

11  
102  
1004

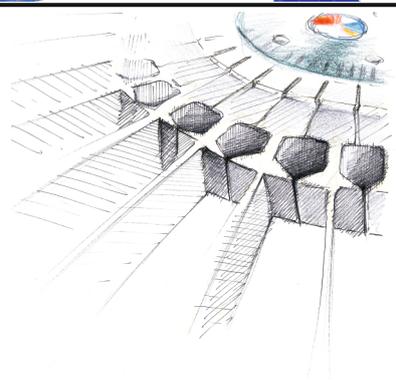
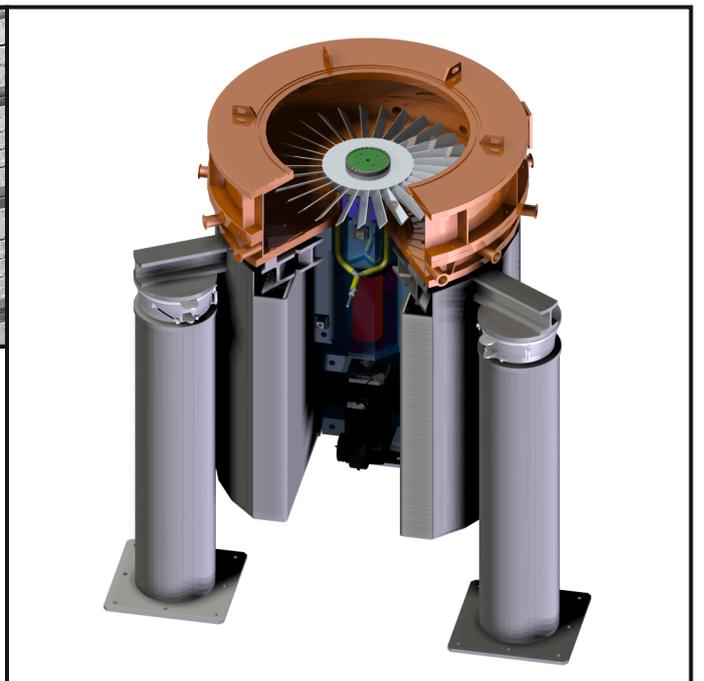
Leibniz  
Universität  
Hannover



Institut für Dynamik und Schwingungen  
Leibniz Universität Hannover



# Jahresbericht 2018 – 2020



# Vorwort

---

Liebe Leser,

der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Aktivitäten des Instituts für Dynamik und Schwingungen während der vergangenen Jahre (Januar 2018 bis Dezember 2020) zusammen. Dabei war es unser Ziel, nicht nur einen Überblick zu geben, sondern punktuell auch interessante Ergebnisse aus unseren Forschungsprojekten herauszustellen und Ihnen zusätzlich einen Einblick in unsere akademische Lehre zu geben. Wir sind davon überzeugt, dass hervorragende Lehre und exzellente Forschung sich nicht ausschließen, sondern sich gegenseitig bedingen und einander befruchten. Und weil wir wissen, dass sehr viele Menschen zum Erfolg des Instituts beitragen, haben wir es nicht versäumt, auch die vielen studentischen Beiträge darzustellen, die im Rahmen von Projekt-, Studien- und Abschlussarbeiten erbracht wurden.

In den Zeitraum dieses Berichtes fällt der Umzug des Institutes aus der Appelstraße auf den Campus Maschinenbau Garbsen der Leibniz Universität Hannover, von uns kurz CMG genannt. Wir haben deshalb auch einen kurzen Abschnitt aufgenommen, in dem wir die uns zur Verfügung stehende Infrastruktur beschreiben.

Wir würden uns freuen, wenn der Tätigkeitsbericht Ihre sehr geschätzte Aufmerksamkeit findet und Sie bei der Lektüre viel Freude haben.

Hannover, Dezember 2020

D. Otto, M. Sc., Redaktion

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wallaschek, Institutsleiter

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Das Institut	4
1.1	Allgemeines	4
1.2	Die Leibniz Universität Hannover (LUH)	5
1.3	Fakultät für Maschinenbau	6
1.4	Geschichte der Mechanik in Hannover	7
1.5	Leitbild und Werte	7
1.6	Institutsleitung	9
1.7	Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	10
1.8	Versuchseinrichtungen	16
1.8.1	Spezial-Prüfstände	16
1.8.2	Universell einsetzbare Messtechnik	17
1.9	Drittmittel-Einnahmen des IDS	19
1.10	Öffentlich geförderte Projekte im Berichtszeitraum	20
2	Aktivitäten im Berichtszeitraum	23
2.1	Veröffentlichungen und Berichte	24
2.1.1	Aufsätze in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und Tagungsbeiträge	24
2.1.2	Studentische Arbeiten	31
2.1.3	Abgeschlossene Dissertationen im Berichtszeitraum	36
2.2	Auszeichnungen	43
2.3	Wissenschaftlicher Austausch	43
3	Forschung	44
3.1	Forschungsgruppe Dynamik rotierender Maschinen	45
3.2	Forschungsgruppe Kontaktmechanik von Elastomeren	60
3.3	Forschungsgruppe Reibung und Tribologie	66
3.4	Forschungsgruppe Nichtlineare Strukturdynamik	72
3.5	Forschungsgruppe Piezo- und Ultraschalltechnologie	79
4	Lehre	97
4.1	Übersicht	98
4.2	Lehrveranstaltungen im Bachelor	99
4.3	Lehrveranstaltungen im Master	100
4.4	Tutorien und studentische Labore	103
4.4.1	ACTIVE-Advanced Classroom for Training in Vibration Experiments	103
4.4.2	Tutorien-Simulationssoftware	104
4.5	Prüfungen	105
4.6	Exkursionen	106
5	Anhang	107
5.1	Dissertationen und Habilitationen	108
5.2	IDS Schriftenreihe	116
6	Anfahrt	120
7	Impressum	121

# 1 Das Institut

---

## 1.1 Allgemeines

Das Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) gehört dem Kernbereich Konstruktion und Entwicklung der Fakultät für Maschinenbau an. Die Forschungsprojekte des IDS werden in fünf Forschungsgruppen

- Dynamik rotierender Maschinen
- Kontaktmechanik von Elastomeren
- Nichtlineare Strukturdynamik
- Piezo- und Ultraschalltechnologie
- Reibung und Tribologie

bearbeitet. Verbindendes Element sind die Modellierung, Simulation und experimentelle Untersuchung von Problemstellungen mit schwingungstechnischem Hintergrund. Im Mittelpunkt steht die grundlegende Beschreibung von Schwingungsphänomenen, die gezielte Anregung und Bedämpfung von Schwingungen und Wellen in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen. Unsere Themen haben grundlegenden Forschungscharakter und umfassen sowohl experimentelle als auch theoretische Methoden. Die Anwendungen sind vielfältig und liegen z. B. in der Energietechnik (Turbomaschinen, Ölbohrstränge, Rotordynamik), Fahrzeugtechnik (Reifen, Fahrdynamik), Produktionstechnik (Ultraschallschweißen) und Medizintechnik (Soft Robot Systems). Am IDS werden einerseits grundlagenorientierte Themen im Rahmen von öffentlichen Vorhaben, gefördert durch die DFG, die EU, das BMBF sowie das BMWi, bearbeitet. Andererseits werden auch anwendungsnahe Fragestellungen im Auftrag von industriellen Forschungsverbänden und Einzelunternehmen untersucht. Die Forschung am IDS ist stark experimentell ausgerichtet. Neben der Modellbildung stellen daher die experimentelle Untersuchung von Fragestellungen sowie die experimentelle Validierung der Simulationsroutinen an eigenen Versuchsständen einen Schwerpunkt der Tätigkeiten dar. Ein nennenswerter Anteil unserer Forschung besteht in der Entwicklung neuer Messverfahren sowie dem Aufbau und Betrieb der dazu notwendigen und oft speziell neu entwickelten Versuchseinrichtungen. Hierzu stehen eine hervorragende Ausstattung sowie eigene Werkstätten zur Verfügung.

---

## 1.2 Die Leibniz Universität Hannover (LUH)



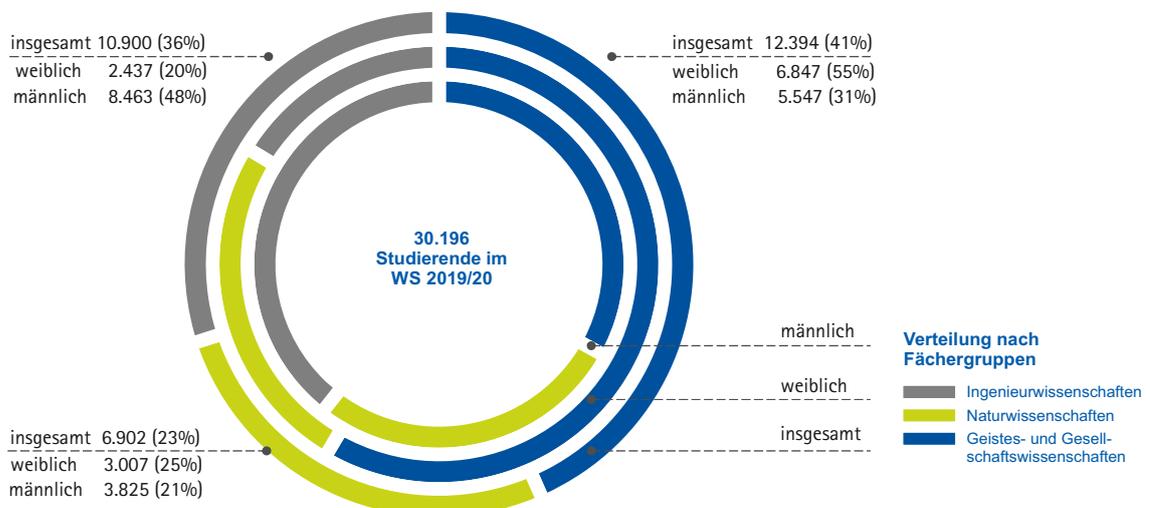
### Mit Wissen Zukunft gestalten

1831 von dem Gelehrten Karl Karmarsch gegründet, startete die "Höhere Gewerbeschule zu Hannover" mit nur 64 Schülern. Heute sind es über 30.000 Studierende in den Natur- und Ingenieurwissenschaften, den Geistes- und Sozialwissenschaften sowie den Rechts- und Wirtschaftswissenschaften.

### Fakultäten der LUH

Naturwissenschaftliche Fakultät
Fakultät für Mathematik und Physik
Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
Fakultät für Maschinenbau
Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
Philosophische Fakultät
Fakultät für Architektur und Landschaft
Juristische Fakultät
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät

### Studierendenzahlen im Wintersemester 2019/20



[Quelle: Zahlenspiegel 2020 der LUH]

### 1.3 Fakultät für Maschinenbau

Die Fakultät in Zahlen (Stand 2020)

- 4.119 Studierende
- 20 Institute
- 794 Mitarbeiterinnen/Mitarbeiter
- 41.800.000 € Drittmittel
- 3 Sonderforschungsbereiche und 2 Transregio



Der neue Campus Maschinenbau Garbsen

#### Institute der Fakultät für Maschinenbau

Produktionstechnik	Energie- und Prozesstechnik	Konstruktion und Entwicklung
Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) Prof. Dr. Matthias Becker	Institut für Thermodynamik (IFT) Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac	Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis	Institut für Kraftwerkstechnik und Wärmeübertragung (IKW) Prof. Dr.-Ing. Roland Scharf	Institut für Kontinuumsmechanik (IKM) Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens	Institut für Mehrphasenprozesse (IMP) Prof. Dr.-Ing. Birgit Glasmacher	Institut für Mechatronische Systeme (imes) Prof. Dr.-Ing. Tobias Ortmaier
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena	Institut für Technische Verbrennung (ITV) Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker	Institut für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Tribologie (IMKT) Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll
Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) N.N.	Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume	Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer		Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (iPeG) Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
Institut für Werkstoffkunde (IW) Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier		
Institut für Montagetechnik (match) Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz		
Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik (IKK) Prof. Dr.-Ing. Hans-Joseph Endres		

## 1.4 Geschichte der Mechanik in Hannover

Bei der Gründung der Höheren Gewerbeschule im Jahre 1831, aus der die heutige Leibniz Universität Hannover hervorgegangen ist, war die Mechanik noch kein eigenständiges Fach. Sie wurde durch K. Karmasch, dem ersten Direktor, im Rahmen der technischen Ausbildung mit vertreten. Aber schon wenige Jahre später, nämlich seit den vierziger Jahren des 19. Jahrhunderts, war die Mechanik als selbständiges Fach in Lehre und Forschung etabliert.

Herausragende Hochschullehrer bis zum Zweiten Weltkrieg waren die Professoren A. Ritter (1857-1870), B. Keck (1871-1900), L. Prandtl (1901-1904), M. Weber (1905-1912) und A. Pröll (1913-1945). Im Jahre 1946 wurde das Institut für Mechanik als Teil der damaligen Technischen Hochschule gegründet. Prof. O. Flachsbar (1946-1957) gelang der schwierige Neuanfang in Forschung und Lehre. Sein Nachfolger Prof. E. Pestel (1957-1977) hat diese Arbeit mit außerordentlichem Erfolg weitergeführt. Großen Anteil an dem weiteren Ausbau des Instituts hatte Prof. O. Mahrenholtz (1966-1982). Mit seinem Wirken fallen die Einrichtung eines zweiten Mechaniklehrstuhls für das Fachgebiet Dynamik und Schwingungstechnik sowie der verstärkte Ausbau der experimentellen Einrichtungen zusammen. Die Professoren J. Wittenburg (1977-1979) und H. Springer (1987-1990) arbeiteten auf den Gebieten Mehrkörpersysteme und Maschinendynamik. Prof. I. Teipel (1968-1998) vertrat das Gebiet der Strömungsmechanik.

Die Gebiete Elasto- und Plastomechanik, Dynamik und Mechatronik wurden durch die Professoren D. Besdo (1978-2006), K. Popp (1981-2005) und B. Heimann (1992-2008) in vielen Einzel- und Verbundvorhaben sehr erfolgreich bearbeitet. Sie alle haben zusammen mit zahlreichen Mitarbeitern das Institut für Mechanik zu einer Institution entwickelt, die sich modernen Fragestellungen der Wissenschaft sowie unterschiedlichen Problemen der Industrie mit Erfolg widmete.

Aus dem Institut für Mechanik gingen im Jahr 2005 das Institut für Dynamik und Schwingungen, das Institut für Kontinuumsmechanik und das Institut für Robotik (seit 04/2009 Institut für Mechatronische Systeme) hervor, die von den Professoren J. Wallaschek (seit 04/2007), P. Wriggers (seit 10/2008) und T. Ortmaier (seit 04/2009) geleitet werden.

## 1.5 Leitbild und Werte

Forschung und Lehre sind für uns gleich wichtig. Wir verbinden Lehre, Grundlagenforschung und deren praxisnahe Anwendung. Unser Antrieb sind Neugierde und Begeisterung für wissenschaftliche Fragestellungen und deren innovative Lösungen. Unser Umgang ist geprägt von Vertrauen und gegenseitiger Wertschätzung, sowohl untereinander als auch gegenüber Studierenden und Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft. Wir sind fair, authentisch und loyal. Servicebereitschaft und Zuverlässigkeit zeichnen uns aus.

### **Wir sind ein weltweit führendes Forschungsinstitut**

Unsere Fachkompetenz in den Gebieten

- Nichtlineare Dynamik und Schwingungen
- Kontaktmechanik und Reibung
- Piezo- und Ultraschalltechnik
- Versuchsstandbau und experimentelle Validierung

entwickeln wir weiter, indem wir wissenschaftliche Fragestellungen aus der Grundlagen und anwendungsnahen Forschung behandeln. Wir sind als aktives Mitglied der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft anerkannt.

### **Wir sind ein verlässlicher Partner für Forschung und Industrie**

Mit einem hohen Maß an Professionalität, Kreativität und Kundenorientierung finden wir auch für umfangreiche und anspruchsvolle Fragestellungen überzeugende und problemspezifische Lösungen in messbar guter Qualität. Basierend auf unseren umfangreichen Erfahrungen nutzen wir bedarfsgerecht ausgewählte theoretische und experimentelle Methoden, die wir systematisch und zielführend einsetzen.

