Wartzack S.: *Interdisziplinäres prozessorientiertes Toleranzmanagement – ein Konzept.* Summer School Toleranzmanagement (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Hochrein D., Graf-Goller O., Tremmel S., Wartzack S.: *Vorstellung einer neuen Prüfstandsgruppe zur Untersuchung des Fliehkrafteinflusses auf das Reibungsmoment von Wälzlagern.* In: Tribologie und Schmierungstechnik 64 (2017), S. 47 – 54

Hochrein D., Tremmel S., Graf-Goller O., Hahn B., Wartzack S.: *Experimental Investigations of Rolling Element Bearings Exposed to Centrifugal Load at a Centripetal Acceleration up to 3 000 Times Gravity.* The 6th World Tribology Congress (Beijing, 17. September 2017 - 22. September 2017).

Hochrein D., Tremmel S., Graf-Goller O., Wartzack S.: *Untersuchung des Reibungsverhaltens von Wälzlagern unter dem Einfluss von Zentripetalbeschleunigungen zur energieeffizienten Gestaltung von Lagerungen.* 12. VDI-Fachtagung. Gleit- und Wälzlagerungen 2017. Gestaltung - Berechnung - Einsatz - mit Fachausstellung (Schweinfurt, 27. Juni 2017 - 28. Juni 2017).

Häfner T., Heberle J., Hautmann H., Zhao R., Tenner J., Tremmel S., Merklein M., Schmidt M.: *Effect of picosecond laser based modifications of amorphous carbon coatings on lubricant-free tribological systems.* In: Journal of Laser Micro Nanoengineering 12 (2017), S. 132-140. DOI: 10.2961/jlmn.2017.02.0015

Jüttner M., Hasse A., Tremmel S.: *Flexure pitch bearing concept for individual pitch control of wind turbines.* In: Wind Energy (2017). DOI: 10.1002/we.2149

Kellermeyer M., Perterer M., Wartzack S.: *Robust optimization of continuously reinforced composites in the motorcycle industry*. In: RDO-Journal (2017).

Kestel P., Luft T., Schon C., Kügler P., Bayer T., Schleich B., Staab S., Wartzack S.: *Konzept zur zielgerichteten, ontologiebasierten Wiederverwendung von Produktmodellen.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 5. Oktober 2017).

Kett S., Schmitt B., Wartzack S.: *What the Statistics Tell Us—How to Use Empiric Data in Design for Emotional Impressions.* In: Chakrabarti A, Chakrabarti D (Hrsg.): Research into Design for Communities, Volume 2, Singapore: Springer Nature, 2017, S. 659 - 669 (Smart Innovation, Systems and Technologies, Bd.66).

Kett S., Wartzack S.: *Universal Design—An Old-Fashioned Paradigm?*. In: Shuichi Fukuda (Hrsg.): Emotional Engineering, Springer International Publishing, 2017, S. 55-67. DOI: 10.1007/978-3-319-53195-3

Kett S., Wartzack S.: *Considering Users' Emotions in Product Development Processes and the Need to Design for Attitudes.* In: Shuichi Fukuda (Hrsg.): Emotional Engineering, Springer International Publishing, 2017, S. 69-97. DOI: 10.1007/978-3-319-53195-3

Krüger D., Wartzack S.: *A contact model to simulate human–artifact interaction based on force optimization: implementation and application to the analysis of a training machine.* In: Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 20 (2017), S. 1589-1598. DOI: 10.1080/10255842.2017.1393804

Luft T., Roth D., Binz H., Wartzack S.: *A new "knowledge-based engineering" guideline.* 21st International Conference on Engineering Design (ICED17) (Vancouver, 21. August 2017 - 25. August 2017).

Luft T., Roth D., Wartzack S., Binz H.: *Die neue VDI-Richtlinie 5610 Blatt 2 „Wissensbasierte Konstruktion".* Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (Stuttgart, 28. Juni 2017 - 29. Juni 2017).

Luft T., Rupprecht S., Wartzack S.: *A concept and prototype for a new app to support collaborative and multi-criteria decision making in product development.* 21st International Conference on Engineering Design (ICED17) (Vancouver, 21. August 2017 - 25. August 2017).

Luft T., Schuh P., Wartzack S.: *A Software Tool for the Graph-Based Visualization of Complex Relations Between Product Properties and Characteristics.* In: Amaresh Chakrabarti; Debkumar Chakrabarti (Hrsg.): Research into Design for Communities, Volume 1 Proceedings of ICoRD 2017, Singapore: Springer Nature, 2017, S. 745-756 (Smart Innovation, Systems and Technologies, Bd.Volume 65). DOI: 10.1007/978-981-10-3518-0

Marian M., Weschta M., Tremmel S., Wartzack S.: *Simulation of Microtextured Surfaces in Starved EHL Contacts Using Commercial FE Software.* In: Materials Performance and Characterization 6 (2017), S. 165 – 181. DOI: 10.1520/MPC20160010

Marian M., Weschta M., Tremmel S., Wartzack S.: *Einfluss masseerhaltender Kavitationsmodelle bei der Simulation hydro- und elastohydrodynamischer Kontakte.* In: Tribologie und Schmierungstechnik 64 (2017), S. 29-34

Marian M., Zahner M., Tremmel S., Andreas K., Merklein M., Wartzack S.: *Design, Manufacturing and Tribological Performance of Microtextured Bucket Tappets for Friction Reduction in the Valve Train.* 6th World Tribology Congress (Beijing/China, 17. September 2017 - 22. September 2017).

Müller M., Tremmel S.: *An Experimental Study regarding Maintainability of a Rolling Bearing Arrangement Equipped with a Ring Lubricator for Oil Supply.* In: Bearing World Journal 2 (2017), S. 25 – 34.

Nowak A., Willner K., Campanile LF., Hasse A.: *Active Vibration Control of Excited Structures by means of Shape Adaption.* International Conference on Adaptive Structures and Technologies (Krakau, 8. Oktober 2017 - 11. Oktober 2017).

Retzer U., Will T., Zigan L., Will S.: *Fluorescence Characteristics of the Fuel Tracer 1-Methylnaphthalene for the Investigation of Air-Fuel Ratio at Elevated Pressures and Temperatures.* 8th European Combustion Meeting (Dubrovnik, 18. April 2017 - 21. April 2017).

Sauer C., Küstner C., Schleich B., Wartzack S.: *Einsatz von Deep Learning zur ortsaufgelösten Beschreibung von Bauteileigenschaften.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 5. Oktober 2017).

Schleich B.: *Skin Model Shapes: A new Paradigm for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering.* Düsseldorf: VDI Verlag, 2017. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1 (Konstruktionstechnik / Maschinenelemente), Bd.438).

Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S.: *Shaping the digital twin for design and production engineering.* In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 66 (2017), S. 141–144. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.040

Schleich B., Wartzack S.: *Skin Model Shapes: ein neuer Ansatz zur Toleranzsimulation auf Basis von Punktwolken und Oberflächennetzen.* In: Konstruktion 69 (2017), S. 86-90.

Schleich B., Wartzack S.: *Challenges of Geometrical Variations Modelling in Virtual Product Realization*. 27th CIRP Design Conference (Cranfield, 10. Mai 2017 - 12. Mai 2017). DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.019

Schleich B., Wartzack S.: *Toleranzmanagement 4.0: Chancen und Herausforderungen der zunehmenden Digitalisierung in der Fertigung für das Toleranzmanagement.* Summer School Toleranzmanagement 2017 (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Schleich B., Wartzack S.: *Motion Tolerancing Based on Skin Model Shapes by Form Deviation Parametrization and Meta-Modelling.* ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Cleveland, Ohio, USA, 6. August 2017 - 9. August 2017). DOI: 10.1115/DETC2017-67227

Schweigert S., Luft T., Wartzack S., Lindemann U.: *Combination of Matrix-based and Graph-based Modeling for Product and Organizational Structures.* 19th International Dependency and Structure Modelling Conference (DSM 2017) (Helsinki, 11. September 2017 - 13. September 2017).

Sprügel T., Schröppel T., Wartzack S.: *GENERIC APPROACH TO PLAUSIBILITY CHECKS FOR STRUCTURAL MECHANICS WITH DEEP LEARNING.* In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017, 2017, S. 299 – 308.

Striegel S., Schleich B., Ehlert M., Zielinski D., Wartzack S.: *Visuelle Unterstützung der Toleranzanalyse in der industriellen Anwendung.* Summer School Toleranzmanagement 2017 (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Striegel S., Schleich B., Zielinski D., Wartzack S.: *Automotive Premium Quality Improvement by High-End-Visualization.* ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Tampa, Florida, USA, 3. November 2017 - 9. November 2017). DOI: 10.1115/IMECE2017-71218

Tenner J., Häfner T., Zhao R., Andreas K., Schmidt M., Tremmel S., Merklein M.: *Analysis of tool-sided surface modifications for dry deep drawing of deep drawing steel and aluminum alloys in a model process.* In: Dry Metal Forming Open Access Journal 3 (2017), S. 30-40.

Tremmel S., Marian M., Zahner M., Weschta M., Engel U., Wartzack S., Merklein M.: *Reibungsreduzierung in EHD-Kontakten durch mikrostrukturierte Bauteiloberflächen - Auslegung, Gestaltung und umformtechnische Herstellung.* 58. Tribologie-Fachtagung 2017. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen. (Göttingen, 25. September 2017 - 27. September 2017).

Tremmel S., Winkler A.: *Auslegungsgrundlage für die axiale Belastbarkeit von mittels Spannhülsen auf glatten Wellen befestigten Wälzlagern.* In: Konstruktion 69 (2017), S. 78-85.

Vierneusel B., Benker L., Tremmel S., Göken M., Merle B.: *Isolating the effect of residual stresses on coating wear by a mechanical stress relaxation technique.* In: Thin Solid Films 638 (2017), S. 159 – 166. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.06.016

Völkl H., Franz M., Wartzack S.: *Topologieoptimierung mit transversal isotropem Materialmodell – Produktentwickler auf der Suche nach der optimalen Geometrie für Faser-Kunststoff-Verbunde.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 5. Oktober 2017).

Wartzack S.: *Vision Toleranzmanagement 4.0.* In: Konstruktion 69 (2017), S. 3

Wartzack S., Küstner C.: *Maschinelles Lernen zur schallemissionsarmen Entwicklung von Maschinen.* In: WiGeP News (2017), S. 17.

Wartzack S., Sauer C., Küstner C.: *What does Design for Production mean? – From Design Guidelines to Self-learning Engineering Workbenches.* 11th International Workshop on Integrated Design Engineering (Magdeburg, 5. April 2017 - 7. April 2017).

Wartzack S., Schleich B., Aschenbrenner A., Heling B.: *Toleranzmanagement im Kontext von Industrie 4.0.* In: ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017), S. 170-172. DOI: 10.3139/104.111680

Wartzack S., Schleich B., Heling B., Aschenbrenner A., Götz S.: *Toleranzmanagement am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik.* Summer School Toleranzmanagement 2017 (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Winkler A.: *Statistische Toleranzanalyse mithilfe von Familientabellen-basierten Skelettmodellen.* Summer School Toleranzmanagement (Erlangen, 20. September 2017 - 21. September 2017).

Witzgall C., Wartzack S.: *Experimental and simulative assessment of crashworthiness of mechanically aged short-fibre reinforced thermoplastics.* International Conference on Engineering Design, ICED (Vancouver, 21. August 2017 - 25. August 2017).

Wolf A., Miehling J., Wartzack S.: *Einsatz von Rousseau Modellen für die Vorhersage menschlicher Bewegung zur muskuloskelettalen Simulation im AnyBody Modeling System.* 7. CADFEM medical conference (Koblenz, 15. November 2017 - 17. November 2017).

Wolf A., Miehling J., Wartzack S.: *Vorgehensweisen zur Vorhersage menschlicher Bewegung durch muskuloskelettale Simulation.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 5. Oktober 2017).

Zhao R., Steiner J., Andreas K., Merklein M., Tremmel S.: *Investigation of tribological behaviour of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys.* In: Tribology International (2017). DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.031

Zöller S., Schröppel T., Wartzack S.: *Ein Vergleich von Datenanalysemethoden für eine Affective Engineering Methode.* 28. DfX-Symposium (Bamberg, 4. Oktober 2017 - 5. Oktober 2017).

2018

Dahiwal R., Aschenbrenner A., Schleich B., Wiesker S., Kiekbusch T., Tremmel S., Wartzack S., Sauer B.: *Evaluation of the effects of geometrical deviations on the fatigue life and vibrations of cylindrical roller bearings.* In: Bearing World Journal 3 (2018), S. 7-21.

Dworschak F., Küstner C., Schleich B., Wartzack S.: *Szenario-Analyse zur Digitalisierung und Automatisierung des Produktentwicklungsprozesses.* 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (Bayreuth, 11. Oktober 2018 - 12. Oktober 2018).

Dworschak F., Schleich B., Wartzack S.: *Scenario analysis and potential identification to structure of the roadmap to autonomous design.* 11th Graz Symposium VIRTUAL VEHICLE (Graz, 15. Mai 2018 - 16. Mai 2018).

Götz S., Schleich B., Wartzack S.: *A new approach to first tolerance evaluations in the conceptual design stage based on tolerance graphs.* 15th CIRP CAT 2018 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Mailand, 11. Juni 2018 - 13. Juni 2018). DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.030.