### **Wir bieten akademische Ausbildung auf höchstem Niveau**

Unsere Lehrveranstaltungen im Grundlagen- und Vertiefungsbereich richten sich besonders an Studierende der Ingenieurwissenschaften. Dabei fließen die Ergebnisse unserer aktuellen Forschung unmittelbar in die Inhalte unserer Lehre ein.

Die Einbindung in wissenschaftliche Projekte und eine individuelle Betreuung gibt unseren Promovierenden und auch den Studierenden die Chance, schon früh Beiträge zum Stand der internationalen Forschung zu leisten. Damit schaffen wir eine solide Basis für den optimalen Einstieg in den Beruf und für eine nachhaltig erfolgreiche Karriere in Wissenschaft, Technik oder Wirtschaft.

### **Wir schaffen Raum für persönliche Weiterentwicklung**

Unser Erfolg beruht darauf, dass sich jeder Einzelne stetig weiterentwickelt und qualifiziert. Hierzu bieten wir ein professionelles und kreatives Arbeitsumfeld, das den Zugriff auf modernste Arbeitsmittel, Technologien und Labore umfasst und internationalen wissenschaftlichen Austausch ermöglicht.

Die vertrauensvolle Zusammenarbeit über Fach- und Hierarchiegrenzen hinweg, fördert die persönliche Weiterentwicklung und schafft die Basis für die Übernahme von Fach- und Führungsverantwortung.

## 1.6 Institutsleitung



Professor Wallaschek hat an der Technischen Hochschule in Darmstadt und an der Ecole Centrale de Lyon Wirtschaftsingenieurwesen und Maschinenbau studiert. Nach Promotion und Habilitation war er mehrere Jahre bei der Daimler Benz AG im AEG Forschungsinstitut Frankfurt tätig. Dort war er zuletzt als Fachreferatsleiter für den Bereich Schwingungstechnik verantwortlich.

In seiner anschließenden Tätigkeit als Professor für Mechatronik und Dynamik am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn hat er sich auf die modellbasierte Entwicklung und experimentelle Untersuchung piezoelektrischer Systeme konzentriert. Er war Gründungsvorstand des L-LAB, einem in Public Private Partnership von der Hella KGaA Hueck & Co. und der Universität Paderborn geführten Forschungszentrums für Lichttechnik und Mechatronik, dem er noch heute als externes Mitglied im Beirat verbunden ist. Von 1999 bis 2003 war er Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs der Universität Paderborn.

Seit 01.04.2007 leitet Prof. Wallaschek das Institut für Dynamik und Schwingungen der Leibniz Universität Hannover. Prof. Wallaschek gehört dem Editorial Board verschiedener internationaler Fachzeitschriften an. Die Ergebnisse seiner Arbeit sind in mehr als 250 Veröffentlichungen und über 40 Patentschriften dokumentiert. In der Amtszeit 2012-2015 war Prof. Wallaschek Fachkollegiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft im FK 407 (Systemtechnik), von 2016-2020 war er Fachkollegiat im FK 402 (Mechanik und Konstruktiver Maschinenbau). Seit Januar 2020 ist er Mitglied im Senatsausschuss für Graduiertenkollegs der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

In der akademischen Selbstverwaltung hatte Prof. Wallaschek von 2010-2015 das Amt des Studiendekans und von Januar 2016 bis Juni 2020 das Amt des Dekans der Fakultät für Maschinenbau inne. Im Januar 2017 wurde er zum Ehrenprofessor der Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) ernannt.

## 1.7 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

### Wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter



M. Sc.  
**Rebecca Berthold**  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin



Dipl.-Ing.  
**Steffen Bothe**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Markus Brase**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dipl.-Ing.  
**Gabriel Ertz**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Hannes Fischer**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Alwin Förster**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Jonas Heidelberg**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dipl.-Ing.  
**Michael Hindemith**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Thomas Hoffmann**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Florian Jäger**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Mirco Jonkeren**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Martin Jahn**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dr.-Ing.  
**Stephanie Kahms**  
Gruppenleiterin



M. Sc.  
**Thomas Kasper**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Gleb Kleyman**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Arne Leenders**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dr.-Ing.  
**Yangyang Long**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Niklas Marhenke**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Nam Duc Nguyen**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Christian Nowroth**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Martin Paehr**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dipl.-Ing.  
**Ilja Pletner**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dr.-Ing.  
**Lars Panning-von Scheidt**  
Gruppenleiter  
Lehrkraft für besondere Aufgaben



M. Sc.  
**Stephan Runge**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Klaus-Dieter Schlesier**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Eng.  
**Andreas Sebastian Schmelt**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



M. Sc.  
**Lukas Schwerdt**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter



Dr.-Ing.  
**Sebastian Tatzko**  
Gruppenleiter



Dr.-Ing.  
**Jens Twiefel**  
Gruppenleiter



Dr.-Ing.  
**Matthias Wangenheim**  
Gruppenleiter  
Stellvertretender Institutsleiter



M. Sc.  
**Yongyong Zhu**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

## Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Technik und Verwaltung



M. Sc.  
**Daria Otto**  
Personal und Kommunikation



**Nicole Röbbert**  
Sekretariat



**Michael Runge**  
Techniker



**Jens Bsdok**  
Systemadministrator



**Burkhard Salge**  
Systemadministrator



**Thomas Bannasch**  
Werkstatteleiter



**Stefan Düring**  
Feinmechaniker



**Charlotte Schulz**  
Feinmechanikerin



**Mandy Mahzun**  
Elektronikerin



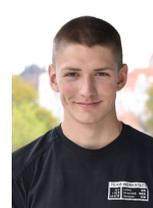
**Frederik Claaßen**  
Auszubildender Industriemechanik



**Fabian Bergmann**  
Auszubildender Industriemechanik



**Jonas Garbe**  
Auszubildender Industriemechanik

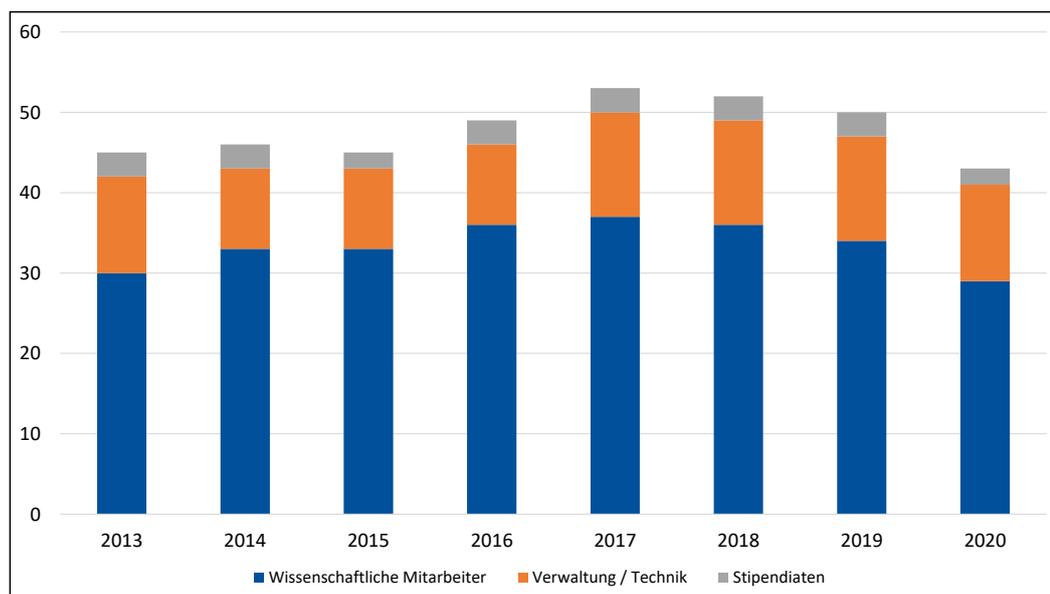


**Simon Moritz**  
Auszubildender Industriemechanik

## Externe Doktoranden im Berichtszeitraum:

Dipl.-Ing. T. Beckmann; M. Bursy, M. Sc.; Dipl.-Ing. C. Cramer; Dr.-Ing. S. Fricke; Dr.-Ing. M. Hüls; Dr.-Ing. G. Karbasi; M. Lutz, M. Eng.; Dr.-Ing. J.-H. Willrodt

## Mitarbeiterstatistik



	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Wissenschaftliche Mitarbeiter	30	33	33	36	37	36	34	29
Verwaltung / Technik	12	10	10	10	13	13	13	12
Stipendiaten	3	3	2	3	3	3	3	2
$\Sigma$	45	46	45	49	53	52	50	43

(Stand jeweils zum 01.12.)

## Ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Berichtszeitraum:

Dr.-Ing. N. Aboulfotoh; Dr.-Ing. F. Bai; M. Sc. P. Bruns; V. Bruns; Dr.-Ing. M. Burgwitz; Dipl.-Ing. I. Gorelik; M. Sc. T. Heinze; Dipl.-Ing. A. Herzog; Dipl.-Ing. V. Hofmann; Dipl.-Ing. I. Ille; Dipl.-Ing. F. Kaptan; D. Karim; Dr.-Ing. T. Linke; Dr.-Ing. T. Marhenke; Dipl.-Ing. H. Ohrdes; S. Paul; N. Remmert; Dr.-Ing. K. Saalbach; S. Schülke; Dipl.-Ing. H. Seefisch; M. Sc. J. Shi; Dipl.-Ing. D. Stauske; M. Sc. L. Wang; M. Sc. M. Weinstein; Dipl.-Ing. T. Wielert; Dipl.-Ing. S. Willeke

## Im Berichtszeitraum am IDS beschäftigte studentische Hilfskräfte

- Abbassi, Abderrahim
- Adnan, Muhammad
- Aichele, Robin
- Al Jaber, Malek
- Alabras, Abdullah
- Alattar, Fouad Mhd
- Albezreh, Mhd Bader
- Aljandali Alrefai, Moham
- Araoud, Mohamed Taha
- Bargel, Tristan
- Bartholdt, Max Niklas
- Bechedli, Amir
- Becker, Jonas
- Beier, Lu
- Ben Fekih Ali, Mahmoud
- Bennour, Mohamed
- Berlekamp, Anton
- Berner, Maike
- Berthold, Rebecca
- Bilinski, Alexander
- Bock, Laura
- Böhm, Christoph
- Bullerdiek, Sven
- Bürger, Lukas
- Brase, Markus
- Bremer, Marvin
- Brilliant, Brilliant
- Brinkmann, Katharina
- Cui, Weizhe
- Dang, Yixiang
- Dannert, Mirjam
- Dingil, Alptug
- Dück, Daniel
- El Hachem, Sari
- Es-Sbai, Younes
- Faulhaber, Daniel
- Fischer, Hannes
- Fogaing Kamgaing, Franck
- Gelies, Tibe
- Gossen, Daniel
- Gökbulut, Ilker
- Göke, Norman
- Gößling, Jan
- Hahn, Tobias
- Haidar, Issam Dahan Huss
- Handoyo, Rozaan Wiryanto
- Hassan, Mahmoud
- Henningsen, Marte
- Hichri, Bassem
- Hoffmann, Aaron
- Holldorf, Sascha
- Hoppe, Daniel
- Höfig, Tobias
- Hu, Chengyan
- Ihmann, Yannik
- Ibrahim, Ali
- Ingenhorst, Ansgar
- Jäger, Florian
- Ji, Yuhang
- Jiang, Kaidong
- Johnen, Sebastian
- Jonkeren, Mirco
- Kamphaus, Lisa
- Kandekar, Chaitanya
- Kaouich, Islam
- Karboui, Bsher
- Khalil, Ali
- Khanbolouki, Atlas
- Köhler, Jochen
- Kök, Hüray Ilayda
- Kolodziejczyk, Felix
- Körner, Thomas
- Krauß, Henrik
- Langer, Jan-Hendrik
- Laßmann, Finn
- Li, Chun
- Li, Jiuxiang
- Löcherer, Christoph
- Mahner, Alexander
- Majewski, Gabriel
- Massing, Alexander
- Meyer, Marius
- Mircea, Michael
- Mlayeh, Oussama
- Mubarak, Omeed
- Mugai, Sebastian-Frank
- Müller, Alexander
- Müller, Henning
- Nguyen, Tien Duong
- Nowroth, Christian
- Odenbach, Edgar
- Ogur, Armine
- Oral, Hasan
- Ortlieb, Eduard
- Özbilen, Hasan
- Paehr, Martin
- Preine, Sebastian
- Printezis, Athanassios-J.
- Qin, Bingyang
- Ragnitz, Jasper
- Ramos Tercero Alvarez, J.
- Reese, Helen Robinson
- Remmers, Claudius
- Rieck, Marcel
- Roitsch, Tim
- Ron, Willi
- Rudolf, Benjamin
- Runk, Timo
- Ruschke, Philipp
- Sauer, Anton
- Schmols, Linda
- Schneidereit, Hauke
- Schroth, Frauline Nicole
- Schüle, Ivo
- Schwarze, Bennet
- Shi, Jian
- Shugar, Sean Andrew
- Sielski, Dario Luka
- Sobotta, Tim
- Stelling, Johan

- Struß, Maik
- Struve, Imke
- Stüwe, Simon
- Tasyürek, Derin
- Tegtmeier, Jan-Philip
- Thale, Christoph
- Torres Huamani, David
- Tragoudas, Alexandros
- Tran, Duc Anh
- Uruena Perez, Luis
- Valero Mebus, Tobias
- Wang, Cong
- Weber, Leonhard
- Wedekamp, Lasse
- Weis, Angelina
- Westphal, Till Sebastian
- Wirtz, Melanie
- Wolfgram, Simon
- Wozniak, Jennifer
- Wöhler, Julia
- Xin, Yimin
- Xue, Chengyang
- Yarcu, Ayten
- Yi, Xuanyu
- Zajaczek, Morten
- Zhang, Yazhou
- Zhang, Yanan

## 1.8 Versuchseinrichtungen

### 1.8.1 Spezial-Prüfstände

- Axialdichtungsprüfstand (Reibkräfte bis 500 N, Geschwindigkeit von 0,1 - 125 mm/s, Temperaturen bis 250 °C)
- Charakterisierung von Leistungsultraschallschwingern
- Ultraschall-Prüfstand für Sonochemische Prozesse (mit Laborabzug)
- Hochgeschwindigkeits-Linear-Prüfstand für Reibuntersuchungen auf verschiedenen Oberflächen (Temperaturbereich von -25 °C bis +55 °C, Normalkraft bis 1000 N, Geschwindigkeit bis 10 m/s) in einer Kältekammer sowie Einrichtung zur Herstellung von Schnee- und Eisoberflächen



Hochgeschwindigkeits-Linear-Prüfstand

- Portable Friction Tester (tragbar, zur Bestimmung von Reibwerten auf Straßenoberflächen, Bodenbelägen und anderen ebenen Reibflächen)
- Prüfstand zum Ultraschalldrahtbonden
- Prüfstand zum Ultraschallunterstützten Niedertemperatursintern
- Rotationsprüfstände für Schaufelkränze (evakuierte Kammer, maximale Drehzahl 5.000 U/min bzw. 3600 U/min)
- Verschiedene Rotationsprüfstände für Schwingungsuntersuchungen von Schaufelkränzen
- Vakuumkammer zur Untersuchung von Strukturdämpfungswerten
- Versuchsstand zur Untersuchung von Schwingungsphänomenen in langen, schlanken Rotoren mit Wandkontakt (skalierte Tiefbohrstränge u.ä.)
- Standversuche zur Bestimmung der Reibungsdämpfung an gekoppelten Turbinenschaufeln
- Standversuche zur Untersuchung von Reibhysteresen und Identifikation verschiedener Materialparameter
- Tribometer zur Untersuchung von Reibpaarungen (Normalkräfte bis 200 N, Geschwindigkeit 0,1 - 3000 mm/s)

## 1.8.2 Universell einsetzbare Messtechnik

### Lasergestützte Schwingungsmesstechnik

- Robotergestütztes 3D-Scanning-Laservibrometer PSV-500 xtra
- 48-Punkt Laservibrometer MPV-800
- 3D-Mikrosystem Analysator MSA-100-3D
- Scanning-Laservibrometer PSV-400, Optischer Derotator, 3D-Laservibrometer, Differentielle faser-optische Laservibrometer



Großgerät RoboVib

### Kamerabasierte Messtechnik

- Hochgeschwindigkeitskamera Phantom v710 mit Vergrößerungsoptik ca.  $1\mu\text{m}$  Auflösung
- Hochgeschwindigkeitswärmebildkamera Flir Sc 7000
- Oberflächenmesssystem Alicona InfiniteFocusSL
- Infrarotkamera (Flir S40)

### Schwingungserregung und Regelung

- Modal-Shaker 5-2000N mit optionaler Schwingungsregelung
- Dynamische-Thermisch-Mechanische Analyse
- Diverse dSpace Echtzeitregelsysteme
- PXIe Systeme zur Mess- und Prüfstandsautomatisierung
- Diverse Ansteuersysteme für Ultraschallschwinger
- Phasenregelung (siehe Seite 94)

### Klassische Sensorik

- Diverse Beschleunigungsaufnehmer
- Diverse Piezo- und DMS-basierte Kraftaufnehmer
- Kapazitive und Induktive Wegmessung
- Optische Wegmessung

### Datenerfassung & -verarbeitung

- Modalanalysesystem mit 88-Kanälen
- 48-Kanal - Datenerfassung mit 250MS/s pro Kanal

### Akustische Messtechnik

- Akustik-Messraum
- Akustische Kamera (Noise Inspector I<sup>2</sup>S mit 112 Kanälen)
- Laser-Mikrophon (Frequenzbereich bis 1MHz)
- Diverse Mikrophone und Hydrophone
- Ultraschall-Laufzeitmesssystem

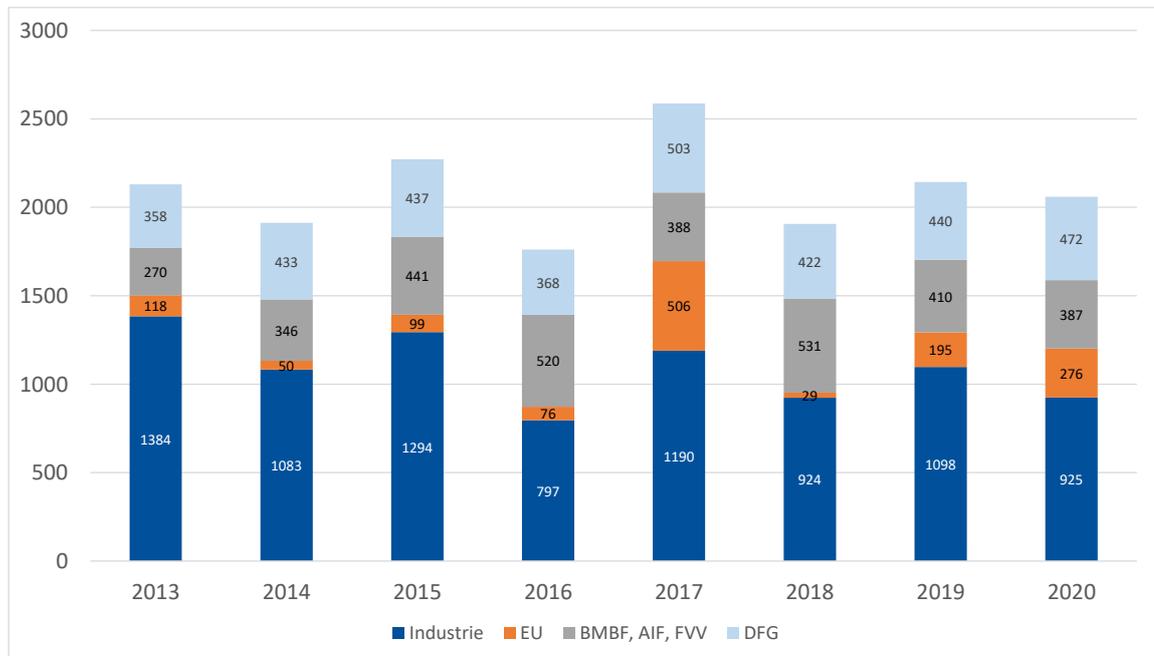
### Elektrische Messtechnik

- Impedanzanalysator, Phase-Gain Analysator
- Diverse Oszilloskope
- Funktionsgeneratoren
- Präzisions-Messtechnik

### Spannungsquellen und Leistungsverstärker

- Strom und Spannungseinprägende Verstärker
  - DC-5 MHz
  - Bis zu 50 kV
  - Bis zu 10A

## 1.9 Drittmittel-Einnahmen des IDS



	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Industrie	1.384	1.083	1.294	797	1.190	924	1098	925
EU	118	50	99	76	506	29	195	276
BMBF, AIF, FVV	270	346	441	520	388	531	410	387
DFG	358	433	437	368	503	422	440	472
Σ	2.130	1.912	2.271	1.761	2.587	1.906	2.143	2.060

(Alle Angaben in t€, Stand jeweils zum 01.12.)

## 1.10 Öffentlich geförderte Projekte im Berichtszeitraum

### AIF - ZIM

- Entwicklung einer neuartigen Schwingungsdämpfung zur Elimination von Nebenwirkungen beim Ultraschallschweißen (siehe Seite 92)
- Entwicklung eines variablen Zuführsystems auf Basis von Ultraschallwellen
- Schwingregelsystem für parallel gekoppelte Schwingererger / Shaker Control Uni); Entwicklung von adaptiven FIR-Filtern und Identifikationsalgorithmen für eine neuartige Methode zur Regelung parallel gekoppelter Schwingererger
- UPUFS-Entwicklung einer Ultraschallinspektionsanlage (Ultrasonic Processing Unit for Full Scan Inspection) zur Überprüfung von plattenförmigen Werkstoffen

### BMWI

- Auslegung von Deckbandkopplungen bei Selbst- und Fremderregung - Teil A: Multiharmonische Strukturanalyse nichtlinearer Deckbandkopplungen bei Fremd- und Selbsterregung
- Innovative Dämpfungsmethoden für Gasturbinen-Endstufenschaufeln
- Frequenz- und Dämpfungsvorhersage für freistehende Turbinenschaufeln mit Unterplattform-Dämpfer (siehe Seite 47)
- Modellierung Verschleiß bei dynamischer Belastung - Kopplung von Schaufeldynamik und Verschleiß auf verschiedenen Zeitskalen (siehe Seite 50)
- Schautext: Schwingungsanalyse von Dampfturbinenschaufeln: Flexibilitätsoptimierung von Dampfturbinenschaufeln (siehe Seite 48)
- Schautext: Vorhersage und Validierung der nichtlinearen Reibdämpfung bei Schaufelschwingungen (siehe Seite 47)
- Schautext: Experimentelle und numerische Analyse gekoppelter Rotor-Schaufel-Schwingungen (siehe Seite 55)
- Schautext: Schwingungsverhalten von Beschaukelungen infolge einer Anregung mit einem kontinuierlichen und bandbegrenzten Spektrum (siehe Seite 53)
- Verbundvorhaben: InnoTurbinE - Innovative Turbomaschinen für nachhaltige Energiesysteme

### DFG

- Mistuning mit Aero-Kupplung II (Mistuning aerodynamisch und strukturmechanisch gekoppelter Beschaukelungen),  
co-Finanziert durch die FVV (siehe Seite 52)
- Grundlagenuntersuchung zur Prozessinteraktion bei hochfrequent schwingenden Werkzeugen zur Bodenbearbeitung
- Reduktion der Losbrechkraft im Pneumatikzylinder unter Nutzung von Ultraschallschwingungen
- Grundlegende Untersuchungen der Mechanismen des Wedge-Wedge Bondens
- Robuste Auslegung nichtlinearer Dämpfungselemente für Strukturen mit vielen Freiheitsgraden
- Taktile Displays für Virtual-Reality-Anwendungen (siehe Seite 81)

- Transiente Effekte an Hydraulikdichtungen (siehe Seite 63)
- Untersuchung der Effizienzpotentiale von anti-resonant betriebenen Hochleistungs-Ultraschallsystemen im Vergleich zum resonanten Betrieb
- Ein kombinierter numerisch-experimenteller Ansatz zur Dämpfungsbewertung von nichtlinearen dissipativen Schwingungssystemen, Schwerpunktprogramm "Calm, Smooth and Smart - Novel Approaches for Influencing Vibrations by Means of Deliberately Introduced Dissipation" (siehe Seite 75)
- Kohärente Methodologie zur Modellierung und zum Entwurf weicher Roboter - Die Soft Material Robotics Toolbox (SMaRT), Schwerpunktprogramm "Soft Material Robotic Systems" (siehe Seite 64)
- Opto-acoustical metamaterials, Exzellenzcluster "PhoenixD" (siehe Seite 96)
- Aeroelastik von Axialverdichtern, SFB 871 "Regeneration komplexer Investitionsgüter; Teilprojekt C6" (siehe Seite 49)
- Ultraschallunterstütztes Laserstrahlschweißen, SFB 1153 "Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming, Teilprojekt A3" (siehe Seite 85)

## EU

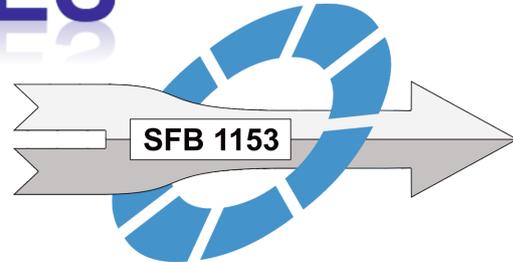
- ANTARES - Advanced Training and Research in Energy Efficient Smart Structures
- SoftSlide - Industrialization and commercialization of mass production processes for the texturing during moulding of dynamic seals in order to increase industrial equipment energy efficiency and durability (siehe Seite 65)
- MouldTex - Friction Optimisation of seals through advanced laser surface texturing of moulds (siehe Seite 68)
- NewSkin: Innovation Eco-system to Accelerate the Industrial Uptake of Advanced Surface Nano-Technologies (siehe Seite 71)
- CO-VERSATILE - Advancing knowledge for the clinical and public health response to the 2019-nCoV epidemic

## FVV

- Mistuning aerodynamisch und strukturmechanisch gekoppelter Beschaufelungen (co-finanziert durch die DFG)
- Entwicklung nichtlinearer Gehäusemodelle und mehrstufiger Model Updating-Strategien für verbesserte rotordynamische Gesamtmodelle Rotordynamik-Gehäusemodelle und Model-Up (siehe Seite 56)



ANTARES



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



TAILORED LIGHT



PhoenixD

Photonics · Optics · Engineering  
Innovation Across Disciplines



Produkt-Regeneration

Regeneration komplexer Investitionsgüter

## 2 Aktivitäten im Berichtszeitraum

---



11  
102  
1004

Leibniz  
Universität  
Hannover

Institut für Dynamik und Schwingungen



## 2.1 Veröffentlichungen und Berichte

### 2.1.1 Aufsätze in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und Tagungsbeiträge

2020

- Arndt, M.; Long, Y.; Dencker, F.; Reimann, J.; Twiefel, J.; Wurz, M. C. (2020 - 2020): Novel Piezoelectric Force Sensor Array for Investigation of Ultrasonic Wire Bonding. In: 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Orlando, FL, USA, June 2020: IEEE, S. 276-283.
- Cao, T.; Li, X.; Wang, B.; Mi, Y.; Zhao, G.; Twiefel, J.; Wu, D. (2020): Viscoelastic analytical model and design of polymer-based bimodal piezoelectric motor. In: Mechanical Systems and Signal Processing 145, S. 106960. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106960.
- Carassale, L.; Denoël, V.; Martel, C.; Panning-von Scheidt, L.: Identification of the essential features of the transient amplification of mistuned systems. Paper GT2020-15693, Proceedings of the ASME 2020 Turbo Expo Conference (2020); ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exhibition, London, UK, September 2020.
- Fischer, H.; Tatzko, S.: Traveling wave effects in structures with local viscous and friction damping. International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA), Leuven, Belgium, September 2020.
- Förster, A.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Equivalent Linearization of Bladed Disk Assemblies with Friction Nonlinearities Under Random Excitation. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4048407>, zgl. Paper GT2020-14264, Proceedings of the ASME 2020 Turbo Expo Conference (2020); ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exhibition, London, UK, September 2020.
- Förster, A.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Forced Response of Nonlinear Systems Under Combined Harmonic and Random Excitation. In: Kerschen G., Brake M., Renson L. (eds) Nonlinear Structures and Systems, Volume 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12391-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12391-8_7), 2020.
- Grajczak, J.; Nowroth, C.; Nothdurft, S.; Hermsdorf, J.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.; Kaielerle, S. (2020): Influence of Ultrasound on Pore and Crack Formation in Laser Beam Welding of Nickel-Base Alloy Round Bars. In: Metals 10 (10), S. 1299. DOI: 10.3390/met10101299.
- Heinze, T.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Global detection of detached periodic solution branches of friction-damped mechanical systems. Nonlinear Dynamics. 99. 10.1007/s11071-019-05425-4, 2020.
- Hoffmann, T.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Single Nodal Diameter Excitation of Turbine Blades: Experimental and Theoretical Study. Paper GT2020-14282, Proceedings of the ASME 2020 Turbo Expo Conference (2020); ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exhibition, London, UK, September 2020.
- Hoffmann, T.; Jahn, M.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Modal Excitation of Circular Rotating Structures Using an Innovative Electromagnetic Device, Mains M., Dilworth B. (eds) Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham DOI: 10.1007/978-3-030-12684-1\_15.
- Jahn, M.; Stender, M.; Tatzko, S.; Hoffmann, N.; Grolet, A.; Wallaschek, J.: The extended periodic motion concept for fast limit cycle detection of self-excited systems, Journal of Computers & Structures, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106139>.

- Kahms, S.; Wangenheim, M. (2020): Experimental Investigation and Simulation of Aircraft Tire Wear. *Tire Science and Technology* <https://doi.org/10.2346/tire.20.180201>.
- Kasper, T.; Tatzko, S.; Wallaschek, J.: Parameter identification for nonsmooth nonlinear dynamical systems. *Konferenzbeitrag ISMA, 2020*.
- Kleyman, G.; Paehr, M.; Tatzko, S. (2020): Application of Control-Based-Continuation for characterization of dynamic systems with stiffness and friction nonlinearities, *Mechanics Research Communications* DOI: 10.1016/j.mechrescom.2020.103520.
- Kleyman, G.; Jahn, M.; Tatzko, S. (2020): Hybrid nonlinear phase resonance testing utilizing real-time substructuring and control based continuation, *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA), Leuven, Belgium, September 7-9, 2020*.
- Marhenke, N.; Wallaschek, J.; Panning-von Scheidt, L.; Tatzko, S.; Hartung, A.; Schwarz, S. (2020): Numerical investigations of the energy transfer between modes due to multi-resonances of a nonlinear friction-damped model, *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA), Leuven, Belgium, September 2020*.
- Leenders, A.; Burgwitz, M.; Wangenheim, M.: Dynamic behavior of fractional viscoelastic tire tread blocks on different ice surfaces. *Tire Science and Technology, 2020*.
- Lian, Y., Long, Y., Zhao, G., Mu, C., Li, X., Deng, J., Xie, C. (2020): Performance of CrCN-WS2 hard/soft composite coated tools in dry cutting of titanium alloys, *Journal of Manufacturing Processes*, 54, pp.201-209, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.014>.
- Long, Y.; He, B.; Cui, W.; Ji, Y.; Zhuang, X.; Twiefel, J. (2020): Investigations on the mechanism of microweld changes during ultrasonic wire bonding by molecular dynamics simulation. In: *Materials & Design* 192, S. 108718. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108718.
- Long, Y.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.: Contact mechanics and friction processes in ultrasonic wire bonding - Basic theories and experimental investigations. *Journal of Sound and Vibration*, 468, 115021, 2020, [doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115021](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115021).
- Lu, X.; Wang, Z.; Shen, H.; Zhao, K.; Pan, T.; Kong, D.; Twiefel, J. (2020): A Novel Dual-Rotor Ultrasonic Motor for Underwater Propulsion. In: *Applied Sciences* 10 (1), S. 31. DOI: 10.3390/app10010031.
- Marhenke, Torben; Neuenschwander, Jürg; Furrer, Roman; Zolliker, Peter; Twiefel, Jens; Hasener, Jörg et al. (2020): Air-Coupled Ultrasound Time Reversal (ACU-TR) For Subwavelength Nondestructive Imaging. In: *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 67 (3), S. 651-663. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2951312.
- Nothdurft, S.; Ohrdes, H.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.; Hermsdorf, J.; Overmeyer, L.; Kaieler, S. (2020): Investigations on the effect of different ultrasonic amplitudes and positions in the vibration distribution on the microstructure of laser beam welded stainless steel. In: Stefan Kaieler und Stefan W. Heinemann (Hg.): *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems IX*. San Francisco, United States, Februar 2020: SPIE, S. 23. Online verfügbar unter <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11273/2566035/Investigations-on-the-effect-of-different-ultrasonic-amplitudes-and-positions/10.1117/12.2566035.full>
- Saalbach, K.-A. (2020): Regelung von Kavitationsprozessen mittels Self-Sensing Kavitationsdetektion. Unter Mitarbeit von Jörg Wallaschek und Hans Jürgen Maier. Garbsen: TEWISS Verlag (Berichte aus dem IDS, 2020, Band 01).
- Scheel, M.; Kleyman, G.; Tatar, A.; Brake, M. R. W.; Peter, S.; Noël, J.-P.; Allen, M. S.; Krack, M. (2020): Experimental assessment of polynomial nonlinear state-space and nonlinear-mode models

for near-resonant vibrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*,  
DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.106796.