Götz S., Schleich B., Wartzack S.: *CAD-based Tolerance Analysis in Preliminary Design Stages Enabling Early Tolerance Evaluation.* ASME IMECE - International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Pittsburgh, 9. November 2018 - 15. November 2018). DOI: 10.1115/IMECE2018-86396

Hallmann M., Kunz D., Schleich B., Wartzack S.: *Analyse anlagenspezifischer Fertigungseinflüsse auf die Genauigkeit FDM-gedruckter Bauteile.* 29. DfX-Symposium (Tutzing, 25. September 2018 - 26. September 2018).

Hallmann M., Schleich B., Heling B., Aschenbrenner A., Wartzack S.: *Comparison of different methods for scrap rate estimation in sampling-based tolerance-cost-optimization.* 15th CIRP CAT 2018 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Mailand, 11. Juni 2018 - 13. Juni 2018). DOI: 10.1016/j.procir.2018.01.005

Hallmann M., Sprügel T., Kelber V., Schleich B., Wartzack S.: *Steigerung der Bauteilqualität durch Erhöhung der Anlagensteifigkeit eines FDM-Druckers.* In: Konstruktion 70 (2018), S. 73-76.

Heling B., Schleich B., Wartzack S.: *Robust-Design-Optimization of mechanisms based on kinematic requirements considering uncertainties.* 15th CIRP CAT 2018 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Mailand, 11. Juni 2018 - 13. Juni 2018). DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.048

Hochrein D., Tremmel S., Wartzack S.: *Temperature Behavior of Rolling Bearings Exposed to Centripetal Acceleration.* Bearing World. International Bearing Conference. The Expert Forum for Bearings - Rolling and Plain Bearings! (Kaiserslautern, 6. März 2018 - 7. März 2018).

Häfner T., Rothammer B., Tenner J., Krachenfels K., Merklein M., Tremmel S., Schmidt M., Schmidt M.: *Adaption of tribological behavior of a-C:H coatings for application in dry deep drawing.* In: MATEC Web of Conferences 190 (2018), S. 1 – 10. DOI: 10.1051/matecconf/201819014002

Kröner J., Kursawe S., Musayev Y., Tremmel S.: *Tribological Behaviour of PVD-Coated Dry-Running Rolling Bearings.* The 18th Nordic Symposium on Tribology – NORDTRIB 2018 (Uppsala, 18. Juni 2018 - 21. Juni 2018).

Kügler P., Kestel P., Schon C., Marian M., Schleich B., Staab S., Wartzack S.: *Ontology-based approach for the use of Intentional Forgetting in product development.* DESIGN 2018 - 15th International Design Conference (Dubrovnik, 21. Mai 2018 - 24. Mai 2018). DOI: 10.21278/idc.2018.0402

Kügler P., Schleich B., Wartzack S.: *Consistent digitalization of engineering design – an ontology-based approach.* Norddesign (Linköping, 14. August 2018 - 17. August 2018).

Marian M., Grützmacher P., Tremmel S., Rosenkranz A., Mücklich F., Wartzack S.: *Experimental and Numerical Studies on Microtextured Surfaces for Sliding Point Contacts under EHL Conditions.* The 18th Nordic Symposium on Tribology – NORDTRIB 2018 (Uppsala, 18. Juni 2018 - 21. Juni 2018).

Marian M., Tremmel S., Wartzack S.: *Microtextured surfaces in higher loaded rolling-sliding EHL line-contacts.* In: Tribology International 127 (2018), S. 420-432. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.06.024

Meinel A., Tremmel S.: *An Experimental Study of the Effects of Dynamic Shaft Movements on Friction in Cylindrical Roller Bearings.* Bearing World (Kaiserslautern, 6. März 2018 - 7. März 2018).

Meinel A., Tremmel S.: *Die Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung, Verschleiß und Schmierung in Zylinderrollenlagern.* 59. Tribologie-Fachtagung. Reibung, Schmierung und Verschleiß (Göttingen, 24. September 2018 - 26. September 2018).

Meinel A., Tremmel S.: *Friction Losses of Cylindrical Roller Bearings Due to Axially Oscillating Shafts.* 73rd STLE Annual Meeting and Exhibition (Minneapolis, 20. Mai 2018 - 24. Mai 2018).

Miehling J.: *Berücksichtigung biomechanischer Zusammenhänge in der nutzergruppenspezifischen virtuellen Produktentwicklung.* Düsseldorf: VDI Verlag, 2018 (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1 (Konstruktionstechnik / Maschinenelemente), Bd.445).

Miehling J., Wolf A., Wartzack S.: *Musculoskeletal Simulation and Evaluation of Support System Designs.* In: Karafillidis, Athanasios; Weidner, Robert (Hrsg.): Developing Support Technologies - Integrating Multiple Perspectives to Create Assistance that People Really Want, Springer, 2018, S. 219-227 (Biosystems & Biorobotics, Bd.23). DOI: 10.1007/987-3-030-01836-8_21

Oberleiter T., Heling B., Schleich B., Willner K., Wartzack S.: *Fuzzy Sensitivity Analysis in the Context of Dimensional Management.* In: ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering Volume 5 (2018), S. 011008-1 - 011008-7. DOI: 10.1115/1.4040919

Pabst A., Tremmel S., Wartzack S.: 転がり軸受部品における圧縮残留応力とその寿命に及ぼす影響の計算と実験的研究 *(Deutsch: Rechnerische und experimentelle Untersuchung des Einflusses von Druckeigenspannungen in Wälzlagerkomponenten und deren Auswirkung auf die Lebensdauer).* In: Machine design 62 (2018), S. 113 – 119.

Peters M., Quadrat E., Nolte A., Wolf A., Miehling J., Wartzack S., Leidholdt W., Bauer S., Fritzsche L., Wischniewski, S.: *Biomechanical Digital Human Models: Chances and Challenges to Expand Ergonomic Evaluation.* 1st International Conference on Human Systems Engineering and Design (Reims, 25. Oktober 2018 - 27. Oktober 2018).

Rathert T., Witzgall C., Wartzack S.: *Modular rapid design of multi-material lightweight truss structures – A novel approach.* 1st Symposium for Lightweight Design and Product Development (Zürich, 13. Juni 2018 - 15. Juni 2018). DOI: 10.3929/ethz-b-000283432

Rothammer B., Weikert T., Tremmel S., Wartzack S.: *Tribologisches Verhalten amorpher Kohlenstoffschichten auf Metallen für die Implantologie im Zustand der Grenzreibung.* 59. Tribologie-Fachtagung. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen. (Göttingen, 24. September 2018 - 26. September 2018).

Sauer C., Dworschak F., Schleich B., Wartzack S.: *Einsatz von Process-Mining zur Erweiterung der semantischen Produktbeschreibung.* 29. DfX-Symposium (Tutzing, 25. September 2018 - 26. September 2018).

Sauer C., Kügler P., Kestel P., Graf M., Göbel K., Niessen C., Schleich B., Wartzack S.: *Ein ontologiebasierter Ansatz zur Wissensrepräsentation für die smarte Produktentwicklung.* 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2018 (Bayreuth, 11. Oktober 2018 - 12. Oktober 2018).

Sauer C., Schleich B., Wartzack S.: *Deep learning in sheet-bulk metal forming part design.* DESIGN 2018 - 15th Internaional Design Conference (Dubrovnik, 21. Mai 2018 - 24. Mai 2018). DOI: 10.21278/idc.2018.0147

Schleich B., Wartzack S.: *Novel approaches for the assembly simulation of rigid Skin Model Shapes in tolerance analysis.* In: Computer-Aided Design 101 (2018), S. 1-11. DOI: 10.1016/j.cad.2018.04.002

Schleich B., Wartzack S.: *An Approach to the Sensitivity Analysis in Variation Simulations considering Form Deviations.* 15th CIRP CAT 2018 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Mailand, 11. Juni 2018 - 13. Juni 2018). DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.314

Schleich B., Wartzack S.: *Gap hull estimation for rigid mechanical joints considering form deviations and multiple pairs of mating surfaces.* In: Mechanism and Machine Theory 128 (2018), S. 444-460. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.06.014

Schleich B., Wärmefjord K., Söderberg R., Wartzack S.: *Geometrical Variations Management 4.0: towards next Generation Geometry Assurance.* 15th CIRP CAT 2018 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (Mailand, 11. Juni 2018 - 13. Juni 2018). DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.078

Schon C., Staab S., Kügler P., Kestel P., Schleich B., Wartzack S.: *Metaproperty-guided Deletion from the Instance-Level of a Knowledge Base.* EKAW 2018 (Nancy, 12. November 2018 - 16. November 2018).

Schröppel T., Wartzack S.: *Making a difference: Integrating physiological and psychological needs in user description.* NordDesign (Linköping, Schweden, 14. August 2018 - 17. August 2018).

Sprügel T., Rothfelder R., Bickel S., Grauf A., Sauer C., Schleich B., Wartzack S.: *Methodology for plausibility checking of structural mechanics simulations using Deep Learning on existing simulation data.* NordDesign 2018 (Linköping, 14. August 2018 - 17. August 2018).

Sprügel T., Schleich B., Wartzack S.: *Simulations-DNA: Datengetriebener Ansatz zur automatischen Plausibilitätsprüfung strukturmechanischer FE-Simulationen mittels Deep Learning.* 19. VDI-Kongress "SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung" (Baden Baden, 20. November 2018 - 21. November 2018).

Tenner J., Häfner T., Rothammer B., Krachenfels K., Zhao R., Schmidt M., Tremmel S., Merklein M.: *Influence of laser generated micro textured coated tool surfaces on dry deep drawing processes.* In: Dry Metal Forming Open Access Journal 4 (2018), S. 35 – 46.

Tremmel S., Marian M., Zahner M., Wartzack S., Merklein M.: *Friction reduction in EHL contacts by surface microtexturing – tribological performance, manufacturing and tailored design.* In: Industrial Lubrication and Tribology (2018). DOI: 10.1108/ILT-08-2018-0306

Tüchsen J., Koch M., Schleich B., Wartzack S.: *Konzeption eines Assistenzsystems für die modulare und datengetriebene Entwicklung elektrischer Antriebe.* 19. VDI-Kongress SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung (Baden-Baden, 20. November 2018 - 21. November 2018).

Tüchsen J., Obendorfer M., Luft T., Schleich B., Wartzack S.: *Methode zur Einbindung von heuristischem Wissen in die erweiterte matrixbasierte Produktbeschreibung.* 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (Bayreuth, 11. Oktober 2018 - 12. Oktober 2018).

Tüchsen J., Pop AC., Koch M., Schleich B., Wartzack S.: *Data Driven Design Selection and Generation - An Industrial Case Study on Electric Motors.* DESIGN 2018 - 15th International Design Conference (Dubrovnik, 21. Mai 2018 - 24. Mai 2018). DOI: 10.21278/idc.2018.0223

Tüchsen J., Richter M., Heydenreich J., Koch M., Schleich B., Wartzack S.: *Wissensbasierte und berechnungsunterstützte Konzeptabsicherung in den frühen Phasen der Produktentwicklung am Beispiel des Elektromotors.* In: Albert Roger Oswald, NAFEMS Deutschland (Hrsg.): NAFEMS Online-Magazin, 2018, S. 46 - 52 (NAFEMS Online-Magazin, Bd.47).

Tüchsen J., Richter M., Heydenreich J., Koch M., Schleich B., Wartzack S.: *Knowledge-based and calculation-supported concept validation in the early stages of product development using the example of the electric motor*. NAFEMS 18 DACH Conference (Bamberg, 14. Mai 2018 - 16. Mai 2018).

Vajna S., Weber C., Zeman K., Hehenberger P., Gerhard D., Wartzack S.: *CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung.* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-54624-6

Völkl H., Franz M., Wartzack S.: *A Case Study on Established and New Approaches for Optimized Laminate Design.* 18th European Conference on Composite Materials (Athen, 24. Juni 2018 - 28. Juni 2018).

Völkl H., Franz M., Wartzack S.: *Computer Aided Internal Optimization (CAIO) method for fiber trajectory optimization: enhancing applicability.* 1st Symposium for Lightweight Design and Product Development (Zürich, 13. Juni 2018 - 15. Juni 2018).

Völkl H., Klein D., Franz M., Wartzack S.: *An efficient bionic topology optimization method for transversely isotropic materials.* In: Composite Structures (2018), S. 359-367. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.079

Völkl H., Wartzack S.: *Design for composites: Tailor-made, bio-inspired topology optimization for fiber-reinforced plastics.* DESIGN 2018 - 15th International Design Conference (Dubrovnik, 21. Mai 2018 - 24. Mai 2018). DOI: 10.21278/idc.2018.0126

Wartzack S., Meerkamm H., Bauer S., Krehmer H., Stockinger A., Walter M., Schleich B.: *Design for X (DFX).* In: Frank Rieg; Rolf Steinhilper (Hrsg.): Handbuch Konstruktion, München: Carl Hanser Verlag, 2018, S. 465-484. DOI: 10.3139/9783446456198.016

Wartzack S., Schleich B.: *3. Summer School "Toleranzmanagement" und 28. Symposium "Design for X".* In: WiGeP News (2018), S. 21-21.

Weikert T., Tremmel S.: *Wear Detection using Carbon-Based Sensor Coatings – a novel approach.* The 18th Nordic Symposium on Tribology – NORDTRIB 2018 (Uppsala, 18. Juni 2018 - 21. Juni 2018).

Wolf A., Wartzack S.: *Parametric movement synthesis: towards virtual optimisation of man-machine interaction in engineering design.* DESIGN 2018 - 15th International Design Conference (Dubrovnik, 21. Mai 2018 - 24. Mai 2018). DOI: 10.21278/idc.2018.0400

Zöller S., Schröppel T., Wartzack S.: *Emotional Bionics - A Pickup truck is a Lion! A Study Using Emotional Profiling to Analyse Bionic Analogies in Car Design.* International Conference on Kansei Engineering and Emotiona Research (Kuching, Sarawak, Malaysia, 19. März 2018 - 22. März 2018).

2019

Aschenbrenner A., Schleich B., Wartzack S.: *An Overview and Classification of Tolerance Compensation Methods.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019) In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.354

Bickel S., Sprügel T., Schleich B., Wartzack S.: *How Do Digital Engineering and Included AI Based Assistance Tools Change the Product Development Process and the Involved Engineers.* International Conference on Engineering Design, ICED19 (Delft, 5. August 2019-8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: DOI:10.1017/dsi.2019.263

Dorschky E., Krüger D., Kurfess N., Schlarb H., Wartzack S., Eskofier B., van den Bogert AJ.: *Optimal control simulation predicts effects of midsole materials on energy cost of running.* In: Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (2019). DOI: 10.1080/10255842.2019.1601179

Dworschak F., Kügler P., Schleich B., Wartzack S.: *Integrating The Mechanical Domain Into Seed Approach.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.265

Dworschak F., Tüchsen J., Pinto D., Pop AC., Schleich B., Wartzack S.: *On Simulation Knowledge Acquisition Using Gaussian Processes for the Design of Electric Motors.* 29th CIRP Design 2019 (Póvoa de Varzim, 8. Mai 2019 - 10. Mai 2019). In: Putnik, Goran D. (Hrsg.): Procedia CIRP Volume 84 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.266

Dworschak F., Zirngibl C., Schleich B., Wartzack S.: *Konzept für den MBSE-Einsatz zur automatisierten Individualisierung von komplexen Produkten.* 30. DfX-Symposium (Jesteburg, 18. September 2019 - 19. September 2019). In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Beiträge zum 30. DfX-Symposium, Hamburg: 2019. DOI: 10.35199/dfx2019.24

Franz M., Schleich B., Wartzack S.: *Variation Analysis of Design Parameters of Fibre-Reinforced Plastic Parts.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.279

Fresemann C., Stark R., Sauer C., Schleich B., Wartzack S.: *Lücken und Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung des Model-Based Systems Engineering.* In: Konstruktion 71 (2019), S. 81-83

Gerschütz B., Fechter M., Schleich B., Wartzack S.: *A Review of Requirements and Approaches for Realistic Visual Perception in Virtual Reality.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.195

Gerschütz B., Fechter M., Schleich B., Wartzack S.: *Konzept zur Verbesserung des realitätsgetreuen, visuellen Erlebens in virtuellen Umgebungen durch Eye-Tracking.* EEE 2019 (Dresden, 27. Juni 2019 - 28. Juni 2019). In: Ralph H. Stelzer, Jens Krzywinski (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019, Dresden: 2019

Götz S., Hartung J., Schleich B., Wartzack S.: *Robustness Evaluation of Product Concepts based on Function Structures.* 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.359

Hallmann M., Götz S., Schleich B.: *Mapping of GD&T information and PMI between 3D product models in the STEP and STL format.* In: Computer-Aided Design 115 (2019), S. 293-306. DOI: 10.1016/j.cad.2019.06.006

Hallmann M., Götz S., Schleich B., Wartzack S.: *Optimization of Build Time and Support Material Quantity for the Additive Manufacturing of Non-Assembly Mechanisms.* 29th CIRP Design 2019 (Póvoa de Varzim, 8. Mai 2019 - 10. Mai 2019). In: Putnik, Goran D. (Hrsg.): Procedia CIRP Volume 84 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.197

Hallmann M., Schleich B., Wartzack S.: *A Method for Analyzing the Influence of Process and Design Parameters on the Build Time of Additively Manufactured Components.* 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: DOI: 10.1017/dsi.2019.69

Hartwich TS., Völkl H., Franz M., Witzgall C., Krause D., Wartzack S.: *Zur Notwendigkeit eines konstruktionsmethodischen Ansatzes für die zeitfeste Auslegung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile.* 30. DfX-Symposium (Jesteburg, 18. September 2019 - 19. September 2019). In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 30. DfX-Symposium 2019

Heling B., Oberleiter T., Rohrmoser A., Kiener C., Schleich B., Hagenah H., Merklein M., Willner K., Wartzack S.: *Berücksichtigung von produktionsspezifischen Abweichungen im interdisziplinären Toleranzmanagement.* Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271 (Erlangen, 5. Februar 2019 - 5. Februar 2019). In: Wartzack (Hrsg.): Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, Stamsried: 2019

Heling B., Oberleiter T., Rohrmoser A., Kiener C., Schleich B., Hagenah H., Merklein M., Willner K., Wartzack S.: *A concept for process-oriented interdisciplinary tolerance management considering production-specific deviations.* 22nd International Conference on Engineering Design (ICED) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.351

Heling B., Oberleiter T., Schleich B., Willner K., Wartzack S.: *On the Selection of Sensitivity Analysis Methods in the Context of Tolerance Management.* In: Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification 4 (2019), S. 011001:1-011001:10. DOI: 10.1115/1.4043912

Heling B., Schleich B., Wartzack S.: *Virtuelle und experimentelle Toleranzuntersuchungen abweichungsbehafteter Baugruppen.* Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271 (Erlangen, 5. Februar 2019 - 5. Februar 2019). In: Wartzack (Hrsg.): Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, Stamsried: 2019

Horber D., Schleich B., Wartzack S.: *Ein Klassifizierungssystem zur Anforderungssystematisierung.* 30. DfX-Symposium (Jesteburg, 18. September 2019 - 19. September 2019). In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 30. DfX-Symposium 2019. DOI: 10.35199/dfx2019.20

Kestel P., Kügler P., Zirngibl C., Schleich B., Wartzack S.: *Ontology-based approach for the provision of simulation knowledge acquired by Data and Text Mining processes.* In: Advanced Engineering Informatics 39 (2019), S. 292-305. DOI: 10.1016/j.aei.2019.02.001

Krachenfels K., Rothammer B., Tremmel S., Merklein M.: *Experimental investigation of tool-sided surface modifications for dry deep drawing processes at the tool radii area.* In: Procedia Manufacturing 29 (2019), S. 201-208. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.127

Kraus M., Hufnagel T., Merklein M.: *Accuracy of conventional FE-Models in Bulk-Forming of Micropins from Sheet Metal.* In: Journal of Micro and Nano-Manufacturing (2019), Art.Nr.: 010902. DOI: 10.1115/1.4042965

Kröner J., Tremmel S., Wartzack S.: *Untersuchungen an a-C:H:Me-beschichteten Rillenkugellagern unter Trockenlaufbedingungen.* 60th German Tribology Conference 2019. Friction, Lubrication and Wear. Research and Practical Applications. (Göttingen, 23. September 2019 - 25. September 2019). In: Gesellschaft für Tribologie e.V. (Hrsg.): 60. Tribologie-Fachtagung 2019. Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen., Stolberg-Venwegen: 2019

Kügler P., Schon C., Schleich B., Staab S., Wartzack S.: *Cascading Forgetting in Product Development – Challenges and Evaluation.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.259

Marian M., Grützmacher P., Rosenkranz A., Tremmel S., Mücklich F., Wartzack S.: *Designing surface textures for EHL point-contacts - Transient 3D simulations, meta-modeling and experimental validation.* In: Tribology International 137 (2019), S. 152 – 163. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.052

Marian M., Rothammer B., Tremmel S.: *Soft EHL Modeling of Total Knee Arthroplasties.* International Tribology Conference Sendai 2019 (Sendai, 17. September 2019 - 21. September 2019)

Marian M., Tremmel S., Wartzack S.: *Numerical Investigations on Dimensional and Geometrical Deviations of Surface Textures in EHL Contacts.* International Tribology Conference Sendai 2019 (Sendai, 17. September 2019 - 21. September 2019)

Marian M., Tremmel S., Wartzack S.: *Knowledge-based design of surface textures for TEHL contacts.* 3rd Young Tribological Researcher Symposium (Wiener Neustadt, 9. Mai 2019 - 10. Mai 2019)

Marian M., Weikert T., Tremmel S.: *Numerical and Experimental Studies on Friction Reduction by Surface Modification in TEHL Contacts.* 74th STLE Annual Meeting & Exhibition (Nashville, Tennessee, 19. Mai 2019 - 23. Mai 2019)

Meinel A., Tremmel S.: *An Empirical Investigation of the Impact of an Axially Oscillating Shaft on Friction and Lubrication in Cylindrical Roller Bearings.* In: Bearing World Journal (2019), S. 41 – 55

Miehling J.: *Musculoskeletal modeling of user groups for virtual product and process development.* In: Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (2019)

Müller A., Heling B., Schleich B., Oberleiter T., Willner K., Wartzack S., Hausotte T.: *Methoden zur Reduzierung und Berücksichtigung der Unsicherheiten von dimensionellen Messgrößen in der Toleranzanalyse.* Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271 (Erlangen, 5. Februar 2019 - 5. Februar 2019). In: Wartzack (Hrsg.): Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, Stamsried: 2019

Rohrmoser A., Heling B., Schleich B., Kiener C., Hagenah H., Wartzack S., Merklein M.: *A methodology for the application of virtual evaluation methods within the design process of cold forged steel pinions.* 22nd International Conference on Engineering Design (, 5. August 2019 - 9. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Delft, The Netherlands: 2019. DOI: DOI:10.1017/dsi.2019.352

Rothammer B., Weikert T., Tremmel S.: *Tribological Behavior of Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings on Metals for Total Knee Arthroplasty Under Boundary Friction Conditions.* International Tribology Conference Sendai 2019 (Sendai, 17. September 2019 - 21. September 2019)

Rothammer B., Weikert T., Tremmel S., Wartzack S.: *Tribologisches Verhalten amorpher Kohlenstoffschichten auf Metallen für die Knie-Totalendoprothetik.* In: Tribologie und Schmierungstechnik 66 (2019), S. 15-24. DOI: 10.30419/TuS-2019-0002

Rothammer B., Zhao R., Krachenfels K., Merklein M., Tremmel S.: *Investigation of the tribological performance of a-C:H coating systems by modifying adhesive layer for application in dry deep drawing.* International Tribology Conference Sendai 2019 (Sendai, 17. September 2019 - 21. September 2019)

Sauer C., Schleich B., Wartzack S.: *Einsatz von Graphdatenbanken für das Produktdatenmanagement im Kontext von Industrie 4.0.* EEE 2019 (Dresden, 27. Juni 2019 - 28. Juni 2019). In: Ralph H. Stelzer, Jens Krzywinski (Hrsg.): Entwickeln Entwerfen Erleben in Produktentwicklung und Design 2019, Dresden: 2019

Schröppel T., Diepold T., Miehling J., Wartzack S.: *A Concept for Physiological User Description in the Context of Dual User Integration.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.386

Schröppel T., Miehling J., Wartzack S.: *Roadmap für die Entwicklung einer Methodik zur dualen Nutzerintegration. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung* (Stuttgart, 16. Mai 2019 - 16. Mai 2019). In: H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath, D. Roth (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019: Stuttgart, 16. Mai 2019 | Wissenschaftliche Konferenz, Stuttgart: 2019. DOI: 10.18419/opus-10394

Schröppel T., Miehling J., Wartzack S.: *Konzept zur Identifikation relevanter Produkteigenschaften zur Unterstützung einer positiven User Experience.* EEE 2019 (Dresden, 27. Juni 2019 - 28. Juni 2019). In: Ralph H. Stelzer, Jens Krzywinski (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019, Dresden: 2019

Schubert D., Rohrmoser A., Hertle S., Wartzack S., Hagenah H., Merklein M., Drummer D.: *New Approach on the Allocation of Wear Allowances – a Case Study.* 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019-5. August 2019). DOI: 10.1017/dsi.2019.358

Schwarz S., Grillenberger H., Tremmel S.: *Kennzahl zur Identifikation der Wälzlagerkäfigdynamik.* 13. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen. Gestaltung - Berechnung - Einsatz (Schweinfurt, 5. Juni 2019 - 6. Juni 2019). In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Berichte 2348, Düsseldorf: 2019

Schwarz S., Grillenberger H., Tremmel S.: *Investigations on cage dynamics in rolling bearings by test and simulation.* 74th STLE Annual Meeting & Exhibition (Nashville, 19. Mai 2019 - 23. Mai 2019)

Tkany L., Hofstätter B., Petersik A., Miehling J., Wartzack S., Sesselmann S.: *A new design process for anatomically enhanced osteosynthesis plates.* In: Journal of Orthopaedic Research (2019). DOI: 10.1002/jor.24299

Tüchsen J., Dorsch J., Obendorfer M., Schleich B., Wartzack S.: *Unterstützung des Variantenmanagements von Elektromotoren durch wissensbasierte Systeme.* 30. DfX-Symposium (Jesteburg, 18. September 2019 - 19. September 2019). In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 30. DfX-Symposium 2019 2019. DOI: 10.35199/dfx2019.6

Tüchsen J., Pop AC., Koch M., Schleich B., Wartzack S.: *Data driven product portfolio analysis of electric motors based on product platforms using knowledge-based systems.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.260

Voelkel K., Rothemund M., Garibello SA., Kramer V., Pflaum H., Stahl K.: *On the Simulation of the Micro-Contact of Rough Surfaces Using the Example of Wet Friction Clutch Materials.* In: Lubricants 7 (2019). DOI: 10.3390/lubricants7050041