- Schmelt, A. S.; Marhenke, T.; Hasener, J.; Twiefel, J. (2020): Investigation and Enhancement of the Detectability of Flaws with a Coarse Measuring Grid and Air Coupled Ultrasound for NDT of Panel Materials Using the Re-Radiation Method. In: *Applied Sciences* 10 (3), S. 1155.  
DOI: 10.3390/app10031155.
- Schmelt, A. S.; Twiefel, J. (2020): Flaw Detection on a Tilted Particleboard by Use of the Spec-Radiation Method, *MDPI Appl. Sci.* 10(23), 8513, <https://doi.org/10.3390/app10238513>.
- Schmelt, A. S.; Twiefel, J. (2020): The Spec-Radiation Method as a Fast Alternative to the Re-Radiation Method for the Detection of Flaws in Wooden Particleboards. In: *Applied Sciences* 10 (19), S. 6663. DOI: 10.3390/app10196663.
- Schmelt, A. S.; Li, Z.; Marhenke, T.; Hasener, J.; Twiefel, J.: Aussagefähigkeit von Fehlstellenimitationen in der ZfP. In *Fortschritte der Akustik - DAGA 2020*, 46. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Hannover, 2020; pp 1133-1136, ISBN 978-3-939296-17-1.
- Schwerdt, L.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: A Model Order Reduction Method for Bladed Disks with Large Geometric Mistuning using a Partially Reduced Intermediate System Model. Paper GT2020-14199, Proceedings of the ASME 2020 Turbo Expo Conference (2020); ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exhibition, London, UK, September 2020.
- Shi, J.; Twiefel, J.; Wallaschek, J. : Optical Visualization of Dynamic Stress Waves in Transparent Solids. In *Spatially, Temporally and Spectrally Adapted Light for Applications: Progress Report of the Lower Saxony PhD Scholarship Program Tailored Light*, 1. Erstausgabe: Lachmayer, R., Roth, B., Wolf, A., Eds.; TEWISS: Garbsen, 2020; pp 45-48, ISBN 978-3-95900-424-4.
- Stender, M.; Jahn, M.; Hoffmann, N.; Wallaschek, J.: Hyperchaos co-existing with periodic orbits in a frictional oscillator, *Journal of Sound and Vibration*, April 2020, DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115203.
- You, C., Zhao, G., Chu, X., Zhou, W., Long, Y., Lian Y. (2020): Design, preparation and cutting performance of bionic cutting tools based on head microstructures of dung beetle, *Journal of Manufacturing Processes*, 58, pp.129-135, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.057>.
- Wallaschek, J.; Heinze, T.; Panning-von Scheid, L.: Deterministic Detection of Isolated Periodic Solution Branches. XXV ICTAM, 23-28 August 2020, Milano, 2020.
- Wang, L.; Wang, X.; Twiefel, J.; Jin, J.; Xu, Q.: Design of a Novel Surface-Bonded Type of Linear Ultrasonic Motor With Single-Phase Excitation. In 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Hong Kong, Hong Kong, 20-21 Aug. 2020; IEEE, 2020 - 2020; pp 1078-1083, ISBN 978-1-7281-6904-0.
- Zhang, T., Long, Y., Mu, C., Zhou, W., Zhao, G., Lian Y. (2020): Performance of soft/hard composite dual-effect coated tool in dry cutting of carbon fiber-reinforced polymer, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, pp.2221-2232, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05778-w>.

## 2019

- Bai, F., Long, Y., Saalbach, K.A., Twiefel, J.: Theoretical and experimental investigations of ultrasonic sound fields in thin bubbly liquid layers for ultrasonic cavitation peening, *Ultrasonics*, 93, pp.130-138, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.11.010>.

- Förster, A.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Approximate Solution of the Fokker-Planck Equation for a Multidegree of Freedom Frictionally Damped Bladed Disk Under Random Excitation. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2019; 141(1):011004-011004-8, Paper No: GTP-18-1279, DOI: 10.1115/1.4040740.
- Förster, A.; Panning-von Scheidt, L., Wallaschek, J.: Forced Response of Nonlinear Systems Under Combined Harmonic and Random Excitation. In: Kerschen G., Brake M., Renson L. (eds) *Nonlinear Structures and Systems, Volume 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-12391-8\_7, 2019.
- Heidelberger, J.: Simulation of friction behaviour of tyre tread blocks in 3-d, 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2019), Crete, Greece.
- Heinze, T.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Global detection of detached periodic solution branches of friction-damped mechanical systems. *Nonlinear Dyn.*, doi:10.1007/s11071-019-05425-4, 2019.
- Heinze, T.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.; Hartung, A.: Coupled wearvibration evolution of bladed disks with friction contact interfaces. *Proc. IGTC Int. Gas Turbine Congress*, Tokyo, 2019.
- Hoffmann, T.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Analysis of Contacts in Friction Damped Turbine Blades using Dimensionless Numbers. *J. Eng. Gas Turbines Power*, doi: 10.1115/1.4044481, 2019.
- Hoffmann, T., Panning-von Scheidt, L., Wallaschek, J.: Measured and Simulated Forced Response of a Rotating Turbine Disk with Asymmetric and Cylindrical Underplatform Dampers. *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4045337>, 2019.
- Hoffmann, T.; Jahn, M.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Modal Excitation of Circular Rotating Structures Using an Innovative Electromagnetic Device. In: Mains M., Dilworth B. (eds) *Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 8. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Proceedings of the 37th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2019*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12684-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12684-1_15)
- Jahn, M., Stender, M., Tatzko, S., Hoffmann, N., Grolet, A., Wallaschek, J.: The extended periodic motion concept for fast limit cycle detection of self-excited systems, *Computers & Structures*, DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.106139.
- Jahn, M.; Tatzko, S.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Comparison of different harmonic balance based methodologies for computation of nonlinear modes of non-conservative mechanical systems. *Mech. Syst. Signal Process.* 127 (2019), 159-171, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.03.005.
- Jahn, M., Panning-von Scheidt, L., & Wallaschek, J., Parameter Variation on Nonlinear Energy Sink attached to Multiple Degree of Freedom System, Konferenz: GAMM 2019, Veröffentlicht in: PAMM.
- Kaptan, F.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Experimental Nonlinear Vibration Analysis of a Shrouded Bladed Disk Model on a Rotating Test Rig. In: Kerschen G., Brake M., Renson L. (eds) *Nonlinear Structures and Systems, Volume 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-12391-8\_21, 2019.
- Leenders, A.; Kahms, S.; Wangenheim, M.: Contact of viscoelastic siped tyre tread blocks on gravel road, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (Eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2019)*, Crete, Greece.

- Li, Y., Cheng, Z., Chen, X., Long, Y., Li, X., Li, F., Li, J., Twiefel, J.: Constitutive modeling and deformation analysis for the ultrasonic-assisted incremental forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104, pp.2287/2299 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04031-3>.
- Long, Y., Bai, F., Zhang, Y., Saalbach, K.A., Twiefel, J.: Impacts of ultrasound on oxide removal-An attempt towards acid-free cleaning, *Ultrasonics sonochemistry*, 57, pp.1-11 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.003>.
- Long, Y., Schneider, F., Li, C., Hermsdorf, J., Twiefel, J., Wallaschek, J.: Quantification of the energy flows during ultrasonic wire bonding under different process parameters, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(3), pp.449-463 DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00061-0>
- Long, Y.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.: Contact mechanics and friction processes in ultrasonic wire bonding - Basic theories and experimental investigations. In: *Journal of Sound and Vibration* 468, S. 115021. DOI: 10.1016/j.jsv.2019.115021.
- Oettinger, M.; Prohaska, P.; Schwerdt, L.; Panning-von Scheidt, L.; Herbst, F.; Seume, J. (2019): Potenzialstudie eines Verbunds aus entkoppelt betriebenen Aeroderivaten, Beitrag in: Hurtado, A.; Beckmann, M.; (Hrsg.): *Kraftwerkstechnik 2019*, SAXONIA ISBN: 3934409938.
- Schlesier, K.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Experimental validation of transient resonance passages of mistuned cyclic structures. *Proc. IGTC Int. Gas Turbine Congress, Tokyo, 2019*.
- Schmelt, A. S., Fischer, E. C., Hoffmann, V., Twiefel, J., Wurz, M. C.: Vibro-tactile displays for stimulating surface impressions, *PROCEEDINGS of the 23rd International Congress of Acoustics 9 to 13 September in Aachen, Germany*, pp. 1000-1007, ISBN: ISSN 2226-7808 and 2415-1599, ISBN 978-3-939296-15-7.
- Schmelt, A. S.; Marhenke, T.; Twiefel, J.: Identifying objects in a 2D-space utilizing a novel combination of a re-radiation based method and of a difference-image-method, *PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany*, pp. 8156-8163, ISBN: ISSN 2226-7808 and 2415-1599 ISBN 978-3-939296-15-7.
- Schwerdt, L.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: A Priori Interface Reduction for Substructuring of Multistage Bladed Disks. *Dynamic Substructures, Volume 4, Proceedings of the 37th IMAC, a Conference and Exposition on Structural Dynamics*, DOI: 10.1007/978-3-030-12184-6\_2, 2019.
- Schwerdt, L.; Berger, R.; Panning-von Scheidt, L.; Gebhardt, C.G.; Wallaschek, J.; Rolfes, R.: Probabilistic Study of Blend Repairs on an Axial Compressor Blisk using the Subset of Nominal Modes Method. *Proc. IGTC Int. Gas Turbine Congress, Tokyo, 2019*.
- Schwerdt, L.; Willeke, S.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Reduced-Order Modeling of Bladed Disks Considering Small Mistuning of the Disk Sectors. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2019; 141(5):052502-052502-7, doi: 10.1115/1.4041071
- Steinwolf, A., Wangenheim, M. and Wallaschek, J.: On the use of non-Gaussian models for statistical description of road micro-surface profiles, *Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing*, Vol. 13, No. 3, pp.260-274 DOI: 10.1504/IJVSMT.2019.101551.
- Tatzko, S.; Jahn, M.: On the use of complex numbers in equations of nonlinear structural dynamics, *Mechanical Systems and Signal Processing*, DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.02.041.
- Wallaschek, J.; Willeke, S., Panning-von Scheidt, L.: Discussion of "Dynamic Modeling and Projection-Based Reduction Methods for Bladed Disks With Nonlinear Frictional and Intermittent Contact Interfaces" (Mitra, M., Epureanu, B. I., 2018, *ASME Appl. Mech. Rev.*, 71(5), p. 050803). *ASME. Appl. Mech. Rev.* September 2019; 71(5): 055502. <https://doi.org/10.1115/1.4044933>, 2019.

2018

- Aboufotouh, N.; Twiefel, J. (2018): On developing an optimal design procedure for a bimorph piezoelectric cantilever energy harvester under a predefined volume. *Mechanical Systems and Signal Processing* 106 (2018): 1-12.
- Bai, F., Saalbach, K.-A., Long, Y., Twiefel, J. and Wallaschek, J., 2018. Capability evaluation of ultrasonic cavitation peening at different standoff distances. *Ultrasonics*, 84, pp. 38-44.
- Bai, F.; Saalbach, K.-A.; Wang, L.; Wang, X.; Twiefel, J. (2018): Impact of time on ultrasonic cavitation peening via detection of surface plastic deformation, *Ultrasonics* DOI: /10.1016/j.ultras.2017.12.001.
- Behrens, B.A., Chugreev, A.; Matthias, T.; Nothdurft, S.; Hermsdorf, J.; Kaierle, S.; Ohrdes, H.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.; Mildebrath, M.; Hassel, T. (2018): Investigation of the composite strength of hybrid steel-steel semi-finished products manufactured by laser beam welding and friction welding, 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE of recent trends in structural materials (COMAT), 14.-16.11.2018, Pilsen DOI: 10.1088/1757-899X/461/1/012049.
- Bonhage, M.; Adler, J.T.; Kolhoff, C.; Hentschel, O.P.; Schlesier, K.-D.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Transient amplitude amplification of mistuned structures: An experimental validation. *J. Sound and Vibration* 436 (2018) 236-252, DOI: 10.1016/j.jsv.2018.07.031.
- Förster, A.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Approximate Solution of the Fokker-Planck Equation for a Multidegree of Freedom Frictionally Damped Bladed Disk Under Random Excitation. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2018; 141(1):011004-011004-8, Paper No: GTP-18-1279, DOI: 10.1115/1.4040740.
- Fricke, S.; Hager, C.; Solovyev, S.; Wangenheim, M.; Wallaschek, J. (2018): Influence of surface form deviations on friction in mixed lubrication, *Tribology International*, Volume 118, 491-499 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.032>.
- Gorelik, I.; Wiese, M.; Bürger, L.; Tatzko, S.; Hohl, A.; Reckmann, H.; Wallaschek, J. (2018): Application of the Transfer Matrix Method for the Analysis of Lateral Vibrations of Drillstrings with Parameter Uncertainties, Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3, Proceedings of the 36th IMAC, February 12-15, Orlando (FL), Society of Experimental Mechanics Series, Springer International Publishing.
- Hartung, A.; Hackenberg, H.-P.; Krack, M.; Gross, J.; Heinze, T.; Panning-von Scheidt, L.: Rig and Engine Validation of the Nonlinear Forced Response Analysis Performed by the Tool OrAgL. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2018;141(2):021019-021019-9.
- Heinze, T.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.; Hartung, A.: Rotational Speed-Dependent Contact Formulation for Nonlinear Blade Dynamics Prediction. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2018; 141(4): 042503-042503-11, doi: 10.1115/1.4040843.
- Hüls, M.; Panning-von Scheidt, L., Wallaschek, J.: Influence of Geometric Design Parameters onto Vibratory Response and HCF Safety for Turbine Blades with Friction Damper. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2018; 141(4):041022-041022-10, doi: 10.1115/1.4040732.
- Hüls, M.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J. (2018): Combined Airfoil and Snubber Design Optimization of Turbine Blades With Respect to Friction Damping. *J. Turbomach.* 2018; 140(8):081007-081007-11, TURBO-18-1048 DOI: 10.1115/1.4040679.
- Jahn, M., Tatzko, S., Panning-von Scheidt, L., Wallaschek, J.: Computation of nonlinear modes of non-conservative mechanical systems. *Konferenzbeitrag ISMA 2018*.
- Kaptan, F.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Numerical and Experimental Study of Shrouded Blade Dynamics Considering Variable Operating Points. ASME paper GT2018-76692, Int. Gas Turbine & Aeroeng. Congress and Exh., Oslo.