Völkl H., Kießkalt A., Wartzack S.: *Design for composites: Derivation of manufacturable geometries for unidirectional tape laying.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.275

Völkl H., Wartzack S.: *Effiziente, strukturierte Auslegung beanspruchungsgerechter Faserverbundbauteile.* 9. Landshuter Leichtbau-Colloquium (LLC) (Landshut, 27. Februar 2019 - 28. Februar 2019). In: Otto Huber, Marc Bicker, Peter Patzelt (Hrsg.): Tagungsband LLC 2019, Leichtbau in Forschung und industrieller Anwendung von der Nano- bis zur Makroebene, 2019

Wagner R., Schleich B., Haefner B., Kuhnle A., Wartzack S., Lanza G.: *Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products.* 29th CIRP Design Conference 2019 (Póvoa de Varzim, 8. Mai 2019 - 10. Mai 2019). In: Putnik, Goran D. (Hrsg.): Procedia CIRP Volume 84 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.219

Walbrun S., Wartzack S.: *Baukastensystem für CFK-Fachwerkstrukturen – Diskrete Optimierung der Strebenquerschnitte.* Design for X (Jesteburg, 18. September 2019 - 19. September 2019). In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 30. DfX-Symposium 2019. DOI: 10.35199/dfx2019.9

Wartzack S., Heling B., Schleich B.: *Vorstellung der Forschergruppe "Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden".* Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271 (Erlangen, 5. Februar 2019 - 5. Februar 2019)

Wartzack S., Schröppel T., Wolf A., Miehling J.: *Roadmap to Consider Physiological and Psychological Aspects of User-product Interactions in Virtual Product Engineering.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.406

Weikert T., Tremmel S.: *Dünnschichtsensoren zur Verschleißdetektion als Beitrag zur Auslegung intelligenter Werkzeuge – eine Machbarkeitsstudie.* 4. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2019 - DFG Transregio 73 (Hannover, 12. März 2019 - 12. März 2019)

Wirsching S., Bohnert C., Tremmel S., Wartzack S.: *Method for Calculating the Contact Between Roller End Face and Ring Flange In Multi-Body Simulations.* 74th STLE Annual Meeting & Exhibition (Nashville, Tennessee, 19. Mai 2019 - 23. Mai 2019)

Wirsching S., Schwarz S., Tremmel S.: *Einsatz analytisch beschreibbarer Geometrien zur Berechnung des Kontaktes zwischen Wälzkörper und Bord in Wälzlagersimulationen.* 60. Tribologie-Fachtagung 2019 (Göttingen, 23. September 2019 - 25. September 2019)

Wolf A., Binder N., Miehling J., Wartzack S.: *Towards Virtual Assessment of Human Factors: A Concept for Data-Driven Prediction and Analysis of Physical User-product Interactions.* International Conference on Engineering Design (ICED19) (Delft, 5. August 2019 - 8. August 2019). In: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Cambridge, United Kingdom: 2019. DOI: 10.1017/dsi.2019.410

Wolf A., Krüger D., Miehling J., Wartzack S.: *Approaching an ergonomic future: An affordance-based interaction concept for digital human models.* 29th CIRP Design 2019 (Póvoa de Varzim, 8. Mai 2019 - 10. Mai 2019). In: Putnik, Gordan D. (Hrsg.): Procedia CIRP Volume 84 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.198

Wolf A., Miehling J., Quadrat E., Nolte A., Fritzsche L., Bauer S., Spitzhirn M., Peters M., Leidholdt W., Wischniewski S., Wartzack S.: *Virtuelles Planen und Bewerten menschlicher Arbeit.* In: Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin: ASU - Zeitschrift für medizinische Prävention 06-2019 (2019), S. 372-375

Zöller S., Schröppel T., Wartzack S.: *Introducing Emotional Bionics to Support Subjective Value Creation in Technical Products.* In: International Journal of Affective Engineering 18 (2019), S. 67-76. DOI: 10.5057/ijae.IJAE-D-18-00013

„Konzeptentwicklung für
mit Individual Pitch Control

INNOVATION AWARD 2017
SCHAEFFLER FAG STIFTUNG

SCIENTIFIC A

Mit der Verleihung des Scie
der prostep ivip

Patricia

die mit ihrer M

Einsatz von Mec
intentionalen V
ontologiebasierten

einen zukunftsweisenden Beitrag
virtuellen Produktents

Darmstadt, April 2018

Armin Hoffacker
Vorstandsmitglied

Prof. Dr. Oliver Riedel
Vorstandsvorsitzender

FSB

DESIGN 2018

OUTSTANDING CONTRIBUTION

This is in recognition that the paper

ONTOLOGY-BASED APPROACH FOR THE USE OF INTENTIONAL FORGETTING IN PRODUCT DEVELOPMENT

authored by

Kügler Patricia, Kestel Philipp, Schon Claudia, Marian Max, Schleich Benjamin, Staab Steffen, Wartzack Sandro

was rated in the top 5% papers based on reviewers' scores

Programme Chairs

Udo Lindemann *Tim Mcaloone* *Christian Weber* *Dorian Marjanović*

Universität der Bundeswehr München

Institut für Technische Produktentwicklung

Design for X

29. DfX-Symposium
September 2018

M. Hallmann, D. Kunz, B. Schleich, S. Wartz

wird für den Beitrag

Analyse anlagenspezifischer Fertigungseinfl
auf die Genauigkeit FDM-gedruckter Baut

der

ENmfk-Preis

für den

Besten Beitrag 2018

verliehen.

KEER 2018
Go Green with Emotion

7th International Conference on Kansei Engineering & Emotion Research (KEER 2018)

Best Paper Award

Regular Session

Presented to the paper entitled

Emotional Bionics - A Pickup Truck is a Lion!

Authored by

Susan Gretchen Zöller; Tina Schröppel; Sandro Wartzack

at the 7th International Conference on Kansei Engineering & Emotion Research (KEER 2018)
22 March 2018 at Kuching, Sarawak, Malaysia.

Foto: KTmfk/T. Schröppel

Preise & Auszeichnungen

2015

Heider, Katrin: *1. Platz Lehrevaluation Technische Fakultät in der Kategorie ÜP20.* (FAU-Lehrevaluation).

Kröner, Julia: *Green Factory Bavaria Award 2015.* GreenBearings: Minimierung und Vermeidung konventioneller Schmierstoffe in Wälzlagerungen durch tribologische Schichten.

Rathert, Thomas; Wartzack, Sandro: *Reviewers' Favorite Recognition of the International Conference on Engineering Design ICED 2015.* Feature based interpretation and reconstruction of structural topology optimization results (Tagungsbeitrag).

Schleich, Benjamin; Wartzack, Sandro: *Reviewers' Favorite Recognition of the International Conference on Engineering Design ICED 2015.* A Generic Approach to Sensitivity Analysis in Geometric Variations Management (Tagungsbeitrag).

Schleich, Benjamin; Wartzack, Sandro; Anwer, Nabil; Mathieu, Luc: *Prakash Krishnaswami CAPPD Best Paper Award at the ASME IDETC/CIE 2015, Boston.* Skin Model Shapes: Offering New Potentials for Modelling Product Shape Variability (Tagungsbeitrag).

2016

Hasse, Alexander: *Best Interactive Poster Award, ASME 2016, MR-6 Compliant Mechanisms and Micro/Nano Mechanisms.* Topology optimization of Compliant Mechanisms explicitly considering desired kinematics and stiffness constraints (Tagungsbeitrag).

Hasse, Alexander: *Lehrevalution, 2016, Technologie-Startup-Seminar, 3. Platz.* (FAU-Lehrevaluation).

Marian, Max: *Förderpreis der Gesellschaft für Tribologie e. V.* Erweiterung eines Simulationstools elastohydrodynamischer Kontakte um ein masseerhaltendes Kavitationsmodell (Masterarbeit).

2017

Jüttner, Michael: *Masterpreis der Diehl-Stiftung 2017.* Konzeptentwicklung für die Rotorblattlagerung von Windenergieanlagen mit Individual Pitch Control (Masterarbeit).

Jüttner, Michael: *Cramer-Klett-Preis – 2. Preis.* Projekt Pitch it - Konzeptentwicklung für die Rotorblattlagerung von Windenergieanlagen mit Individual Pitch Control.

Jüttner, Michael: *FAG Innovation Award 2017.* Konzeptentwicklung für die Rotorblattlagerung von Windenergieanlagen mit Individual Pitch Control (Masterarbeit).

Kett, Susan; Schmitt, Benedikt; Wartzack, Sandro: *Certificate of Merit.* What the Statistics Tell Us – How to Use Empiric Data in Design for Emotional Impressions (Tagungsbeitrag).

Zöller, Susan; Schröppel, Tina; Wartzack, Sandro: *ENmfk-Preis für den besten Beitrag des 28. DfX-Symposiums.* Ein Vergleich von Datenanalysemethoden für eine Affective Engineering Methode (Tagungsbeitrag).

Wolf, Alexander; Miehling, Jörg; Wartzack, Sandro: *ENmfk-Preis für den besten Beitrag des 28. DfX-Symposium in Bamberg.* Vorgehensweisen zur Vorhersage menschlicher Bewegung durch muskuloskelettale Simulation (Tagungsbeitrag).

2018

Hallmann, Martin; Kunz, David; Schleich, Benjamin; Wartzack, Sandro: *ENmfk-Preis für den besten Beitrag des 29. DfX-Symposiums.* Analyse anlagenspezifischer Fertigungseinflüsse auf die Genauigkeit FDM-gedruckter Bauteile (Tagungsbeitrag).

Kügler, Patricia: *prostep ivip Scientific Award 2018.* Einsatz von Mechanismen des intentionalen Vergessens in ontologiebasierten Produktmodellen (Masterarbeit).

Kügler, Patricia; Kestel, Philipp; Schon, Claudia; Marian, Max; Schleich, Benjamin; Staab Steffen; Wartzack, Sandro: *Reviewers' Favorite Award DESIGN Conference 2018.* Ontology-Based Approach for the Use of Intentional Forgetting in Product Development (Tagungsbeitrag).

Manjunath, Vishwas: *FAG Innovation Award 2018.* Optimization of raceway osculation for Spherical Roller Bearings (Masterarbeit).

Schleich, Benjamin: *Zentrum Digitalisierung.Bayern (ZD.B) Promotionspreis 2018: Sonderpreis für die beste anwendungsorientierte Arbeit.* Skin Model Shapes: A new Paradigm for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering (Dissertation).

Sprügel, Tobias C.; Schleich, Benjamin; Wartzack, Sandro: *VDI-SIMVEC 2018 | 1. Platz Young Authors Award.* Simulations-DNA: Datengetriebener Ansatz zur automatischen Plausibilitätsprüfung strukturmechanischer FE-Simulationen mittels Deep Learning (Tagungsbeitrag).

Völkl, Harald; Franz, Michael; Wartzack, Sandro: *Research Award (1st Symposium for Lightweight Design and Product Development).* Computer Aided Internal Optimization (CAIO) method for fiber trajectory optimization: enhancing applicability (Tagungsbeitrag).

Weschta, Martin: *FAG Innovation Award 2018.* Untersuchungen zur Wirkungsweise von Mikrotexturen in elastohydrodynamischen Gleit-/Wälzkontakten (Dissertation).

Winkler, Andreas: *Masterpreis der Diehl-Stiftung 2018.* Statistische Toleranzanalyse mithilfe von Familientabellen-basierten Skelettmodellen (Masterarbeit).

Vierneusel, Bernd: *FAG Innovation Award 2018.* Verschleiß- und feuchteresistente MoS2-Festschmierstoffschichten für den Gleit- und Wälzkontakt (Dissertation).

Zöller, Susan; Schröppel, Tina; Wartzack, Sandro: *Best Paper Award at the 7th International Conference on Kansei Engineering & Emotional Research 2018.* Emotional Bionics – A Pickup truck is a Lion! A Study Using Emotional Profiling to Analyse Bionic Analogies in Car Design.

2019

Dworschak, Fabian; Kügler, Patricia; Schleich, Benjamin; Wartzack, Sandro: *Reviewers' Favorite Recognition of the International Conference on Engineering Design ICED 2019.* Integrating The Mechanical Domain Into Seed Approach (Tagungsbeitrag).

Götz, Stefan; Hartung, Jonas; Schleich, Benjamin; Wartzack, Sandro: *Outstanding Presentation Award of the International Conference on Engineering Design ICED 2019.* Robustness Evaluation of Product Concepts based on Function Structures (Tagungsbeitrag).

Marian, Max; Tremmel, Stephan; Wartzack, Sandro: *Best Presentation Award 3rd Young Tribological Researcher Symposium.* Knowledge-based design of surface textures for TEHL contacts (Tagungsbeitrag).

Schwarz, Sebastian; Grillenberger, Hannes; Tremmel, Stephan: *Best Young Presenter Award. The Rolling Element Bearings Technical Committee of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers.* Investigations on Cage Dynamics in Rolling Bearings by Test and Simulation (Tagungsbeitrag).

Völkl, Harald; Kießkalt, Andreas; Wartzack, Sandro: *Reviewers' Favorite Recognition of the International Conference on Engineering Design ICED 2019.* Design for composites: Derivation of manufacturable geometries for unidirectional tape laying (Tagungsbeitrag).