- Kasper, T., Tatzko, S., and Wallaschek, J. (2018): Nonlinear time series analysis of drillstring lateral vibrations. Paper presented at International Conference on Noise and Vibration Engineering, KU Leuven, Belgium.
- Kleyman, G., Kang, T., Twiefel, J., et al. (2018). Characterization of Triboelectric Charge Generation between PTFE and Nylon after Repeated Contacts. *Energy Harvesting and Systems*, 4(4), pp. 1-12, doi:10.1515/ehs-2018-000.
- Long, Y., Dencker, F., Isaak, A., Li, C., Schneider, F., Hermsdorf, J., Wurz, M., Twiefel, J. and Wallaschek, J., 2018. Revealing of ultrasonic wire bonding mechanisms via metal-glass bonding. *Materials Science and Engineering: B*, 236, pp.189-196.
- Long, Y., He, B., Cui, W., Zhuang, X. and Twiefel, J., 2018. Molecular dynamics simulation of micro-welds formation and breakage during ultrasonic copper wire bonding. In *Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 1434-1439.
- Long, Y., Li, Y., Sun, J., Ille, I., Li, J. and Twiefel, J., 2018: Effects of process parameters on force reduction and temperature variation during ultrasonic assisted incremental sheet forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1886-0>.
- Marhenke, T.; Neuenschwander, J.; Furrer, R.; Twiefel, J.; Hasener, J.; Niemz, P.; Sanabria, S. J. (2018): Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites. In: *NDT & E International* 99, S. 1-12. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.05.012.
- Marhenke, T.; Sanabria, S. J.; Twiefel, J.; Furrer, R.; Hasener, J.; Neuenschwander, J.; Wallaschek, J. (2018): Three-dimensional Sound Field Computation and Optimization of the Delamination Detection based on the Re-Radiation. In: *Proceedings of the 12th European conference on Non-Destructive Testing*, Göteborg.
- Nothdurft, S., Ohrdes, H., Twiefel, J., Wallaschek, J., Mildebrath, M., Maier, H. J., Hassel, T., Overmeyer, L., Kaierle, S (2018): Influence of ultrasonic amplitude and position in the vibration distribution on the microstructure of a laser welded aluminum alloy, *Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO®)*, 14.-18.10.2018, Orlando.
- Nothdurft, S.; Springer, A.; Kaierle, S.; Mildebrath, M.; Maier, H. J.; Hassel, T.; Ohrdes, H.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.; Overmeyer, L. (2018): Laser welding of dissimilar low-alloyed steel-steel butt joints and the effects of beam position and ultrasound excitation on the microstructure, *Journal of Laser Applications* 30, 3, 032417.
- Saalbach, K.-A.; Ohrdes, H.; Twiefel, J. (2018): Closed Loop Cavitation Control - A Step Towards Sonomechanics, *Ultrasonics Sonochemistry* DOI: /10.1016/j.ultsonch.2018.01.021.
- Saalbach, K.-A.; Twiefel, J.; Wallaschek, J. (2018): Self-sensing cavitation detection in ultrasound-induced acoustic cavitation, *Ultrasonics* DOI: /10.1016/j.ultras.2018.06.016.
- Sanabria, S. J.; Marhenke, T.; Furrer, R.; Neuenschwander, J. (2018): Calculation of volumetric sound field of pulsed air-coupled ultrasound transducers based on single plane measurements. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 65 (1), S. 72-84. DOI: 10.1109/TUFFC.2017.2773619.
- Schlesier, K.-D.; Panning-von Scheidt, L., Wallaschek, J.: Investigations on Transient Amplitude Amplification by Applying Intentional Mistuning. ASME paper GT2018-75514, *Int. Gas Turbine & Aero-eng. Congress and Exh.*, Oslo, 2018.
- Schmelt, A. S.; Hofmann, V.; Fischer, E. C.; Wurz, M. C.; Twiefel, J.: Design and characterization of the lateral actuator of a bimodal tactile display with two excitation directions. *Displays* 54 (2018) pp.34-46 DOI: 10.1016/j.displa.2018.09.002.

- Schmelt, A. S.; Fischer, E. C.; Wurz, M. C.; Twiefel, J.: Solid-State Joint Actuator for a Vibro Tactile Line Display Proceedings ACTUATOR 2018, June 25-27, Bremen, Germany, pp.284-287 ISBN 978-3-933339-30-0.
- Schwerdt, L.; Willeke, S.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Reduced-Order Modeling of Bladed Disks Considering Small Mistuning of the Disk Sectors. J. Eng. Gas Turbines Power. 2018; 141(5):052502-052502-7, doi: 10.1115/1.4041071.
- Wang, L., Sun, W., Long, Y., Yang, X. (2018): Reliability-Based Performance Optimization of Tunnel Boring Machine Considering Geological Uncertainties, IEEE Access 6, pp. 19086 - 19098 DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2821190.
- Willeke, S.; Panning-von Scheidt, L.; Wallaschek, J.: Reduction of the Maximum Response Amplitude through Mode Localization, 23rd Blade Mechanics Seminar, Winterthur, Switzerland, September 11, 2018.
- Willeke, S.; Schwerdt, L.; Panning-von Scheidt, L., Wallaschek, J.: Intentional Response Reduction by Harmonic Mistuning of Bladed Disks with Aerodynamic Damping. J. Eng. Gas Turbines Power. 2018;140(12):121010-121010-10. doi:10.1115/1.4040898.
- Yokozawa, H., Twiefel, J., Weinstein, M., Morita, T. (2018): Resonant Frequency Control of the Ultrasonic Transducer Using Simulated Inductor, Actuator 2018 - International Conference on New Actuators, pp. 433-437, Bremen, Germany, VDE Verlag GmbH Berlin, ISBN 978-3-8007-4675-0, 2018.

### 2.1.2 Studentische Arbeiten

#### Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten

- Abel, Arvid  
Untersuchung der Möglichkeiten zur Körperschallreduktion in Schiffsgetriebenen
- Aloui, Zied  
Automatisierte Auswertung von Stabilitätskarten
- Arndt, Hendrik  
Morphing Tray - Entwicklung eines Prototypen einer oberflächenwandelnden Ablage in einer Fahrzeugarmlehne
- Berthold, Rebecca  
Entwicklung eines Finite Elemente Modells zur Simulation eines weichen Robotersegments unter Last
- Borschel, Malte  
Analytische Modellierung eines Ultraschall-Biege-Resonators mit Multifrequenzanregung
- Brand, Stefan  
Identifizierung von Materialparametern von plattenförmigen Holzwerkstoffen mit verschiedenen NDT-Techniken (Non Destructive Testing) mittels luftgekoppelten Ultraschall (ACU)
- Brinkmann, Katharina  
Vergleich von Berechnungsprogrammen zur Simulation nichtlinearer Übertragungsfunktionen von Turbinenschaufeln
- Cui, Yingyu  
Entwicklung und Konstruktion eines großflächigen Ultraschallschwingers für die zerstörungsfreie Prüftechnik

- Deike, Kilian  
Experimentelle Charakterisierung von Gummireibung auf trockenen und nassen rauen Oberflächen
- Dong, Shuo  
Der Einfluss des Strömungsfelds einer beweglichen Platte auf das Schallfeld eines Ultraschallwandlers
- Dorinskiy, Gennady  
Automatisierte grafische Auswertung von Versuchsdaten und Integration in LATEX
- Duc Do, Viet  
Vibroakustische Transferpfadanalyse an einer skalierten KFZ-Struktur
- Eggert, Carsten  
Identifikation querdynamischer Kennwerte aus Fahrzeugmessdaten der Subjektivbewertung
- Ernst, Waldemar  
Entwicklung einer automatisierten Auswertungsprogramm-Kette für Lichtassistenzfunktionen im Kraftfahrzeug
- Es-Sbai, Younes  
Entwicklung eines adaptiven Quadraturverfahrens zur numerischen Zeitintegration periodischer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen
- Fernandes, Marvin  
Bestimmung dynamischer Reifenkraftschwankungen aus quasi statischen Messungen
- Fourate, Mohamed Ali  
Numerische Untersuchung der Dynamik frei schwingender nichtlinearer Systeme mit mehreren Freiheitsgraden
- Frühauf, Pascal  
Entwicklung, Aufbau und Erprobung von Über- und Unterdruckklappen zum Einsatz in einem aktiven hydraulischen Motorlager
- Garras, Tom  
Untersuchung stanznietgeklebter Mischbauverbindungen unter dem Einfluss des KTL-Prozesses im Karosserieleichtbau
- Gözören, Yakub  
Implementierung und Vergleich von Regelungskonzepten für die Schwingungsprüfung mittels elektrodynamischer Shaker
- Hamdan, Roni  
Reibung dynamischer Dichtung in der Pneumatik
- Hassan, Mahmoud  
Simulation und Konstruktive Auslegung eines Steuergerätprüfstandes für Hardware-In-The-Loop Rollover-Crash Szenarios
- Heidelberger, Jonas Alexander  
Simulation des Reibverhaltens von Reifenprofilblöcken unterschiedlicher Breite
- Hoang, Bosheng  
Experimentelle Ermittlung der Eigenschaften von Piezokeramik
- Hu, Di  
Experimental investigation of peening cylindrical workpieces utilizing two ring sonotrodes with different vibration modes

- Huy, Hoa Trinh  
Modellierung von Patchreparaturen an einer Verdichterblick zur Bewertung des hochzyklischen Ermüdungsverhaltens
- Kilian, Julia  
FE-Simulation von der Wechselwirkung zwischen einem Ohrpasstück und einem modellierten Gehörgang
- Kinder, Julius  
Untersuchung der Achsdynamik mit Ultraschallsensoren
- Koch, Christian  
Experimentelle Untersuchung zur transienten Amplitudenüberhöhung verstimmter Systeme mithilfe von akustischer Anregung
- Korn, Stefan  
Potenziale einer passiven Entkopplung eines Nicksitzes
- Köhler, Jochen  
Entwicklung eines Matlab-Tools mit grafischer Benutzeroberfläche zur Durchführung einer Transferpfadanalyse am Beispiel eines KFZ-Modells
- Krüger, Philipp  
Untersuchung und Modellierung des Einflusses der Spikebettung auf die Kraftübertragung auf Eis
- Krüger, Tristan  
Entwicklung eines adaptiven Korrekturreglers zur Bestimmung der Achslast bei mechanisch gefederten Nutzfahrzeugen
- Kubatschek, Tido  
Untersuchung nichtlinearer mechanischer Systeme unter farbiger Rauschanregung mittels der Methode der äquivalenten Linearisierung
- Leenders, Arne  
Kontaktuntersuchungen an fraktional viskoelastischen Winterreifenprofilblöcken auf „Rough Ice“
- Li, Jiawen  
Analysis of the Stress Distribution in the Glass Substrate during Ultrasonic Metal-Glass Bonding
- Li, Jiuxiang  
Experimental Investigation of a Contamination-free Sonotrode for Wastewater Treatment
- Liu, Chang  
Simulation and experimental investigation of ultrasonic cavitation peening on inner surfaces of holes
- Liu, Zhihao  
Recherche über akustische Sensoren
- Lucher, Eugen  
Untersuchung transienten Systemverhaltens piezoelektrischer Wandler mit aktiver Impedanzanpassung
- Lüttel, Holger  
Implementation des PAYNE-Effekts in ein viskoelastisches Materialmodell
- Marhenke, Niklas  
Biegeschwingungen von Tiefbohrsträngen mit nichtlinearen Wandkontakten
- Mebus, Tobias Valero  
Lokalisierte Schaufelschwingungen mit Reibkontakt

- Mehl, Maximilian  
Geometrisch geführte luftgekoppelte Ultraschallwellen
- Missal, Thomas  
Untersuchung von Active Noise Cancelling Verfahren an einer skalierten KFZ- Karosserie
- Müller, Felix  
Untersuchung des Reifeneinflusses auf die Kippstabilität eines modernen SUVs während des NHTSA Fishhook-Manövers
- Müller, Henning  
Modellierung und Simulation transienter Vorgänge eines Reibungsschwingers mit überlagerter Ultraschall-Anregung unter Verwendung unterschiedlicher Kontaktmodelle
- Noun, Hassan  
Data Driven Documents für agile Entwicklungsprozesse in der Automobilindustrie
- Oelmann, Lukas  
Experimentelle Untersuchung zur Längung eines Elastomerzahnriemens für den Anlaufzeitraum von der Fertigung bis 1000Km Laufleistung
- Ortlieb, Eduard  
Drehschwingungsanalyse an einem Modifizierten Schleifbock
- Paehr, Martin  
Untersuchung von Lösungsverfahren für nichtlineare Differentialgleichungen mit Reibungsdämpfung
- Pokroppa, Malte  
Entwicklung und Erprobung einer neuen Prüfbedingung zur Kordauspulsresistenz für Keilrippenriemen
- Porstmann, Thomas  
Untersuchung zur Visualisierung von Kavitationsfeldern mittels Sonolumineszenz
- Qi, Gang  
Experimental investigation of peening cylindrical workpieces utilizing a transducer with ring sonotrode
- Ragnitz, Jasper  
Anwendung der Methode der äquivalenten Linearisierung auf zufallerregte mechanische Systeme mit nichtlinearen Kopplungen
- Rathe, Benjamin  
Einfluss des Lagerungs- und Verarbeitungsprozesses von Reifenrohlingen auf die Gleichförmigkeit von LKW-Reifen
- Ron, Willi  
Modellbasierte Toleranzsynthese von piezoelektrisch schwingenden Systemen mit Hilfe von MATLAB und optiSLang
- Rose, Alexander  
Entwicklung von Auswertemethoden zur Untersuchung von nichtlinearen und transienten Fahrzeugbewegungsgrößen
- Sharifi, Zoheil  
Verbesserung der Extrusionsstabilität von NR-Mischungen

- Taschner, Jannis  
Entwurf und experimentelle Charakterisierung eines Reglers für ein lineares Wanderwellentransportsystem
- Tepper, Florian  
Simulation und experimentelle Untersuchung von Luft-gekoppelten Ultraschallfeldern (ACU)
- Thale, Christoph  
Online-Detektion der Reifeneigenschaften während eines Trommeltests
- Veltmaat, Lennart  
Analytische Modellierung der Reifenprofil-Schnee Wechselwirkung
- Wang, Zehao  
Identifizierung von Materialparametern von Holzwerkstoffen mittels luftgekoppeltem Ultraschall (ACU) unter Verwendung der Christoffel-Gleichung
- Wang, Zehao  
Modellierung einer multifrequenten Linienquelle für die Anwendung im Bereich des luftgekoppelten Ultraschalls
- Wei, Shuye  
FE-Simulation von den Interaktionen zwischen Ohrpasstück und Gehörgang beim Kauen
- Yacoubi, Mohamed Amine  
Modellierung und Simulation von Losbrechvorgängen im Metall-Elastomer-Kontakt mit Relativbewegung mittels 2D-FEM
- Zha, Tingting  
Modeling and Investigation of Dynamic Behavior and Contact Mechanism of a V-Shaped Sandwich Piezoelectric Transducer
- Zhu, Shuyi  
Anpassung des Rayleigh-Sommerfeld-Beugungsintegrals für die Auswertung an geneigten Ebenen

### 2.1.3 Abgeschlossene Dissertationen im Berichtszeitraum

- **Stephanie Kahms (12.11.2020)**

**“Thermo-mechanische Modellierung von Flugzeugreifen für transiente Manöver”**

Der Flugzeugreifen ist das Bindeglied zwischen Flugzeug und Landebahn und überträgt innerhalb der Kontaktfläche Kräfte und Momente. Dazu zählen Vortriebs- und Bremskräfte sowie die Seitenführungskräfte bei Kurvenfahrten. Während des Landevorgangs wirken auf den Flugzeugreifen enorme Kräfte. Vor allem beim Aufsetzen kommt es zu sichtbarem Reifenabrieb, aber auch der sich anschließende Bremsvorgang bzw. das folgende Taxiing spielen eine Rolle für die Temperaturentwicklung und den Reifenverschleiß. Im Rahmen dieser Arbeit werden die transienten Vorgänge am Flugzeugreifen mit Hilfe einfache physikalischer Modelle abgebildet. Diese haben gegenüber komplexen FE-Modellen vor allem Vorteile in Bezug auf die Rechenzeit. Ein besonderer Fokus der Arbeit liegt auf der Berechnung der Kontaktkräfte in longitudinaler und lateraler Richtung sowie der Temperatur- und Abriebsberechnung unter transienten Bedingungen, wie sie beispielsweise bei der Landung oder dem Taxiing auftreten. Für die Simulation der Kontaktkräfte wird ein erweitertes Bürstenmodell verwendet, welches ein bekanntes Modell zur Beschreibung eines rollenden, deformierbaren Rades ist. Die Reifentemperatur wird über eine transiente Wärmeleitungsgleichung berechnet. Sie ist abhängig von sowohl äußeren, als auch inneren, reibungsbedingten Wärmeflüssen. Zur Berechnung des Reifenverschleißes wird eine Abriebsgleichung aus experimentellen Ergebnissen hergeleitet. Die freien Modellparameter werden experimentell identifiziert und das Gesamtmodell anhand von Messungen am Gesamtreifen validiert. Sich anschließende Simulationen dienen zur Analyse verschiedener Lande- bzw. Fahrzustände und verfolgen das Ziel ein besseres Verständnis für insbesondere die Temperaturentwicklung sowie den Reifenabrieb zu erlangen.

- **Matthias Hüls (15.10.2020)**

**“Der Einfluss geometrischer Auslegungsparameter auf die Dynamik reibungsgedämpfter Turbinenschaufeln”**

Der globale Energiemarkt vollzieht einen Wandel hin zu dezentralisierten Systemen und vorrangig regenerativen Energieträgern. Gleichzeitig nimmt die Bedeutung hocheffizienter Gas- und Dampfkraftwerke am fossilen Energiemix zu. Herzstück dieser Anlagen ist die Gasturbine, deren Schaufeln im Betrieb hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Dabei steht insbesondere die hochzyklische Ermüdung (HCF) im Fokus, die durch selbst- oder fremderregte Schwingungen ausgelöst wird. Im kritischen Fall der Resonanz können die Schwingungsamplituden über gezielt eingebrachte Reibkontakte in Form eines Stützflügels oder Dämpfungselements effektiv gemindert werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. In dieser Arbeit werden die bisher nur äußerst begrenzt behandelten Zusammenhänge zwischen den geometrischen Auslegungsparametern einer Turbinenschaufel und dem Schwingungsverhalten unter Reibungsdämpfung systematisch untersucht. Dazu wird eine geeignete Parametrisierung entwickelt und ein bestehendes mechanisches Modell zur Beschreibung nichtlinearer Schwingungen entsprechend in eine umfassende Simulationsprozesskette eingebettet, die damit ausschließlich auf geometrischen Eingangsgrößen basiert und gleichzeitig eine effiziente Berechnung der HCF-Sicherheit ermöglicht. Zusätzlich wird eine auf Ersatzmodellen und statistischer Versuchsplanung beruhende Analysestrategie entwickelt, mit der die Haupt- und Interaktionseffekte der Systemparameter auf eine Ausgangsgröße quantifiziert werden können. Diese wird jeweils für Schaufelgeometrien mit Stützflügel und Unterplattformdämpfer verwendet, um den Einfluss der geometrischen Auslegungsparameter auf die statische Flächenpressung im Reibkontakt, die Resonanzamplitude der ersten Biegeschwingung sowie die dynamischen Spannungen zu bestimmen. Es wird nachgewiesen, dass die HCF-Sicherheit einer direkt gekoppelten Turbinenschaufel sinnvoll durch eine Minimierung der Resonanzamplitude optimiert werden kann. Die Systemparameter wirken sich dabei größtenteils über ihren Einfluss auf die statische Flächenpressung unter Entwindung der Schaufel auf die dynamischen Systemeigenschaften aus. Die HCF-Sicherheit verbessert sich in guter Näherung proportional zur Resonanzamplitude. Für freistehende Schaufeln mit Unterplattformdämpfer wird dargelegt, dass die HCF-Sicherheit nicht

zwangsläufig durch eine Minimierung der Resonanzamplitude verbessert wird und entgegen der Erwartung zu einer deutlichen Verschlechterung der mechanischen Integrität führen kann.

- **Torben Marhenke (02.09.2020)**

**“Experimentelle und modellbasierte Untersuchung der Reibmechanismen von Reifenprofilklotzproben auf rauen Fahrhahnoberflächen”**

Holzwerkstoffe entstehen durch Zerkleinern von Hölzern und dem anschließenden Zusammenfügen der entstandenen Elemente. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts werden Holzwerkstoffe als Alternative zu Voll- bzw. Massivhölzern verwendet und finden vor allem in der Bau- und Möbelindustrie Anwendung. Durch das Zusammensetzen von einzelnen Strukturelementen besitzen Holzwerkstoffe die Gefahr von Luft einschläüssen oder unverleimten Bereichen, die unter dem Begriff Delamination zusammengefasst werden. Delaminationen führen zu einer herabgesetzten Festigkeit der Werkstoffe und können bei der Verwendung als Konstruktionswerkstoff zu schwerwiegenden Folgen führen. Zur Detektion von Delaminationen werden in der Industrie aktuell Transmissionsmessungen mit Ultraschall durchgeführt. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die wissenschaftliche Untersuchung der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mittels Ultraschall auf der Basis von Experimenten und Modellen. Obwohl Holzwerkstoffe seit mehreren Jahrzehnten verwendet werden und industrielle Erfahrungswerte existieren, mangelt es an ingenieurtechnischem Wissen über das mechanische Verhalten von diesen Materialien. Nach dem aktuellen Stand der Technik existiert ein Parametersatz zur Beschreibung von Holzwerkstoffen als orthotropes Material. Im Rahmen dieser Arbeit werden mehrere Verfahren zur zerstörungsfreien Ermittlung der neun mechanischen Ersatzparameter beschrieben. Laufzeitmessungen und Model Updating ermöglichen die Identifikation von mechanischen Parametern während des laufenden Herstellprozesses. Auf Basis der ermittelten mechanischen Parameter werden analytische und numerische Modelle erstellt. Anhand dieser Modelle werden Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Dichteprofilen, Strömungseffekten und Delaminationen auf das Schallübertragungsverhalten von Holzwerkstoffen durchgeführt. Experimentelle Messungen verifizieren die Modelle und liefern zusätzliche Erkenntnisse über die Transmissions-eigenschaften. Die Optimierung der Delaminationserkennung erfolgt in dieser Arbeit bezüglich der Verbesserung der Zuverlässigkeit, Erhöhung der Fehlerauflösung und Bestimmung der Fehlerposition. Durch Änderung des Messaufbaus und Anpassung des Sendesignals kann die Fehleranfälligkeit des Systems minimiert werden. Die Anwendung der Re-Radiation Methode ermöglicht über eine Schallberechnung die Erkennung von Fehlern im einstelligen Millimeterbereich sowie die Bestimmung der Tiefenlage der Fehlstelle. Voraussetzung für die Anwendung der Re-Radiation Methode war die Entwicklung eines neuartigen Messaufbaus. Anstelle von kanalweisen Sender/Empfängerpaaren werden linienförmige Sender und hochauflösende Empfänger verwendet.

- **Kai-Alexander Saalbach (19.12.2019)**

**“Regelung von Kavitationsprozessen mittels Self-Sensing Kavitationsdetektion”**

Das durch einen Unterdruck hervorgerufene Entstehen kleiner Hohlräume in einer Flüssigkeit wird als Kavitation bezeichnet. Die Ursache hierfür ist, dass der Druck gering genug ist, damit die Flüssigkeit lokal aufreißt. Hierdurch entstehen Kavitationsblasen. Existieren diese Blasen nur für kurze Zeit und implodieren, wird von transientser Kavitation gesprochen. Wird der zur Kavitation führende Unterdruck durch eine periodische Druckschwankung eines Schallfelds hervorgerufen, spricht man von akustischer Kavitation. Solch ein Schallfeld lässt sich beispielsweise durch Ultraschall erzeugen, was den Vorteil bietet, die notwendige Druckänderung bereits mit sehr geringen Schwingungsamplituden erzeugen zu können. Mit Hilfe von Ultraschall erzeugte transiente Kavitation wird für eine Vielzahl von industriellen Prozessen genutzt. Ein charakteristisches Merkmal der Kavitation ist die Entstehung von Schallsignalen unterschiedlicher Frequenzanteile durch die Bewegung der Kavitationsblasen in der Flüssigkeit. Anhand des emittierten Schalls ist eine Detektion von Kavitation möglich. In dieser Arbeit wird Kavitation gezielt mit Hilfe eines piezoelektrischen Ultraschall-wandlers erzeugt. Durch die Anwendung von Self-Sensing kann der Wandler sowohl als Akteur zur Kavitationserzeugung, als auch als Sensor für die akustischen Emissionen der Kavitation genutzt werden. Mit Hilfe

dieser Methode kann ermittelt werden, ob transiente Kavitation vorliegt. Durch den Abgleich von potentiellen Self-Sensing Indikatoren für Kavitation mit Messungen eines Referenzsensors und durch den Abgleich mit Fotoaufnahmen, die die Vorgänge im Fluid dokumentieren, kann ein bestimmter Frequenzanteil als Indikator für transiente Kavitation bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um das 1,5-fache der Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers. Durch diese gewonnene Erkenntnis wird anschließend ein Regelungskonzept entwickelt, das die Erzeugung und das stabile Aufrechterhalten von transienter Kavitation mittels Self-Sensing ermöglicht.

- **Jan-Henning Willrodt (25.07.2019)**

- **“Gerichtete Lichtsignale zur personalisierten Kommunikation automatisierter Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmern”**

Die stetige Erhöhung des Automatisierungsgrads in aktuellen Serienfahrzeugen führt in absehbarer Zeit zu einer Automatisierung der Gesamtfahraufgabe. Nachdem diese Funktion zunächst auf Autobahnen und Landstraßen eingeführt werden wird, folgt anschließend die Ausweitung dieses Services auf den innerstädtischen Raum. Insbesondere im Niedergeschwindigkeitsbereich erfolgt heutzutage die nonverbale Kommunikation zwischen Autofahrern mit anderen Verkehrsteilnehmern. Dabei wird der Blickkontakt als personenbezogene Detektionsrückmeldung interpretiert. Mit der Automatisierung der Fahrzeuge entfällt jedoch diese Möglichkeit für andere Verkehrsteilnehmer, mit dem Fahrer zu kommunizieren. Der Stand der Technik weist eine Vielzahl an Lichtfunktionen auf, die in Form von externen Mensch-Maschine-Schnittstellen (eHMI) diese Kommunikation ersetzen könnten. Diskutiert werden dabei Displays, Lichtbänder oder Projektionen, die insbesondere manöverbasierte Nachrichten kommunizieren. Im Gegensatz dazu wird in dieser Arbeit die Umsetzung einer gerichteten Signalleuchte untersucht, die durch individuelles Adressieren detektierten und zu berücksichtigenden Verkehrsteilnehmern ein Lichtsignal übermittelt. Dies ermöglicht eine Kommunikation, die auf der Wahrnehmung der Fahrzeug Sensorik basiert und den zu kommunizierenden Nachrichtenkatalog auf zwei Zustände beschränkt. Nach Ableitung lichttechnischer Anforderungen an eine solche Lichtfunktion und der Generierung lichttechnischer Konzepte werden anschließend drei Funktionsdemonstratoren zur Realisierung der Lichtfunktion umgesetzt. Der abbildende Ansatz durch Verwendung eines Weitwinkelobjektivs sowie der scannende Ansatz mittels Polygonradspiegels erweisen sich als praktikable Technologien. Während der abbildende Ansatz zwar keine derart hohe Sektorauflösung erreicht wie der scannende Ansatz, kann jedoch auf bewegliche Elemente und das Verwenden direkter Laserlichtstrahlung verzichtet werden. In einer abschließenden Untersuchung zeigt sich, dass für die Kommunikation adressierter Detektionsrückmeldungen die gerichtete Signalleuchte gegenüber einem Lichtband einen deutlichen Vorteil in der Vermeidung falsch positiver Interpretationen durch umstehende Verkehrsteilnehmer erzielt.

- **Tim Linke (05.07.2019)**

- **“Untersuchung der Kraftübertragung lamellierter Reifenprofilklötze auf Schneefahrbahnen”**

Insbesondere auf schneebedeckten Fahrbahnen müssen bei der Auslegung von Winterreifen Mechanismen berücksichtigt werden, die eine optimale Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn gewährleisten. Aus diesem Grund werden diese Reifen aus besonders weichen Gummimischungen hergestellt, die auch bei winterlichen Temperaturen noch ausreichend Elastizität aufweisen. Ihr Profil zeichnet sich durch viele einzelne Profilklötze aus, welche zusätzliche Einschnitte besitzen, um so eine hohe Anzahl an Kanten zu erzeugen. Diese sind in der Lage den Schnee aufzubrechen und abzutragen. Dieses Fräsen ist auf Schneefahrbahnen der effektivste Mechanismus, um hohe Reibkräfte zu erzeugen. Die dabei auftretenden Kräfte führen dazu, dass sich die Profilklötze, je nach Gummimischungshärte und Anzahl der Einschnitte, mehr oder weniger stark verformen. Aus der Literatur ist bekannt, dass ein optimaler Neigungswinkel für Profilklötze existiert, unter dem sie maximale Reibkräfte übertragen können. Dieser wird dabei durch die Material- und Struktursteifigkeit der Profilklötze beeinflusst. Anhand experimenteller Reibversuche an einzelnen Profilklötzen soll dieser optimale Neigungswinkel quantitativ ermittelt werden. Je nach Versuchsprogramm variieren die verwendeten Proben in ihrer Geometrie und der Materialhärte. Die verwendeten

Testmethoden ermöglichen zudem Rückschlüsse auf das Verhalten einzelner Profilklotze an einem rollenden Fahrzeugreifen. Um Versuche auf Schneefahrbahnen durchzuführen wird vorab eine Methode zur Kunstschneeherstellung im Labor entwickelt. Mit ihr kann Schnee mit reproduzierbaren Eigenschaften und realistischer Härte erzeugt werden. Die durchgeführten Experimente erlauben es den optimalen Neigungswinkel, welcher zu maximal übertragbaren Reibkräften führt, zu benennen und zeigen zudem, dass mit ihm nur ein langsamer Kraftanstieg erzielbar ist. Es kann im weiteren Verlauf eine Gesetzmäßigkeit gefunden werden, die es erlaubt durch Anpassen der Probengeometrie hohe Reibkräfte mit einem raschen Kraftanstieg zu kombinieren. Für die Gesetzmäßigkeiten der übertragbaren Reibkräfte an Profilklotzen eines rollenden Reifens zeigt sich, dass ihr Anstieg durch den Fahrzustand des Reifens (Bremsen oder Antreiben) beeinflusst wird. Zudem kann gezeigt werden, dass Profilklotze mit vielen Einschnitten durch die o.g. Fräseffekte höhere Reibkräfte erzeugen als Profilklotze mit wenig Einschnitten, sie benötigen hierfür jedoch wesentlich längere Gleitstrecken. Somit ist für eine optimale Auslegung des Profils immer der jeweilige Fahrzustand zu berücksichtigen.