Foto: KTmfk/T. Niering

Dissertationen

Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen

Foto: KTmfk/T. Niering

Michael Walter

Tag der Promotion	14. September 2016
Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack *FAU Erlangen-Nürnberg* Prof. Dr.-Ing. H.-J. Weber *htw saar*

Die Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler, die sich mit der optimalen Vergabe von Fertigungstoleranzen befassen. In der Arbeit wird ein durchgängiger Prozess des Toleranzmanagements vorgestellt, der sowohl für statische als auch bewegte Systeme (sogenannte Mechanismen) anzuwenden ist. Mit der Toleranzanalyse können die Auswirkungen zufälliger und systematischer Abweichungen auf das Bewegungsverhalten eines Mechanismus statistisch beurteilt werden. Die Visualisierung mit dem Walter-Hiller-Diagramm zeigt ungenutzte Potentiale zur Aufweitung von Toleranzen und damit zur gezielten Kosteneinsparung auf. Schlussendlich lassen sich die kostenoptimalen Bauteiltoleranzen des Mechanismus anhand einer statistischen Toleranz-Kosten-Optimierung berechnen. Am Beispiel eines abweichungsbehafteten Ventiltriebs wird die praktische Anwendung aufgezeigt.

Verschleiß- und feuchteresistente MoS_2 – Festschmierstoffschichten für den Gleit- und Wälzkontakt

Foto: KTmfk/T. Niering

Bernd Vierneusel

Tag der Promotion 06. März 2017

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr. rer. nat. M. Göken
FAU Erlangen-Nürnberg

Die Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler, die sich mit der Entwicklung trockenlaufender Tribosysteme unter extremen und wechselnden Umgebungsbedingungen befassen. Angetrieben durch das Ziel ein leistungsstarkes, vakuumfähiges und zugleich feuchteresistentes Dünnschichtsystem bereitzustellen, befasst sich die Arbeit mit der inneren Beschaffenheit von Molybdändisulfid-(MoS_2) Schichten, welche als Bindeglied zwischen dem Herstellungsprozess und den gewünschten Schichteigenschaften systematisch untersucht und weiterentwickelt wurde. Eine ausführliche Werkstoffcharakterisierung verschiedener Schichtmodifikationen sowie deren tribologische Validierung in der realen Anwendung von Axial Rillenkugellagern dienen dazu, Aufbau und Verhalten von MoS2-Schichtsystemen besser nachvollziehen und beurteilen zu können. Darüber hinaus können die experimentell gewonnenen Erkenntnisse in Verbindung mit der erarbeiteten Simulation des Zerstäubungs- und Transportprozesses von Beschichtungsteilchen als Grundlage zur zielgerichteten Herstellung verschleißfester MoS2-Schichten dienen.

Skin Model Shapes: A new Paradigm for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering

Foto: KTmfk/T. Niering

Benjamin Schleich

Tag der Promotion 20. März 2017

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Luc Mathieu
Université Paris-Sud

Die Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler aus dem Bereich der virtuellen Produktentwicklung und angrenzender Disziplinen mit Schwerpunkt auf dem Toleranzmanagement. Sie stellt ein umfassendes Rahmenwerk für die Toleranzsimulation unter Berücksichtigung von Formabweichungen in Übereinstimmung mit internationalen Normen zur Geometrischen Produktspezifikation vor. Hierzu werden Algorithmen für die Erzeugung abweichungsbehafteter Punktwolken und Oberflächennetze (Skin Model Shapes), für deren Skalierung sowie deren Montagesimulation erarbeitet. Darüber hinaus behandelt die Arbeit die Toleranzanalyse bewegter Mechanismen und stellt einen Software-Prototypen für die Toleranzsimulation mittels Oberflächennetzen vor. Auf Basis der kritischen Gegenüberstellung von Ergebnissen des erarbeiteten Verfahrens mit bestehenden Toleranzanalysemethoden für typische Problemfälle wird gezeigt, dass durch die Berücksichtigung von Formabweichungen bei der Toleranzanalyse die Einflüsse von Bauteilabweichungen auf die Funktion und Qualität mechanischer Baugruppen und bewegter Systeme deutlich realitätsnäher bestimmt und dadurch Toleranzentscheidungen optimiert werden können.

Ein simulationsbasierter Ansatz für die beanspruchungsgerechte Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen

Foto: KTmfk/T. Niering

Daniel Klein

Tag der Promotion 14. Juli 2017

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr. P. Ermanni
ETH Zürich

Die Arbeit richtet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Faserverbund- und Konstruktionstechnik. Sie greift die Problematik auf, dass die Auslegung von endlosfaserverstärkten Faserverbundbauteilen Konstrukteure vor eine große Herausforderung stellt. Beispielsweise sind die Materialeigenschaften stark von der Faserrichtung abhängig und es gilt zahlreiche unterschiedliche Auslegungsparameter zu bestimmen. Deshalb wird ein neuer vierstufiger Auslegungsprozess vorgestellt, der den Konstrukteur strukturiert von einem CAD-Modell zu einem ersten Laminataufbau führt. Dazu werden unterschiedliche Algorithmen entwickelt, implementiert und im Rahmen eines zusammenhängenden Vorgehensmodells angewendet. Am Ende der Arbeit wird anhand einiger Beispielbauteile gezeigt, dass sich mit den so entwickelten Laminataufbauten sehr gute mechanische Bauteileigenschaften ergeben.

Untersuchung zur Wirkungsweise von Mikrotexturen in elastohydrodynamischen Gleit-/Wälzkontakten

Foto: KTmfk/T. Niering

Martin Weschta

Tag der Promotion 20. November 2017

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hannes Hick
TU Graz

Die Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler aus dem Bereich der Tribologie, die sich mit der Reibungsminderung in elastohydrodynamischen (EHD) Gleit/Wälz-Kontakten befassen. Eine mögliche Methode hierzu stellt die selektive Oberflächenbearbeitung dar, die Oberflächenmerkmale im mikroskopischen Maßstab erzeugt. In dieser Arbeit erfolgt eine Einschränkung auf diskrete Texturelemente. Bei diesen konnte ein positiver Effekt auf die Reibung bisher nur für niedrigbelastete Gleitkontakte wie den Zylinder/Laufbahn-Kontakt nachgewiesen werden, für EHD Kontakte fehlten noch klare Aussagen. Die Arbeit bietet einen Literaturüberblick zu bekannten Mechanismen diskreter Mikrotexturen in verschiedenen Kontaktsituationen, baut ein vertieftes Verständnis hinsichtlich der EHDWälz/Gleit-Kontakte auf und zeigt in einem Machbarkeitsnachweis ihr Reibungsreduktionspotential in diesen Kontaktsituationen auf. Hierzu werden numerische Studien und deren Umsetzung sowie Experimente an einem Komponentenprüfstand vorgestellt.

Robust Design Optimierung endlosfaserverstärkter Verbundbauteile

Foto: KTmfk/T. Niering

Markus Kellermeyer

Tag der Promotion 18. Juni 2018

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause
TU Hamburg

Die Arbeit richtet sich an Ingenieure der virtuellen Produktentwicklung. Sie zeigt ein Vorgehen basierend auf der Finiten-Elemente-Methode welches den Produktentwickler unterstützt, in der frühen Phase der Entwicklung einen bestehenden Lagenaufbau eines endlosfaserverstärkten Verbundbauteils im Sinne einer geringen Gesamtmasse bei gleichzeitiger Gewährleistung einer definierten Sicherheit zu verbessern. Die Arbeit beschreibt dabei die dazu notwendigen Kalibrierungen unter Verwendung von skalaren Größen sowie streuenden Feldern sowie das iterative Vorgehen der Robust Design Optimierung. Diese ist auf eine zeitsparende Vorgehensweise sowie auf die Gewährleistung einer ausreichenden Genauigkeit ausgelegt, um den Einsatz für industrielle Bauteile zu ermöglichen. Abschließend werden Praxisbeispiele vorgestellt, getestet und bewertet.

Berücksichtigung biomechanischer Zusammenhänge in der nutzergruppenspezifischen virtuellen Produktentwicklung

Foto: KTmfk/T. Niering

Jörg Miehling

Tag der Promotion 05. Juli 2018

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. B. Bender
Ruhr-Universität Bochum

Die Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler aus dem Bereich der nutzerzentrierten Produktentwicklung und ergonomischen Produktgestaltung. Sie stellt eine Vorgehensweise zur nutzergruppenspezifischen Simulation und Optimierung von Nutzer- Produkt-Konfigurationen vor. Im Fokus stehen dabei physische Nutzer-Produkt-Interaktionen. Ausgangspunkt stellt die Modellierung der virtuellen Nutzergruppe bzw. Nutzerpopulation in Form muskuloskelettaler Menschmodelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Modellierungsdomänen sowie eine parametrische Produktmodellierung dar. Darauf aufbauend werden Methoden zur automatisierten Konfiguration, Vorhersage und Simulation von Nutzer-Produkt-Interaktionen bereitgestellt. Basierend auf den Ergebnissen der biomechanischen Simulationen werden Metamodelle erzeugt, die eine Optimierung der Designparameter für vorgegebene demographische Nutzerparameter ermöglichen. Die resultierenden Produktparameterverteilungen für die herangezogene Nutzergruppe/-population dienen schließlich als Handlungsvorschlag für die weiteren Schritte der Produktentwicklung.

Ein simulationsbasierter Ansatz für die beanspruchungsgerechte Auslegung endlosfaserverstärkter Faserverbundstrukturen

Foto: KTmfk/T. Niering

Alexander Pabst

Tag der Promotion 06. Juli 2018

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. P. Tenberge
Ruhr-Universität Bochum

Einen Ansatz zur Lebensdauersteigerung von Wälzlagern stellt die gezielte Einbringung von Druckeigenspannungen in die Randschicht dar. Es werden Lebensdauerversuche unter dem Einfluss gezielt eingebrachter Druckeigenspannungen durch mechanische Verfestigungs- und Wärmebehandlungverfahren vorgestellt. Die erreichte Lebensdauersteigerung wird durch die Kaltverfestigung und die unterschiedliche Gefügeausbildung und die damit verbundene Erhöhung der Beanspruchbarkeit erklärt. In rechnerischen Untersuchungen werden Vergleichsspannungshypothesen und Lebensdauermodelle eingesetzt, die letztendlich die Bestimmung der rechnerischen Lebensdauerveränderung ermöglichen. Der Eigenspannungs- bzw. Verfestigungseinfluss kann dabei auf unterschiedliche Arten berücksichtigt werden. Einerseits werden die Eigenspannungen als eine Komponente der Beanspruchung betrachtet. Andererseits ist auch die Berücksichtigung alleine in der Beanspruchbarkeit des Werkstoffs denkbar

Mapping Individual Subjective Values to Product Design: An Attitudes-Based Approach for User Centered Design

Foto: KTmfk/T. Niering

Susan Zöller

Tag der Promotion 24. Oktober 2018

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. P J. Clarkson
University of Cambridge

Die nutzerzentrierte Produktentwicklung steht vor neuen Herausforderungen, da sich der bisherige Fokus einer bestmöglichen physiologischen Produkt-Zugänglichkeit zunehmend hin zu subjektiv wahrgenommenen Qualitätsaspekten verlagert. Trotz der bereits tiefgehenden Erkenntnisgrundlage anderer Forschungsdisziplinen über subjektive Wahrnehmung kann dieses Wissen in der Produktentwicklung bisher kaum abgerufen werden. Die existierenden Kommunikationsbarrieren zwischen der Produktentwicklung und jenen Disziplinen müssen weiter abgebaut werden. Im Vordergrund der Forschungsarbeit steht daher die Frage, wie eine verständliche und anwenderfreundliche Adaption interdisziplinärer Kenntnisse im ingenieurtechnischen Kontext gelingen kann. So entsteht ein Instrument, das den Transfer externen Wissens über die subjektive Qualitätswahrnehmung in den Produktentwicklungsprozess ermöglicht und unmittelbare Handlungsempfehlungen für den Produktentwickler generiert. ACADE (Approach for Computer Aided Design of Emotional impressions) zielt hierzu insbesondere auf die Theorie der Produkt-Persönlichkeits-Kongruenz ab. Diese besagt, dass sich Nutzer stets jene Produkte aneignen, die die eigenen subjektiven Lebenseinstellungen und Wertorientierungen am meisten repräsentieren. ACADE stellt hierzu eine transparente Datenarchitektur und mathematische Algorithmen zur Erkenntnisgenerierung zur Verfügung. Ein einfacher Prozessablauf sowie eine integrierte Ergebnis-Verifikation erlaubt eine verständliche und flexible Umsetzung von Gestaltungsoptimierungen. Seine Anwendung ermöglicht eine bewusste Produkt-Wertoptimierung anhand individueller subjektiver Nutzerbedürfnisse ebenso wie ein zielgerichtetes Portfolio- und Strategiemanagement.

Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems zur automatischen Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen

Foto: KTmfk/T. Niering

Thilo Breitsprecher

Tag der Promotion 29. Oktober 2018

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. H. Binz
Universität Stuttgart

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Wissenschaftler und Ingenieure, die an der Schnittstelle zwischen der klassischen Konstruktionstechnik und der Wissensentdeckung in Datenbanken tätig sind. Sie befasst sich mit dem Einsatz von Methoden des Data Minings zur automatischen Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen. Dieses benötigt der Produktentwickler zur Beurteilung der Fertigungsgrechheit seiner Bauteilentwürfe. Im Fokus stehen Fertigungsverfahren, die sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Als exemplarischer Prozess wird in der Arbeit die Blechmassivumformung betrachtet. Grundlage für die automatische Wissensakquisition ist der in der Arbeit entwickelte Selbstlernprozesses. Dieser nutzt Data Mining Methoden, um aus den Daten der Fertigungsprozessentwicklung das relevante Wissen ohne Benutzereingriff zu akquirieren. Der Selbstlernprozess ist in ein prototypisches Konstruktionsassistenzsystem integriert.

Berücksichtigung der Schmierstoffhydrodynamik und der Käfigverformung in der Wälzlagerdynamiksimulation unter hohen Zentripetalbeschleunigungenen

Foto: KTmfk/T. Niering

Katrin Heider

Tag der Promotion 11. Januar 2019

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack
FAU Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.techn. H. Hick
TU Graz

In vielen technischen Anwendungen ist zur Verbesserung der Energieeffizienz die Reibung in Wälzlagerungen zu reduzieren. Wälzlager, die hohen Zentripetalbeschleunigungen ausgesetzt sind, können eine stark erhöhte Reibung an den Käfigkontakten aufweisen, da der bordgeführte Käfig gegen den Außenring gedrückt und verformt wird. Zur gezielten Entwicklung neuer reibungsarmer Lagerlösungen ist in solchen Anwendungsfällen sowohl die Schmierstoffhydrodynamik in den Käfigkontakten als auch die Käfigelastizität in der Wälzlagerdynamiksimulation zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung der Schmierstoffhydrodynamik erfolgt mit Hilfe analytischer Berechnungsansätze differenziert für jeden Käfigkontakt. Die Kontaktberechnung bleibt damit weiterhin recheneffizient, numerisch stabil und für die Dynamiksimulation von Wälzlagern geeignet. Eine Umsetzung dieses Ansatzes erfolgt im Wälzlagerdynamiksimulationsprogramm CABA3D. Eine ausreichend hohe Genauigkeit der hydrodynamischen Berechnung wird durch den Abgleich mit dem validierten Gleitlagerprogramm COMBROS sichergestellt. Es kann gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der Schmierstoffhydrodynamik einen großen Einfluss auf die Käfigund Lagerkinematik sowie das Reibungsmoment haben kann und bei Lagern unter Zentripetalbeschleunigung berücksichtigt werden sollte.

Des Weiteren konnten die Promotionsverfahren von Herrn Daniel Krüger und Herrn Matthias Ehlert erfolgreich abgeschlossen werden. Beide Dissertationen unterliegen zum Berichtszeitpunkt noch dem Veröffentlichungsprozess.

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion

Foto: KTmfk/T. Niering

Daniel Krüger

Tag der Promotion	18. Juli 2019
Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack *FAU Erlangen-Nürnberg*
	Prof. Dr.-Ing. R. Stark *TU Berlin*

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung

Foto: KTmfk/T. Niering

Matthias Ehlert

Tag der Promotion	06. September 2019
Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack *FAU Erlangen-Nürnberg*
	Prof. Dr.-Ing. R. Stark *TU Berlin*

Foto: Annika Maaß

Wissens- und Technologietransfer

Erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Industrie

Ein zentrales Ziel der Universität ist es, im Rahmen des Wissens- und Technologietransfers aus neuen Forschungserkenntnissen heraus in Kooperation mit Partnern aus der Industrie neue Produkte und Dienstleistungen reifen zu lassen, damit den Innovationsstandort Deutschland zu stärken und letztlich die gesellschaftliche Entwicklung positiv mit zu gestalten. Mit diesem Ziel kooperiert der Lehrstuhl seit vielen Jahren erfolgreich mit Industriepartnern aus unterschiedlichen Branchen und ist auch zukünftig an solchen Kooperationen sehr interessiert.

Kooperationen mit unserem Lehrstuhl ermöglichen den Industriepartnern Zugriff auf neue Methoden und Technologien sowie ausgewiesene Experten und damit den direkten Transfer aktueller Forschungsergebnisse in die Wirtschaft. In verschiedenen Kompetenzfeldern bietet der Lehrstuhl viele Möglichkeiten, um auf die spezifischen Bedürfnisse der Industrie eingehen zu können. Häufig bietet es sich an, öffentliche Förderprogramme in die Kooperation mit einzubeziehen. Vorteile einer solchen Kooperation sind für Unternehmen vor allem Kostensenkung und zusätzliche Innovationen.

Möglichkeiten der Zusammenarbeit

Gemeinsame Projekte zur Lösung anspruchsvoller Probleme im Umfeld der Produktentwicklung stellen den Hauptteil aller Kooperationen dar. Daneben bietet unser Lehrstuhl individuelle Schulungen und Seminare an.

Entsprechend der Ausrichtung und Zielsetzung des jeweiligen Projektes sind unterschiedliche Möglichkeiten der Zusammenarbeit denkbar:

1.) Langfristige, grundlagenorientierte Forschungsprojekte, die bilateral oder vorwettbewerblich in einem Verbund aus mehreren Partnern durchgeführt werden.

Diese Projekte können von Förderinstitutionen – beispielsweise durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke" e.V. (AiF) oder die Bayerische Forschungsstiftung (BFS) – unterstützt werden.

Beispiele

- FORPRO² – Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation, gefördert durch die BFS
- ShapeOpt2CAD – Entwicklung und Integration einer fertigungs- und belastungsgerechten Gestaltoptimierung in modernen Produktentwicklungsumgebungen, gefördert durch das BMBF
- EUREKA Alarm – Unterstützung bei der lärmreduzierten Auslegung rotierender Maschinen am Beispiel einer Windenergieanlage, gefördert durch das BMBF
- Reibungspotential von Wälzlagern unter Zentripetalbeschleunigung, bilaterales Forschungsprojekt

2.) Mittelfristige, anwendungsbezogene Forschungsprojekte, die in der Regel bilateral durchgeführt werden.

Beispiele

- Entwicklung einer neuartigen Wälzlagerung für große Elektromotoren
- Statistische Toleranzanalyse von Spindellagern
- Fachkonzept zur kontextbezogenen Verwaltung und Bereitstellung von Prozess- und Produktwissen

3.) Kurzfristige, aufgabenspezifische, bilaterale Projekte:

Beispiele

- Konzeption und Entwurf von Maschinen und Anlagen
- Berechnung und Simulation technischer Systeme
- Werkstoffprüfung unter hochdynamischer Lastaufbringung
- Tribologische Untersuchungen auf vorhandenen Einrichtungen
- Prototypenbeschichtung

Foto: KTmfk/T. Niering

Durchführung von Innovationsworkshops für die Industrie

Kompetenzfelder des Lehrstuhls

In den Kernkompetenzfeldern des Lehrstuhls ist eine umfassende Zusammenarbeit möglich.

Digital Engineering

- Einsatz von Machine Learning zur wissensbasierten Konstruktion und Simulation
- Entwicklung komplexer Systeme mittels modellbasiertem Systems Engineering
- Multikriterielle Bewertung und Entscheidungsfindung in der Produktentwicklung
- Produktvisualisierung und -interaktion in Virtual und Augmented Reality

Leichtbau

- Auslegung faserverstärkter Kunststoffbauteile
- Charakterisierung von Werkstoffen bei hochdynamischer Beanspruchung
- Einbindung von Strukturoptimierung in die Produktentwicklung

Nutzerzentrierte Produktentwicklung

- Beratung bei ergonomischen Fragestellungen in der Produktentwicklung, Biomechanische Analyse von Bedien- und Arbeitsvorgängen
- Integrationvon Biomechaniksimulationen in CAx
- Entwicklung von Trainings- und Rehabilitationsgeräten
- Identifikation von Optimierungspotenzial hinsichtlich wahrgenommener, subjektiver Produktqualität

Toleranzmanagement

- Statistische Toleranzanalysen von Baugruppen
- Beratung in Fragen zur richtigen Tolerierung und der Eintragung von Toleranzen in technischen Zeichnungen
- Analyse der Robustheit anhand der Beurteilung vergebener Einzelteiltoleranzen eines Produktes
- Entwicklung von Toleranzanalysetools im Rahmen von CAx

Tribologische PVD-/PACVD-Schichten

- Schichtentwicklung und -auswahl
- Tribologische Modell- und Bauteilversuche
- Dimensionierungsgrundlagen
- Bauteilgestaltungsrichtlinien

Wälzlagertechnik

- Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Wälzlagern
- Kontaktmodellierung und -simulation
- Entwicklung und Konstruktion spezialisierter Prüfstände
- Auslegung und Optimierung von Lagerungen und Schmierungskonzepten

Foto: KTmfk/B. Gerschütz

Netzwerke und Plattformen

Veranstaltungen

Der KTmfk organisiert und beteiligt sich an einer Vielzahl von Veranstaltungen, die eine Plattform dafür bieten sich sowohl mit anderen Forschungseinrichtungen als auch der Industrie auszutauschen. Vorträge und Workshops sowie viel Raum für Gespräche fördern den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und den Transfer in die industrielle Praxis. Ein großes Anliegen dieser Veranstaltungen ist es auch die langfristigen und guten Beziehungen zu Vertretern aus Forschung und Industrie zu pflegen.

Data-Mining Day

Am 23.03.2017 wurde der KTmfk Data-Mining Day initiiert. Das Thema war die **„Zukunft der wissensbasierten Produktentwicklung"**. In fünf Vorträgen aus Industrie und Forschung wurden Data-Mining Anwendungen vorgestellt, die zum Beispiel einen Einblick in die Nutzung von Data-Mining für die wissensbasierte Simulation gewährten. In zwei parallelen Workshops am Nachmittag wurden folgende Themen diskutiert und erarbeitet: „Barrieren: Wie werden typische Stolpersteine bei der Umsetzung von Data-Mining Projekten überwunden" und „Daten: Das Öl des 21. Jahrhunderts – Wie kann die wissensbasierte Produktentwicklung davon profitieren?". Insgesamt war der Data-Mining Day ein gelungener fachlicher Austausch von Industrie und Forschung.

Am 03.04.2019 wurde der zweite KTmfk Data-Mining Day veranstaltet. Unter dem Leitsatz **„Digital Engineering – Zukunft der Produktentwicklung"** wurden Data-Mining-Themen mit direktem Bezug zur Produktentwicklung vorgestellt. Rund 40 Teilnehmer verfolgten dabei die spannenden Vorträge aus Industrie und Forschung. Die Teilnehmer erhielten zum Beispiel Einblick in semantikunterstützte Verfahren im Bereich des Data-Minings und des maschinellen Lernens.

Am Nachmittag wurde zusätzlich in zwei Workshops zu den Themen „Herausforderungen beim Einsatz von Data-Mining in der Industrie" und „Anforderungen an künftige Hochschulabsolventen" gemeinsam diskutiert.

Foto: KTmfk/B. Gerschütz

Fabian Dworschak, Patricia Kügler, Sandro Wartzack und Christopher Sauer am Data-Mining Day 2019 (v. rechts)

DfX-Symposium

Das von Professor Harald Meerkamm im Jahr 1990 ins Leben gerufene Symposium „Design for X" bietet jungen Wissenschaftlern aus dem Bereich der Produktentwicklung eine Plattform zur Vorstellung neuer Ideen und Ansätze. Zur intensiven Diskussion tragen Industrievertreter und Professoren mit ihren fachspezifischen Erfahrungen bei. Die Konferenz wird inzwischen gemeinsam von Professor Wartzack, Professor Paetzold (Universität der Bundeswehr München) und Professor Krause (TU Hamburg-Harburg) veranstaltet und hat sich zu einer der bedeutendsten deutschsprachigen Veranstaltungen dieser Art entwickelt. Da das Symposium seit 2001 „endorsed event" der Design Society ist, erfreut es sich auch international wachsender Beliebtheit. Alle Beiträge werden in einem Tagungsband veröffentlicht, der in der bekannten Zitationsdatenbank Scopus des Elsevier-Verlags geführt wird.

Die thematischen Schwerpunkte der Konferenz orientieren sich in jedem Jahr an den Forschungsinteressen des Gastgebers. Das 28. DfX-Symposium wurde von Professor Wartzack ausgerichtet und orientierte sich daher an den Forschungsschwerpunkten des KTmfk:

- Smart Engineering/Modellbasierte Produktentwicklung
- Data Mining
- Digitale Menschmodelle in der Produktentwicklung
- Toleranzen/Robust Design
- Leichtbau

Das Symposium fand am 4. und 5. Oktober 2017 in Bamberg statt und umfasste zahlreiche Vorträge in sechs Vortragssessions und 2 Postersessions. Bei der Organisation wurde Prof. Wartzack tatkräftig vom Lehrstuhlteam unterstützt, insbesondere Michaela Förster, Susan Zöller und Marius Fechter waren maßgeblich an der Organisation und Ausrichtung des Symposiums beteiligt. Das nächste Symposium unter Federführung des KTmfk wird 2020 wieder in Bamberg stattfinden.

International Conference on Engineering Design, ICED19 – Responsible Design for our Future

Alle zwei Jahre findet die International Conference on Engineering Design (ICED), die Flaggschiffkonferenz der Design Society (www.designsociety.org), statt. Diese bot in diesem Jahr bereits zum 22. Mal eine Plattform für den Wissensaustausch zwischen Forschern und Anwendern, die im Bereich des Engineering Design arbeiten. Auf der diesjährigen Konferenz ICED19 mit dem Motto „Responsible Design for our Future" in Delft (Niederlande) übernahm Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack als Programme Committee Chair die Verantwortung für das Konferenzprogramm – angefangen vom Call for Papers über den Double-Blind-Peer-Review-Prozess bis hin zur detaillierten Programmplanung der Sessions.