- **Yangyang Long (23.04.2019)**

- **”Investigations on the Mechanisms of Ultrasonic Wire Bonding”**

Ultraschall-Drahtbonden ist eine vorherrschende Verbindungstechnik in der Mikroelektronik- Verpackungsindustrie. Die genauen Mechanismen, insbesondere die der Reibungs- und Entfestigungsphase, sind trotz ihrer breiten Anwendung seit mehr als einem halben Jahrhundert nach ihrer Erfindung noch unklar. Mit dem Ziel, die große Lücke zu einem guten Verständnis der Mechanismen zu schließen, konzentriert sich diese Dissertation auf die relativen Bewegungen an den Draht/Substrat- und Draht/Werkzeug-Grenzflächen sowie auf den Oxidentfernungsprozess. Darüber hinaus wird ein Energieflussmodell von der elektrischen Eingangsenergie zu den verschiedenen an den Mechanismen beteiligten Energien entwickelt und quantifiziert. Die Relativbewegungen an den beiden Grenzflächen wurden durch ein Echtzeitbeobachtungssystem untersucht, mit dem die Mikrometerbewegungen des Werkzeugs und des Drahtes erfasst wurden. Die Bewegungen wurden dann verfolgt und quantifiziert. Zusätzlich wurden die Einflüsse der Prozessparameter wie Normalkraft, Ultraschall- Leistung und Prozesszeit analysiert. Dabei wird der kombinierte Effekt von Normalkraft und Ultraschall-Leistung hervorgehoben. Durch eine weitere Untersuchung der Änderungen der Oberflächentopographie und der Elementverteilung wurde nachgewiesen, dass sich die relativen Verschiebungsamplituden an verschiedenen Stellen der Draht/Werkzeug-Grenzfläche unterscheiden. Mit der Substitution des Metallsubstrats durch ein transparentes Glas wurde der Verbindungsprozess sichtbar gemacht und verschiedene Bereiche einschließlich der Kontakt-, Reibungs-, Haft-, Mikroschweiß- und Oxidbereiche detektiert. Der Oxidentfernungsprozess wurde untersucht, wobei teilweise zusätzliche Beschichtungen entweder am Draht oder am Substrat aufgebracht wurden, um die Vorgänge besser sichtbar zu machen. Ein vollständiger Entfernungsprozess einschließlich Risse, Ablösung, Mahlen und Transport wurde untersucht. Der Transport umfasst weiterhin Durchdringen, Oxidfluss, Schieben und Metallspritzen. Die Quantifizierung von Energiefluss zeigt, dass die größten Anteile der Ultraschall-Energie zur schwingungsinduzierten Reibung an den beiden Grenzflächen und zur schwingungsinduzierten Bildung, Verformung und Bruch von Mikroschweißungen fließen. Aus dem Energiefluss zur Draht/Substrat-Grenzfläche und zur Bildung von Mikroschweißungen wird die optimale Kombination aus der Normalkraft und der Ultraschalleistung bestimmt.

- **Michael Burgwitz (24.01.2019)**

- **“Simulation dynamischer Kontakte mittels linearem Komplementaritätsproblem und fraktionaler Viskoelastizität”**

Prototypentests sind sowohl beim Design von Reifen als auch von Dichtungen weit verbreitet, jedoch ist damit ein signifikanter Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Simulationen bieten eine kostengünstige Alternative zu aufwändigen Versuchsreihen und ermöglichen zudem Einblicke in messtechnisch schwer zugängliche Bereiche. Somit kann beispielsweise sowohl das lokale als auch das globale Verhalten der jeweiligen Struktur näher untersucht werden. Reifen und Dichtungen werden häufig

aus Elastomeren hergestellt und weisen daher viskoelastische Materialeigenschaften auf. Dies hat wiederum einen großen Einfluss auf das Reibverhalten. Zur Reduktion des numerischen Aufwandes ist es wünschenswert, das Modell in seinen Freiheitsgraden geeignet zu reduzieren. Durch die Viskoelastizität ist das Materialverhalten jedoch nichtlinear, weshalb viele etablierte Methoden nicht direkt anwendbar sind. Gegenstand dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Simulationsumgebung, welche sowohl Viskoelastizität als auch Kontakt abzubilden vermag. Darüber hinaus soll das Strukturmodell reduziert werden können. Dies wird durch eine geschickte Formulierung des viskoelastischen Materialverhaltens mit Hilfe von fraktionalem Ableitungen möglich. Der Kontakt wird in Form eines linearen Komplementaritätsproblems aufgestellt, wobei nichtlineare Effekte durch Stoß und Reibung berücksichtigt werden. Die Simulation wird anschließend verifiziert und durch Messungen validiert.

- **Fushi Bai (21.01.2019)**

- **“Untersuchung des Einflusses der Ultraschall-Kavitation in kleinen Spalten auf die Oberflächeneigenschaften”**

- Die Ultraschall-Kavitation kann zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von Werkstücken in industriellen Anwendungen genutzt werden. Während dieses Oberflächenveredelungsprozesses ist ein kleiner Spalt erforderlich, um hohe Stoßkräfte auf die Werkstückoberflächen zu erzeugen. Die Verteilung der Kavitationsblasen, die optimale Spaltbreite und die Prozesszeit beeinflussen die behandelten Oberflächeneigenschaften stark. In dieser Arbeit werden die Verteilung der Schallfelder in der Kavitationsflüssigkeit und die optimale Spaltbreite unter Berücksichtigung von Blasenwechselwirkungen modelliert. Danach werden Sonochemilumineszenz- und Oberflächenvolumenvariationsexperimente durchgeführt. Zusätzlich ist ein piezoelektrischer Kraftsensor zur Messung der Aufprallkräfte entwickelt worden. Schließlich wird das plastische Verformungsvolumen untersucht, um die optimale Prozesszeit genauer zu identifizieren. Die numerischen Modelle zeigen eine Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

- **Sebastian Fricke (26.11.2018)**

- **“Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Validierung einer Mischreibungssimulation”**

- Die Simulation tribologischer Kontakte in Mischreibung ist aufgrund der auf verschiedenen Zeit- und Größenskalen auftretenden physikalischen und chemischen Mechanismen eine große Herausforderung. Da bis heute nicht alle Vorgänge im Detail verstanden sind, werden für die Modellierung Annahmen getroffen, was zur Unsicherheit der Reibkraftvorhersage führt. Die Verlässlichkeit der berechneten Werte muss deshalb durch Abgleich mit Experimenten, der Validierung, sichergestellt werden. Die vorliegende Arbeit behandelt die Validierung der Reibkraftberechnung eines Gleitlagers bei Mischreibungsbedingungen und geht dabei auf den Einfluss der experimentellen und numerischen Unsicherheiten ein. Eine zentrale Voraussetzung der Vergleichbarkeit von Simulation und Experiment ist die Übereinstimmung der Randbedingungen. Viele Randbedingungen können allerdings erst ex-situ mit einer großen Messunsicherheit bestimmt werden, welche für die eingesetzten Methoden ermittelt wird. Um den Einfluss dieser Unsicherheiten auf die berechnete Reibkraft zu berücksichtigen, wird ein probabilistischer Vergleich von Simulation und Experiment basierend auf den stochastischen Methoden aus dem mathematischen Fachgebiet der Uncertainty Quantification (Unsicherheitsquantifizierung) vorgeschlagen. Numerische Unsicherheiten werden durch Verifikation und Netzkonvergenzstudien ausgeschlossen. Es zeigt sich, dass im untersuchten Fall die Unsicherheit der berechneten Reibkraft aufgrund der unsicher bestimmten Simulationseingangsgrößen größer als die Messunsicherheit der gemessenen Reibkraft ist. Ein vereinfachter Validierungsprozess mit Reduzierung der Unsicherheiten wird abgeleitet und auf eine experimentelle Parameterstudie mit der Variation der Oberflächenrauheit und der Schmierstofftemperatur angewendet. Die Ergebnisse der Validierung deuten auf ein Überschätzen der berechneten Reibkraft mit zunehmender Oberflächenrauheit hin. Durch die Kenntnis der Unsicherheiten der verschiedenen Parameter kann diese Abweichung auf die im Simulationsmodell getrennte Behandlung von Flüssigkeits- und Festkörperkontakt

zurückgeführt werden. Die in der Arbeit entwickelten Methoden ermöglichen durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten eine genauere Interpretation der Validierung von Mischreibungssimulationen und somit eine Verbesserung der Simulationsmodelle. Die Arbeit ist ein Schritt zur vollständig virtuellen Auslegung tribologischer Kontakte, da die probabilistische Rechnung durch die Berücksichtigung der quantifizierten Unsicherheiten eine genauere und verlässlichere Reibkraftvorhersage ermöglicht.

- **Noha Aboufotouh (09.08.2018)**

- **“Theoretical and experimental studies on the effectiveness of broadband piezoelectric energy harvesters under volume constraints”**

Piezoelektrische Systeme zur Energiegewinnung im Allgemeinen wurden als Einzelwandler oder als Wandler mit einer zusätzlichen Struktur zur Erhöhung des Betriebsfrequenzbereichs vorgeschlagen. Diese Studie konzentriert sich hauptsächlich auf die Wirksamkeit von piezoelektrischen Energieerntemaschinen (PEHs) unter Volumenbeschränkungen. Für die Untersuchungen wird ein bimorpher piezoelektrischer Cantilever berücksichtigt. Ein Modell wird erschlossen, um die Systemparameter als Funktionen der geometrischen und der Materialparameter zu erhalten. Die Leistungsabgabe wird in einer Abhängigkeit von den geometrischen und materiellen Parametern und der Eingangserregung abgeleitet. Es werden Formeln der optimalen Lastwiderstände und Erregerfrequenzen abgeleitet, die die maximale Leistungsfähigkeit bieten. Die Einflüsse der geometrischen Parameter auf die maximale Leistung werden unter der gleichen Eingangsanregung und einem gegebenen Material überprüft. Es wird festgestellt, dass die Leistung stark von den geometrischen Parametern (Länge, Breite, Dicke und Masse der Spitze) abhängt. Die Bedeutung des Volumens für die Effektivität von PEHs wird durch den Vergleich der Leistung und Bandbreite von sechs PEHs unterschiedlicher Lautstärke, abgestimmt auf die gleiche Resonanz, diskutiert. Die mechanische Dämpfung, die elektrische Dämpfung und die normierte Leistung auf das Volumen werden untersucht. Die optimierten Betriebsbedingungen des angewandten Lastwiderstandes und der Anregungsfrequenz werden untersucht. Eine vorgeschlagene Methode zur Bewertung der Wirksamkeit der vorgeschlagenen PEHs wird durch den Vergleich ihrer Leistung mit einer Referenzoptimierten PEH des einheitlichen Volumens vorgestellt. Die Leistung der Array-PEHs wird im Vergleich zu einem einzelnen Referenz-PEH mit dem gleichen Gesamtvolumen wie das Array diskutiert. Die direkten Verbindungen zwischen den Elementen im Array werden berücksichtigt. Das Modell wurde erweitert, um die Leistungsabgabe unter Berücksichtigung der elektrischen Wechselwirkungen zwischen den Elementen abzuleiten. Bei kleinen Unterschieden zwischen den Resonanzen der Elemente erzeugte das Array eine geringere Leistung als der Referenz-Harvester und etwa die gleiche Bandbreite. Bei großen Unterschieden ist die Leistungsabgabe uneinheitlich. Es werden Richtlinien für den Entwurf von Array-PEHs vorgestellt. Das Eigenresonanzverhalten einer frei gleitenden Masse entlang eines eingespannten Balkens wird auf die piezoelektrische Energiegewinnung angewendet. Die Wirksamkeit des PEH mit Eigenresonanz wird untersucht, indem es mit dem optimierten Referenz-PEH desselben Gesamtvolumens verglichen wird. Das Volumen ist ein wesentliches Kriterium für die Wirksamkeit von PEHs. Es ist notwendig, die entwickelten PEHs unter Volumenbeschränkungen zu optimieren, um effektiver zu sein.

- **Gilda Karbasi (20.03.2018)**

- **“Entwicklung eines Schädigungsmodells für den Einsatz in der Steinschlagsimulation”**

Die Steinschlagsimulation beschäftigt sich mit dem vom Reifen ausgehenden Eigenbewurf durch Steine an der Karosserie und am Fahrwerk. Gegenwärtig läuft die Steinschlagbewertung rein geometrisch über die Ermittlung der Auftreffwinkel im Simulationstool "Pebbles II". Die derzeit verfügbaren Methoden zur Simulation erlauben keine Vorhersagen zur Schädigung von Oberflächen durch Steinschlag. Das Ziel dieser Arbeit war es, die Aussagequalität der Steinschlagsimulation im Hinblick auf die Oberflächenschädigung zu verbessern. Dafür wurden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Anhand von praktischen Versuchen wurden zum einen Abwurfprofile von Steinen mittels Aufnahmen per High-Speed-Kamera an einem Versuchsfahrzeug ermittelt. Zum anderen wurde mit

Hilfe eines Fallturm-Prüfstands die Oberflächenschädigung durch Steinschlag experimentell unter definierten Bedingungen untersucht, um die wesentlichen Schädigungsparameter ausfindig zu machen. Um eine Brücke zwischen den Fahrversuchen und den Versuchen aus dem Fallturm ziehen zu können, wurden Schadensbilder aus dem Feld analytisch ausgewertet und mit den Schädigungen aus dem Fallturm verglichen. Die Erkenntnisse aus den praktischen Versuchen wurden in das Simulationstool "Pebbles II" eingearbeitet, mit dem Ziel, bei einer Steinschlagsimulation die resultierende Oberflächenschädigung darzustellen.

## 2.2 Auszeichnungen

- Dipl.-Ing. Stephanie Kahms, Dr.-Ing. Matthias Wangenheim  
Superior Paper Award, "Experimental Investigation and Simulation of Aircraft Tire Wear", September 2019

## 2.3 Wissenschaftlicher Austausch

Folgende Studenten und Wissenschaftler waren als Preisträger bzw. Stipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung am Institut für Dynamik und Schwingungen zu Gast:

- Professor Alexander Vakakis, University of Illinois at Urbana Champaign, USA  
09/2020 - 10/2020
- Professor Dr. Xiaolong Lu, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics - State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, China  
03/2019 - 12/2019



Längere Forschungsaufenthalte unserer Doktoranden im Ausland:

- Viktor Hofman, The University of Tokyo, Standort Kashiwanoha, Japan,  
03/2019 - 08/2019

### 3 Forschung

---



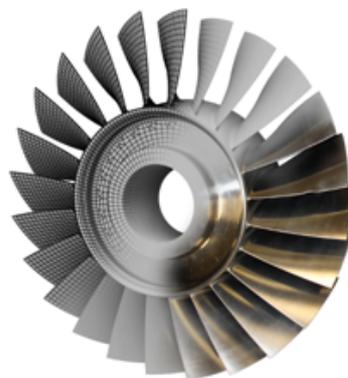
## 3.1 Forschungsgruppe Dynamik rotierender Maschinen



Dr.-Ing. Lars Panning-von Scheidt  
(Gruppenleiter)

Alwin Förster, M. Sc.  
Thomas Hoffmann, M. Sc.  
Florian Jäger, M. Sc.  
Niklas Marhenke, M. Sc.  
Martin Paehr, M. Sc.  
Klaus-Dieter Schlesier, M. Sc.  
Lukas Schwerdt, M. Sc.

- Dynamik rotierender Maschinen
- Gekoppelte Beschaukelungen: Reibelemente
- Gekoppelte Beschaukelungen: Deckband
- Regenerationsbedingtes Mistuning
- Drehzahlvariabilität und Verschleiß
- Multiresonanzen und Multigrenzzykel
- Aerodynamische Kopplung
- Stochastische Schaufelanregung
- Transiente Schaufelschwingungen
- Rotor-Schaukel-Kopplung
- Gehäuseschwingungen
- Experimentelle Untersuchungen
- Schwingungsanregung
- Schwingungsmessung



## Dynamik rotierender Maschinen

Die Arbeitsgruppe Dynamik rotierender Maschinen befasst sich mit dem Schwingungsverhalten rotierender Maschinen, hier insbesondere den Beschaukelungen von Verdichter- und Turbinenstufen. Im Vordergrund steht die Entwicklung von Technologien und experimentell validierten Modellen zur Erhöhung der Dämpfungswirkung. Dies wird in verschiedenen öffentlich und industriell geförderten Projekten untersucht.

Schwingungen von Bauteilen verschiedenster technischer Anwendungen z.B. aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik und im Turbomaschinenbau lassen sich effizient dämpfen, indem auf physikalische Effekte wie die Nutzung von Reibung, die Erzeugung von Wirbelströmen oder die Anbindung eines piezoelektrischen Netzwerkes zurückgegriffen wird.