Gegenüber bisherigen Konferenzen wurden dabei einige Neuerungen umgesetzt: Die Veröffentlichung der Konferenz-Proceedings erfolgte professionell durch Cambridge University Press. Sämtliche Beiträge sind als Gold-Open-Access unter https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-conference-on-engineering-design abrufbar.

Das neue Format „Marketplace" ermöglichte es zudem Konferenzteilnehmenden, ihre Forschung – ob als Veröffentlichung der ICED19 angenommen oder noch in der frühen Phase – anhand von Postern, Demonstratoren, Laptops u.a. dem Publikum vorzustellen und mit anderen Experten zu diskutieren.

Mehrere neue Awards, zusätzlich zum bereits bekannten Reviewers' Favourite Award, zeichneten herausragende Veröffentlichungen und die besten Präsentationen aus. Unter den Preisträgern befanden sich auch drei Wissenschaftler des KTmfk, darunter erhielten zwei den Reviewers' Favourite- und ein Wissenschaftler den Best Presentation Award.

Das Programme Committee stellten Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack (Chair), Dr.-Ing. Benjamin Schleich (Assistant Chair), Harald Völkl, M.Sc. (alle KTmfk) sowie Dr. Boris Eisenbart (Swinburne University, Melbourne) und Dr. Milene Gonçalves (TU Delft). Gastgebende Conference Chairs waren Prof. Petra Badke-Schaub und Dr. Maaike Kleinsmann (beide TU Delft). Die sehr erfolgreiche, viertägige Konferenz ermöglichte einen lebhaften und produktiven Austausch in allen Fachgebieten des Engineering Design.

Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses Wälzlager der Forschungsvereinigung Antriebstechnik

Am 05.12. und 06.12.2017 war der projektbegleitende Ausschuss „Wälzlager" der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) zu Gast KTmfk. Beim projektbegleitende Ausschuss handelt es sich um ein Beratungsgremium der Mitgliedsfirmen der FVA, welche sich mit dem Themenschwerpunkt Wälzlagertechnik auseinandersetzen. Unter den rund 50 Gästen waren hierbei sowohl Firmenvertreter von Wälzlageranwendern als auch von namhaften Wälzlagerherstellern.

Innerhalb des projektbegleitenden Ausschusses „Wälzlager" ist der KTmfk im Rahmen zweier Projekte zu Wälzlagertoleranzen sowie zur Ermüdungslebensdauer bei kleinen Schwenkbewegungen tätig. Darüber hinaus konnte sich der Lehrstuhl während der Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses aber auch durch weiterer Vorträge, Postersessions sowie Institutsführungen präsentieren. So stieß insbesondere der Vortrag über eine neuartige Rotorblattlagerung für Windenergieanalagen mit individueller Pitch Regelung (Pitch it!) sowie der Wälzlagerschleuderprüfstand zur Untersuchung des Einflusses von Zentripetalbeschleunigung auf Wälzlagerverhalten auf großes Interesse. Besonderer Höhepunkt war die gemeinsame Abendveranstaltung in ungezwungener Atmosphäre.

Industriekolloquium der Forschungsgruppe FOR 2271 „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden"

Der KTmfk veranstaltete am 05.02.2019 gemeinsam mit den beteiligten Lehrstühlen des Departments Maschinenbau das erste Industriekolloquium der Forschungsgruppe FOR 2271 in Erlangen. Das Kolloquium bildet hierbei die Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und Anwendung und bietet eine Plattform für den fachlichen Austausch von Vertretern aus Industrie und Wissenschaft.

Im Rahmen von Forschungsvorträgen wurden Ergebnisse der Kooperationen der beteiligten Lehrstühle vorgestellt. Hierbei wurde beispielsweise eine neue Vorgehensweise vorgestellt, welche es erlaubt fertigungsprozessspezifische Abweichungen mit Hilfe von Metamodellen bei der Toleranzanalyse zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen ermöglichst es die Auswirkungen von Prozessstreuungen während der Fertigung bei der Toleranzanalyse zu berücksichtigen. So können beispielsweise die Folgen von unterschiedlichen Rohlingsdurchmessern und veränderliche Reibbedingungen bei fließgepressten Zahnrädern und die daraus resultierenden geometrischen Abweichungen der Zahnräder in die Toleranzanalyse eingebunden werden. Neben Aspekten des Toleranzmanagements wurden auch Verfahren zur Bestimmung von Einzelpunktmessunsicherheiten und Untersuchungen zum Einlaufverhalten von Zahnrädern präsentiert. Ziel der Forschergruppe ist es, die Ergebnisse dieser Arbeiten ganzheitlich im Toleranzmanagementprozess zu berücksichtigen. Die Forschungsvorträge wurden stimmig durch Beiträge aus der Industrie ergänzt, wobei sich zeigte, dass die Vernetzung der unterschiedlichen Domänen, die mit dem Toleranzmanagement einhergeht auch in der Praxis immer wieder zu ähnlichen Herausforderungen für das Toleranzmanagement führt.

Wir bedanken uns bei allen Teilnehmern und vor allem bei den Vortragenden von BMW, Carl Zeiss, KISSsoft und der TU Darmstadt, die das erste Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271 zu einer sehr gelungenen Veranstaltung gemacht haben.

Summer School Toleranzmanagement

Die Vergabe von Toleranzen zur Einschränkung zulässiger Bauteilabweichungen stellt eine Kernaufgabe der Konstruktion und Produktentwicklung dar. Aufgrund der hohen Kostenverantwortung und der vielfältigen Schnittstellen zu Fertigung, Qualitätssicherung und Vertrieb sind neben dem Einsatz geeigneter Methoden insbesondere fachkundige Mitarbeiter erforderlich.

Gerade in Zeiten des Fachkräftemangels und sich rasch ändernder Anforderungen sind sowohl die Nachwuchsförderung als auch der Dialog zwischen Lehre, Forschung und Industrie von immenser Bedeutung.

Foto: KTmfk/C. Sauer

Teilnehmer aus Industrie und Forschung diskutieren Fragen des Toleranzmanagements

Mit der Summer School Toleranzmanagement konnte der KTmfk auch 2015 und 2017 an den Erfolg der erstmaligen Auflage aus dem Jahr 2013 anknüpfen, indem sie eine geeignete Plattform zum Austausch zu unterschiedlichen Themen und Herausforderungen des Toleranzmanagements bildete. Abwechslungsreiche Industrie- und Forschungsvorträge sowie zahlreiche Workshops trugen dabei zu einem intensiven Dialog zwischen Industrievertretern, Wissenschaftlern und Studierenden bei. Neben klassischen Themen, wie zum Beispiel der Toleranzspezifikation, -analyse und -optimierung, standen auch neue Fertigungsverfahren wie die Additive Fertigung und das Toleranzmanagement im Kontext von Industrie 4.0 im Fokus. Dabei haben nicht zuletzt auch die Abendveranstaltungen zu einem regen Austausch zwischen Forschung und Industrie und somit zur Identifikation zukünftiger Forschungsschwerpunkte unter Berücksichtigung aktueller Anforderungen und Bedürfnisse aus der Industrie beigetragen. So konnte sich die Summer School Toleranzmanagement durch ihre verschiedenen Vortragsformate sowie die heterogene Zusammensetzung der Teilnehmenden mittlerweile als eine „Pflichtveranstaltung" für alle Interessenten aus Forschung und Industrie im Bereich des Toleranzmanagements etablieren. Wir freuen uns darauf, dass die Summer School im kommenden Jahr in ihre vierte Auflage gehen und wieder aktuelle Themen aus Forschung und Industrie aufgreifen wird.

Gemeinsame Studie mit der TU Berlin zum Thema: „Lücken und Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung des Model-Based Systems Engineering"

Foto: https://www.konstruktion-online.de/2019/Ausgabe-06/Praxis-Forschung-Wissenschaft/Luecken-und-Herausforderungen-bei-der-praktischen-Umsetzung-des-Model-Based-Systems-Engineering

Teilnehmer des 2. Workshops in Berlin

Im Rahmen der Zusammenarbeit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der Technischen Universität Berlin wurde eine interaktive Studie im Rahmen von drei Workshops mit 20 Experten aus großen und kleinen Unternehmen aus dem deutschsprachigen Raum durchgeführt. Ein Ziel der Studie war die Feststellung von Lücken und Herausforderungen, welche die bereits seit einigen Jahren bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnisse und damit verbundene neue digitale Fähigkeiten in der industriellen Praxis limitieren.

Die Experten erwarten, dass MBSE den gleichen Stellenwert erlangt und als unerlässlich für erfolgreich agierende produzierende Unternehmen verstanden wird, wie auch PLM seit etwa 15 Jahren. Wesentlich für eine erfolgreiche Umsetzung des MBSE ist insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) eine schlanke, einfach zu verstehende Darstellung der Methoden und der verwendeten Applikationen. Funktionale Sicherheit ist einer der stärksten Treiber aufgrund der auch im internationalen Kontext wichtiger werdenden normativen Vorgaben. Dabei sollte das systemische Vorgehen sowohl horizontal als auch vertikal durchgängig in den Denk- und Arbeitsprozessen verankert werden.

Möglichst viele Unternehmensbereiche sollten dazu involviert werden, auch solche, die bisher weniger im Fokus standen, wie etwa Management, Marketing und Vertrieb. Die folgenden Kerndefizite um die neue Disziplin „Modellbasierte Systementwicklung" müssen zwischen den Hochschulen, den außeruniversitären Forschungsinstituten und den anwendenden Unternehmen zunächst prioritär überwunden werden:

1. Welche digitalen Modellbildungen von technischen Systemen sind heute und zukünftig für welche Branche prioritär zu behandeln und warum? Ziel muss es sein jenseits der Kategorien CAD, CAE, CAM, CASE etc. die inhaltlichen systemischen Modellbeschreibungen für Produkt- und Produktionssysteme neutral zu erfassen.

2. Welche Formen der Vernetzung von technischen Systemmodellen und damit verbundenen Teilmodellen wie Anforderungen, Funktionen, logisches Verhalten und physikalisches Verhalten sind in welcher Branche gewünscht oder gar erforderlich um welche Fähigkeiten zu ermöglichen (Nachverfolgbarkeit, systemische Intelligenz, Entscheidungsfähigkeit etc.)?

3. Welche Kompetenzen sollen heutige und zukünftige Ingenieure bei der Modellbildung theoretisch und praktisch beherrschen und welche davon dürfen oder sollen den neuen Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz (KI) überlassen werden, bei denen der Ingenieur nur noch über Zustandsänderungen informiert werden soll?

Insbesondere KMU werden durch die OEMs in die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit basierend auf Methoden des MBSE gedrängt. Jedoch sehen sie häufig keine intrinsischen Bedarfe und schrecken eher vor den scheinbar komplizierten Fragestellungen zurück. Im Bereich der Standardisierung wurden einige Lücken herausgearbeitet, dazu wird auch insbesondere mit der Forschungsvereinigung Smart Engineering und den teilnehmenden KMUs weitergearbeitet werden.

LWDP Workshop Zürich

Prof. Wartzack initiierte zusammen mit seinen Kollegen Prof. Ermanni und Prof. Krause das Symposium „Lightweight Design in Product Development (LWD-PD)". In dieser Veranstaltungsreihe sollen speziell Leichtbauthemen aus dem Umfeld der Produktentwicklung adressiert werden. Das neue Symposium „Lightweight Design in Product Development" (LWD-PD 2018) fand in Zürich vom 13. bis 15. Juni 2018 statt. Gastgeber war Prof. Dr. Paolo Ermanni vom Composite Materials and Adaptive Structures (CMAS) Lab der ETH Zürich. Ein besonderes Augenmerk des Leichtbausymposiums lag auf den Themen Leichtbaustrukturen, Entwicklungsmethoden sowie neuen Leichtbaumaterialien und -prozessen.

Foto: KTmfk/M. Franz

Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik stellte dort ein Konzept für einen Multimaterial-Leichtbaukasten in Schnellbauweise vor (T. Stangl, C. Witzgall, S. Wartzack) sowie eine detaillierte Untersuchung des bionischen Verfahrens Computer Aided Internal Optimisation (CAIO) zur Faserorientierungsoptimierung in Verbundbauteilen (H. Völkl, M. Franz, S. Wartzack).

Bei der sehr erfolgreichen Teilnahme wurden beide Beiträge als „Distinguished Paper" zu einem Beitrag im Design Science Journal eingeladen. Zudem erhielt der Beitrag zur CAIO-Methode den dortigen Research Award.

Mitarbeit in Gremien nach Person

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Mitwirken in Universitätsgremien

- Prodekan für Maschinenbau (seit 10/2019)
- Mitglied des Fakultätsvorstands der Technischen Fakultät (seit 10/2019)
- Mitglied des Fakultätsrats der Technischen Fakultät (seit 10/2019)
- Sprecher der Kollegialen Leitung des Department Maschinenbau (seit 10/2019)
- Stellvertretender Sprecher der Kollegialen Leitung des Department Maschinenbau (10/2018 – 09/2019)
- Mitglied der Kollegialen Leitung des Department Maschinenbau (seit 10/2009)
- Mitglied des Fakultätsausschusses zur Verwendung der Studienzuschüsse
- Mitglied der Studienkommission Maschinenbau (seit 2009)

Außeruniversitäres Engagement und Gremienarbeit

- Sprecher der Forschungsgruppe FOR 2271 „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (seit 2016)
- Mitglied in der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften e.v. (seit 2019)

- Stellvertretender Vorsitzender der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung, Sprecher der Fachgruppe „Virtuelle Produktentwicklung" (seit 2017)
- Mitglied des Advisory Board der Design Society und Leiter der Special Interest Group (SIG) „Decision Making" (seit 2013)
- Mitglied des Stiftungsrats der SCHAEFFLER FAG Stiftung (seit 2014)
- Sprecher der Doppelplattform „Digital Production and Engineering" des Zentrum für Digitalisierung Bayern (ZD.B) (seit 2017)
- Wissenschaftlicher Herausgeber der Zeitschrift „Konstruktion" für den Bereich „Virtuelle Produktentwicklung" (seit 2017)
- Program Committee Chair der „International Conference on Engineering Design (ICED) 2019"
- Mitglied des Scientific Committees und Initiator des Symposiums „Lightweight Design in Product Development" (seit 2018)
- Guest Editor der Thematic Collection „Design and Mobility" und "Lightweight Design in Product Development" der Fachzeitschrift "Design Science Journal" (seit 2018)
- Veranstalter des DFX-Symposiums und Herausgeber des Tagungsbands
- Veranstalter der Summer School Toleranzmanagement und Herausgeber des Tagungsbands
- Stellvertretender Standortsprecher im Sonderforschungsbereich/Transregio 73 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (seit 2010)
- Zweiter Vorsitzernder im Alumniverein des Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (ENmfk) (seit 2010)
- Mitglied im erweiterten Vorstand des Sonderforschungsbereich/Transregio 285 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (seit 2019)
- Mitglied im Fachbeirat der Konferenzen „Entwerfen Entwickeln Erleben (eee)", „Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)"
- Honorary Member der internationalen Technology Network Alliance
- Mitglied im Dimensional Management Forum deutscher OEMs

- Mitglied im wissenschaftlichen Ausschuss der Fachkonferenzen: „International Conference on Engineering Design (ICED)", „International Conference on Computer Aided Tolerancing (CIRP-CAT), International Design Conference (DESIGN), „Bearing World"
- Mitglied im wissenschaftlichen Ausschuss der Fachzeitschriften: „Journal of Engineering Design", „Research in Engineering Design", „International Journal of Design Creativity and Innovation" sowie „Computer-Aided Design"

Dr.-Ing. Stephan Tremmel

Mitwirken in Universitätsgremien

- Beratendes Mitglied im Fakultätsunterausschuss zur Verwendung der Studienzuschüsse im Department Maschinenbau als Vertreter des Lehrstuhls (seit 09/2009)
- Mitglied der Kollegialen Leitung des Department Maschinenbau als Vertreter der wissenschaftlichen Mitarbeiter (10/2013 – 09/2017)
- Mitglied der Zugangskommission für den Masterstudiengang Maschinenbau als Vertreter der wissenschaftlichen Mitarbeiter (seit 04/2017)

Außeruniversitäres Engagement und Gremienarbeit

- Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure (seit 2003)
- Vertreter der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Netzwerk Konstruktionslehre der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) (seit 2008)
- Mitglied im erweiterten Leitungskreis des Sonderforschungsbereich/Transregio 73 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (seit 2010)
- Gewähltes Mitglied des Vorstands im Alumniverein des Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (ENmfk) (seit 2010)
- Vertreter der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Arbeitsausschuss Kohlenstoffschichten (NA 062-01-64), Deutsches Institut für Normung (DIN) (seit 2012)

- Mitglied in der Gesellschaft für Tribologie (GfT) (seit 2015)
- Vertreter der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Arbeitsausschuss Wälzlager – Tragzahlen und Lebensdauer (NA 118-01-08), Deutsches Institut für Normung (DIN) (seit 2017)
- Gutachter für die Fachzeitschriften „Coatings", „Friction", „Konstruktion", „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik", „Production Engineering", „Tribology International", „Tribology Transactions"

Dr.-Ing. Benjamin Schleich

Mitwirken in Universitätsgremien

- Mitglied der Studienkommission Wirtschaftsingenieurwesen als stellv. Vertreter der wissenschaftlichen Mitarbeiter (seit 2019)

Außeruniversitäres Engagement und Gremienarbeit

- Mitglied im erweiterten Vorstand des Sonderforschungsbereich/Transregio 285 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (seit 2019)
- Leiter des Arbeitskreis „Datenmanagement" des Sonderforschungsbereich/Transregio 285 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (seit 2019)
- Research Affiliate der Internationalen Akademie für Produktionstechnik (CIRP) (seit 2018)
- Mitglied der internationalen Design Society (seit 2015)
- Chair der Special Interest Group „Robust Design" (SIG RD) der internationalen Design Society (seit 2017)
- Assistant Programme Chair der 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)
- Gutachter für verschiedene Fachzeitschriften (insbes. „Computer-Aided Design", „Mechanism and Machine Theory", „International Journal of Advanced Manufacturing Technology", „Journal of Engineering Design")
- Assistent des Vorstands und Sprecher der Fachgruppe „Virtuelle Produktentwicklung" der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) (seit 2018)

- Mitglied des Scientific Committee der CIRP Conference on Computer-Aided Tolerancing (CIRP CAT) (seit 2018)
- Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure (seit 2009)

Dr.-Ing Jörg Miehling

Außeruniversitäres Engagement und Gremienarbeit

- Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure (seit 2018)
- Mitglied der internationalen Design Society (seit 2015)

Max Marian, M. Sc.

Außeruniversitäres Engagement und Gremienarbeit

- Mitglied in der Gesellschaft für Tribologie e.V. (seit 2019)
- Mitglied des Arbeitskreises Junge Tribologen der Gesellschaft für Tribologie e.V. (seit 2019)
- Gutachter für die Fachzeitschriften „Industrial Lubrication and Tribology", „Tribology International" und „International Journal of Optics and Photonic Engineering"

Benedikt Rothammer, M. Sc.

Mitwirken in Universitätsgremien

- Forschungsnetzwerk Muskuloskelettale Biomechanik (MSB-NET) der Sektion Grundlagenforschung der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU), Netzwerk Cluster Tribologie (seit 2018)

Alexander Wolf, M. Sc.

Mitwirken in Universitätsgremien

- Forschungsnetzwerk Muskuloskelettale Biomechanik (MSB-NET) der Sektion Grundlagenforschung der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU), Netzwerk Cluster Numerische Simulation (seit 2018)

Foto: KTmfk/M. Marian

KTmfk-Lifestyle

Panem et circenses – Brot und Spiele

Schon die alten Römer wussten, dass Brot und Spiele, die hart arbeitenden Bürger vom Aufstand abhielten. Auch am KTmfk werden gemeinsame Feste, Aktivitäten und Unternehmungen großgeschrieben, was die Laune bei den zahlreichen Forschungsprojekten, Industrieaufträgen und Lehrveranstaltungen hochhält. Gutes Essen sowie gemeinsame Gespräche und Aktivitäten abseits des beruflichen Alltags tragen zu unserem besonderen Teamverständnis und dem guten Betriebsklima bei. Und die (mit einem Augenzwinkern zu betrachtenden) drohenden Aufstände werden so erfolgreich abgewendet.

Foto: KTmfk/M. Bader

Foto: KTmfk/T. Niering

Zur festen KTmfk-Tradition gehören die jährlich stattfindende Klausurtagung, der Betriebsausflug und die Weihnachtsfeier. Zudem werden besondere Anlässe wie Promotionen und der ein oder andere runde Geburtstag gebührend zelebriert.

Foto: KTmfk/R. Zhao

Foto: KTmfk/F. Halmos

Damit bei all den vielen Stunden vor dem Bildschirm oder im Labor die Fitness der Mitarbeiter nicht zu kurz kommt, haben sich zwei regelmäßige Termine in der Woche etabliert, an dem sich mehrere KTmfk-Mitglieder nach Feierabend zum Fußball und Volleyball treffen. Auf den nachfolgenden Seiten geben wir einen kleinen Einblick in unser Lehrstuhlleben abseits der Forschungs- und Lehrtätigkeit.

Foto: KTmfk/M. Bader

Klausurtagung – Kreativität & Teamentwicklung

Am Anfang jeden Jahres zieht sich das KTmfk-Team in ein abgelegenes Tagungshotel zurück, um dort in versammelter Runde wichtige Neuerungen zu besprechen und zukünftige Forschungsausrichtungen zu definieren. Zum organisatorischen Standardprogramm werden Trends in Gruppenarbeit mit Workshop-Charakter identifiziert und herausgearbeitet, um Ideen für die zukünftige Forschungsausrichtung zu generieren. Auch innovative Lehrkonzepte oder die Umstrukturierung von Lehrveranstaltungen sind häufig Thema der Klausurtagung. Darüber hinaus sind zumeist eineinhalb Tage der Klausurtagung für die Förderung von Softskills reserviert. In den letzten Jahren wurden zum Beispiel ein Seminar zum Thema wissenschaftliches Schreiben durchgeführt. Im Jahr 2017 wurde aufgrund vieler Neuzugänge und einiger Verabschiedungen ein Teamtrainer engagiert, der das neue Teamgefüge zusammengeschweißt hat.

Neben den Seminaren und den Gruppenarbeiten gehört auch der „Walk&Talk" zur festen Tradition der Klausurtagung – ein gemeinsamer Spaziergang durch die winterliche Natur. Zudem sorgen regelmäßige Kaffeepausen und ein gemeinsames Abendprogramm für einen Ausgleich vom Arbeitsalltag.

Foto: KTmfk/K. Heider

Wein auf Bier – das rat‘ ich dir

Im Sommer findet jedes Jahr ein gemeinsamer Betriebsausflug des KTmfk statt – der Wandertag. Und ja, traditionell gehört tatsächlich ein gemeinsamer „Gewaltmarsch“ durch Weinberge, Bierbraumuseen oder historische Innenstädte zum Rahmenprogramm. Während im Jahr 2017 der Betriebsausflug der Tradition des Bierbrauens gewidmet war, stand im nächsten Jahr die fränkische Weinkelterei im Fokus. Im Brauereimuseum in Kulmbach konnten wir viel über die Geschichte des Bierbrauens erfahren. Im Jahr darauf durften wir auf dem Weingut Helmut Christ ökologischen Weinbau bewundern und selbstverständlich auch das Ergebnis probieren.

Foto: KTmfk/T. Niering

Da Oide gibt de Letzte – Schafkopfrunde @ KTmfk

Ebenso wie Bier, Weißwürste und Leberkäse ist auch der Schafkopf integraler Bestandteil der bayerischen Lebensart. Um dieses wertvolle Kulturgut zu pflegen, versammeln sich am KTmfk jeden Donnerstag die des Spiels mächtigen Mitarbeiter zu einer Kartlrunde. (Gespielt wird mit dem langen Blatt, da der „Kurze“ unter ehrenhaften Schafkopfspielern als „Glücksspiel“ verschrien ist.) Im Laufe zahlreicher Runden mit allerlei Sauspielen, Solos und Wenzen wird dann der Gewinner des Abends ermittelt. Bei dem ein oder anderen Bier kommt dabei auch einmal eine spontane Hochzeit zustande (wir sprechen hierbei jedoch nicht, wie der Laie vermuten könnte, von einer aus Las Vegas importierten Unsitte, sondern von einer regulären Spielart beim Schafkopf).

Wie es Tradition ist, endet auch am KTmfk jede Schafkopfrunde irgendwann (bevor einzelne Spieler in finanzielle Schwierigkeiten geraten) nach dem Prinzip „da Oide gibt de Letzte" (d. h. bei dem Spieler, der im nächsten Spiel den Eichel Ober erhält, beginnt die letzte Runde des Abends). Zweimal im Jahr findet auch ein Turnier statt. Externe Teilnehmer sind bei vorheriger Anmeldung jederzeit willkommen.

Sport @ KTmfk

Aus dem Teamtraining der Klausurtagung 2018 sind zwei Teamsport-Events entstanden, die regelmäßig nach Feierabend stattfinden. Beide werden privat durch Mitarbeiter organisiert und erfreuen sich reger Beteiligung. Am KTmfk Kick-Treff spielen mehr oder weniger talentierte Fußballer gegeneinander. Einige der bereits ausgeschiedenen Mitarbeiter halten über diese Treffs auch den Kontakt zu den aktiven Lehrstuhlkollegen. Zusätzlich hat sich eine Volleyball-Gruppe etabliert, für diejenigen, die ihr sportliches Talent weniger in den Füßen sehen.

Foto: KTmfk/T. Sprügel

Doktorprüfung @ KTmfk

Die wahre Doktorprüfung findet am KTmfk nicht tagsüber vor dem Prüfungskomitee statt, die wesentlich härtere Hürde ist die interne Doktor-Prüfung am Abend. Denn die Kollegen sind schonungslos und bereiten schwierige Spiele und Aufgaben für die frisch promovierten Doktoren vor, die diese absolvieren müssen, um die Promotion offiziell abzuschließen. Diese Prüfung erfordert sportliche und motorische Fähigkeiten sowie ein hohes Maß an Selbstironie. Dabei sind die Spiele selbstverständlich auf die individuellen Fähigkeiten und Vorlieben des Prüflings angepasst. So musste Triathlon-Legende Jörg Miehling den Dr.-Ing.athlon absolvieren, selbstverständlich mit nicht gerade optimaler Ausrüstung (Bild 1). Andere konnten ihre Talente im Modellbau beweisen, wie Martin Weschta (Bild 2). Selbstverständlich werden aber auch eher destruktive Fähigkeiten abgeprüft, wie die systematische „Verschönerung" von alten Tastaturen durch Susan Zöller (Bild 3).

Foto: KTmfk/T. Niering