Um diese Effekte in technischen Anwendungen zu nutzen, ist zunächst eine ausreichend genaue Modellierung der Dynamik des zu dämpfenden Systems und insbesondere die Beschreibung der zu meist nichtlinearen Zusammenhänge der Dämpfungsmechanismen erforderlich. Bei der Berechnung ist neben der Genauigkeit der Modelle auch deren Effizienz im industriellen Einsatz zu berücksichtigen, sodass in akzeptabler Rechenzeit ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können.

Am Beispiel der Dämpfung von Turbinenlaufschaufeln werden verschiedene Dämpfungsmechanismen untersucht, wobei neben der Modellierung und Simulation auch experimentelle Untersuchungen zur Validierung der entwickelten Modelle durchgeführt werden. In vielen Fällen führen diese Vorhaben zu einer Umsetzung der Ergebnisse in industriell einsetzbare Softwarewerkzeuge, die sich mittlerweile im Auslegungsprozess von Turbinenschaufeln gut etabliert haben.

Um die Umsetzung verschiedener Dämpfungsmechanismen und deren Potenzial in realen Turbinenbeschaukelungen zu beurteilen, wurden detaillierte struktur- und fluiddynamische Modelle entwickelt und experimentell validiert. Hierzu wurden verschiedene Versuchsstände konzipiert, aufgebaut und sowohl für grundlegende Untersuchungen als auch für konkrete quantitative Messungen zur Wirksamkeit verschiedener Dämpfungsprinzipien an Leit- und Laufschaufeln im Stillstand und unter Rotation genutzt. Aktuelle Schwerpunkte in Modellierung und

Experiment liegen u.a. auf

- der Modellierung der Strukturodynamik komplexer dreidimensionaler Schaufelgeometrien
- der Beschreibung nichtlinearer Dämpfungsmechanismen, insbesondere Kontakt und Reibung,
- der Entwicklung effizienter numerischer Methoden zur Lösung nichtlinearer Systeme,
- dem Einfluss höher harmonischer Schwingungsanteile in nichtlinearen Strukturen,
- der Untersuchung transienter Schwingungsphänomene mit Reibung und in verstimmt Systemen,
- der Weiterentwicklung von Methoden zur Reduktion der Modellgröße,
- der Modellierung der stochastischen und bewussten Verstimmung zyklischer Systeme
- der Untersuchung von Multiresonanzen (Fremderregung) und Multigrenzyklen (Selbsterregung)
- der Optimierung konstruktiver Lösungen zur Schaufelkopplung (z.B. Reibelementgeometrie)
- der Betrachtung stochastischer Anregungen von linearen und nichtlinearen Systemen
- der Fluid-Struktur-Kopplung und
- der Untersuchung von Gehäuseschwingungen unter Betrachtung von Nichtlinearitäten und Modellunsicherheiten.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Lars Panning-von Scheidt

☎ +49(0)511/762-4170

✉ [panning@ids.uni-hannover.de](mailto:panning@ids.uni-hannover.de)

## Charakterisierung der Reibdämpfung bei Turbinenschaufeln

Im Rahmen der Projekte „Frequenz- und Dämpfungsvorhersage für freistehende Turbinenschaufeln mit Unterplattform-Dämpfer“ und „Vorhersage und Validierung der nichtlinearen Reibdämpfung bei Schaufelschwingungen“ (gefördert durch AG Turbo) wird das dynamische Verhalten von durch Unterplattformdämpfer und Deckband gekoppelten Turbinenschaufeln untersucht. Ein besonderer Fokus liegt auf neuartigen Methoden zur Berechnung der Reibkraft im Modell und Parametrierung der Reibgesetze.

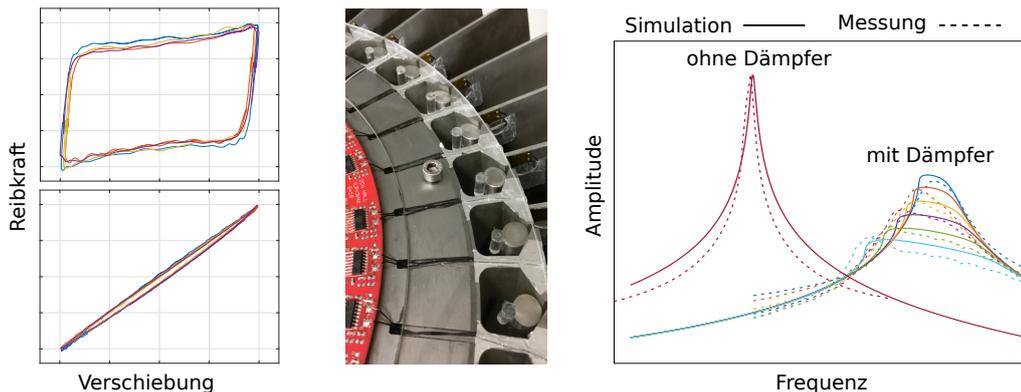


Abbildung 1: Dimensionslose Reibhysteresen; Schaufelkranz mit Unterplattformdämpfern; Optimierung der Dämpfungswirkung in Versuch und Simulation

Die Anwendung von Reibdämpfung von Turbinenschaufeln ist ein probates Mittel, um die Schwingungsamplituden der Schaufeln und damit die in den Schaufeln auftretenden Spannungen zu reduzieren. Dadurch kann die Lebensdauer von Turbinenschaufeln erheblich verlängert werden. Hierbei werden benachbarte Schaufeln durch Dämpfungsstrukturen miteinander gekoppelt. Zu diesen zählen Unterplattformdämpfer (siehe Bild) und Deckbänder. Die grundsätzlichen Effekte der Reibdämpfung auf die Dynamik von Turbinenschaufeln sind mittlerweile gut verstanden. Da experimentelle Tests von großen beschauelten Turbinenscheiben erhebliche Kosten verursachen, sollen die auftretenden Effekte möglichst genau durch Simulationen vorhergesagt werden. Da die Reibdämpfung nichtlinear von der Schaufeldynamik abhängt, sind spezielle numerische Algorithmen nötig, um die Bewegungsgleichungen effizient zu lösen. Hierzu wird die Bewegungsgleichung im Frequenzbereich gelöst und nur zur Berechnung der Reibkraft in den Zeitbereich gewechselt (Alternating-Frequency-Time-Method). Dies wird mit der Entwicklung der Bewegungsgleichung nach harmonischen Termen kombiniert (Harmonic-Balance-Method) wodurch bei guter Genauigkeit ein akzeptables Maß an Simulationsaufwand erreicht wird. Ein besonderer

Fokus dieses Forschungsprojekts liegt auf der Wahl und Parametrierung der Modelle, die die auftretenden Reibkräfte nachbilden sollen. Die Eigenschaften eines Reibkontaktes hängen von einer Vielzahl von Parametern ab, z.B. Oberflächenbeschaffenheit und Materialeigenschaften der Reibpartner. Diese Vielzahl von Einflüssen muss möglichst elegant und umfassend auf ein Modell reduziert werden. Gleichzeitig muss das Reibmodell anwendbar sein, das heißt, die zu bestimmenden Parameter müssen robust gegenüber Umwelteinflüssen und auch praktisch einfach zugänglich sein, insbesondere im industriellen Umfeld. Hierzu wird ein Verfahren entwickelt, dass das Kontaktverhalten dimensionslos, d.h. weitestgehend unabhängig von der physikalischen Ausprägung, beschreibt. Das Ziel ist, Reibkontakte in Turbinenschaufeln mittels weniger, dimensionsloser Parameter möglichst vollständig zu beschreiben. Es sollen viele verschiedene physikalische Kontaktzustände auf wenige dimensionslose Zustände reduziert werden.

Ansprechpartner:

Thomas Hoffmann, M. Sc.

+49(0)511/762-4181

hoffmann@ids.uni-hannover.de

## Flexibilitätsoptimierung von Dampfturbinenschaufeln

Die Projekte „Analyse des Schwingungsverhaltens unterschiedlich gekoppelter drehzahlvariabler Turbinenschaufeln“ und „Schwingungsanalyse von Dampfturbinenschaufeln“ wurden und werden durch die AG Turbo gefördert. Ziel ist es, den Einfluss der Drehzahlvariabilität bei Schaufelkränzen mit Deckbandkopplung zu untersuchen und mit den gewonnenen Erkenntnissen den Auslegungsprozess von konstruktiven Dämpfungsparametern zu optimieren. Zu diesem Zweck werden sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

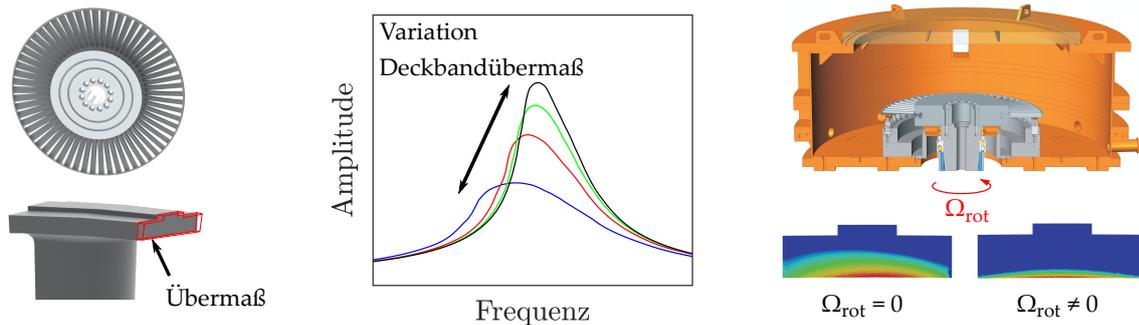


Abbildung 2: Turbinenschaufeln mit Deckbandkopplung (links), Einfluss des Deckbandübermaßes (Mitte), Drehzahleinfluss auf den Kontaktstatus (rechts)

Im Zuge der Energiewende wachsen aufgrund der stark fluktuierenden Einspeisung von Wind- und Solarstrom aus erneuerbaren Energien die Flexibilitätsanforderungen an Dampfturbinen. Aus diesen Forderungen resultiert u.a. ein Betrieb von Dampfturbinen im Teillastbereich, sodass die Beschauflungen für höhere zulässige Lastwechselzahlen sowie Lastwechselgeschwindigkeiten ausgelegt werden müssen.

Die im Betrieb entstehenden Kräfte hängen stark von der Rotordrehzahl der Turbine ab, so dass aus einer Änderung der Drehzahl ein völlig neuer Belastungszustand resultiert. Insbesondere bei gekoppelten Turbinenschaufeln sind neben der strukturellen Drehzahlabhängigkeit die Kontaktdrücke im Deckband maßgebend für die Schaufelschwingungen. Neben der Drehzahl hängen diese auch von der aufgeprägten Vorspannung durch die Dimensionierung des Deckbandübermaßes ab. Für eine optimale Reduktion der Schwingungsamplituden ist eine genaue Kenntnis über den Einfluss des Deckbandübermaßes unter Berücksichtigung der Drehzahlvariabilität notwendig.

In diesen Projekten wird der Einfluss der beiden gekoppelten Effekte numerisch und experimentell untersucht. Zur Berechnung der nichtlinearen Schwingungsantwort wird das am IDS entwickel-

te Programm FoReBlade genutzt und weiterentwickelt. Der experimentelle Projektanteil wird im Rotationsversuchsstand ROT II aus Abbildung 2 durchgeführt. Die Schwingungsanregung erfolgt dabei durch den Einsatz von Permanentmagneten, die Schwingungsmessung über DMS-Messtechnik. Zur Variation des Deckbandübermaßes wurde bei der Fertigung des Versuchsträgers zunächst ein maximales Übermaß eingestellt, das dann nach jeder abgeschlossenen Messkampagne durch das Abschleifen von Material an den Kontaktflächen verkleinert wird. Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment schließt das Vorhaben ab.

Aus den gewonnenen Projektergebnissen kann zukünftig der Auslegungsprozess von drehzahlvariablen Dampfturbinenschaufeln optimiert werden. Dieser trägt dann durch eine Verbesserung der drehzahlabhängigen Dynamik zu einem optimalen kombinierten Einsatz aus regenerativer und flexibel erzeugter konventioneller Stromerzeugung bei.

Ansprechpartner:

Florian Jäger, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-2889

✉ jaeger@ids.uni-hannover.de

## Regenerationsbedingtes Mistuning

Das Ziel des Teilprojektes C6 im Sonderforschungsbereich "Regeneration komplexer Investitionsgüter" ist die Beurteilung des Einflusses der durch den Regenerationsprozess veränderten mechanischen Eigenschaften einzelner Bauteile auf die Dynamik komplexer Gesamtsysteme. Hierbei wird die Aeroelastik von mehrstufigen Axialverdichtern gemeinsam mit dem Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik erforscht, indem reduzierte Strukturmodelle entwickelt werden, um regenerationsbedingte Varianzen der Schaufelgeometrien abbilden zu können.

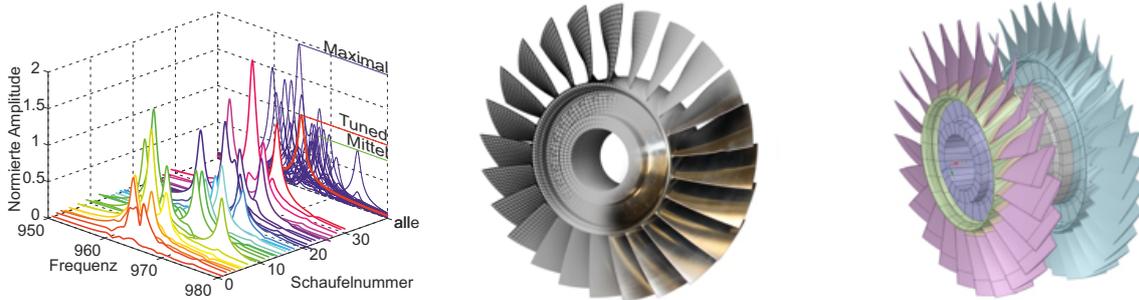


Abbildung 3: Frequenzgänge einer verstimzten Blik, Blik mit Blendreparatur, zweistufiger Rotor

Der SFB 871 "Regeneration komplexer Investitionsgüter" beschäftigt sich mit der Instandsetzung komplexer Investitionsgüter mit dem Ziel, möglichst viele Komponenten zu erhalten und zu regenerieren. Dabei sollen die funktionalen Eigenschaften des Gesamtsystems erhalten bleiben oder sogar verbessert werden. Der SFB 871 besteht aus 4 Teilgebieten, die sich mit der *Befundung*, der *Varianz*, dem *Einfluss auf das Gesamtsystem* und der *ganzheitlichen Steuerung* des Regenerationsprozesses beschäftigen. Damit soll es möglich sein, einen optimalen Regenerationspfad auszuwählen, möglichst schon bevor das Investitionsgut in seine Komponenten zerlegt worden ist. Exemplarisch wurden im SFB 871 bisher die Triebwerke von Verkehrsflugzeugen betrachtet, da bei diesen die Komplexität besonders stark ausgeprägt ist.

Das Teilprojek C6 "Aeroelastik von Axialverdichtern" beschäftigt sich mit dem Einfluss der Verstimmung einzelner Schaufeln auf das Gesamtsystem. Durch das Mistuning treten sogenannte Lokalisierungseffekte auf, die dazu führen können, dass sich die Schwingungsamplitude einzelner Schaufeln drastisch erhöht. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wurde in der ersten Förderperiode eine Reduktionsmethode entwickelt, mit deren Hilfe die Schwingungsamplituden einer verstimzten Blik auf Basis eines Finite Elemente-Modells innerhalb kürzester Zeit berechnet werden können. Auf diesen Ergeb-

nissen aufbauend wurde in der zweiten Förderperiode die Reduktionsmethode erweitert, um auch eine Verstimmung der Scheibe mit abbilden zu können. In der dritten Förderperiode wird nun eine neue Reduktionsmethode entwickelt, die sowohl größere Geometrieänderungen von Verdichterschaufeln, als auch Modelle mit mehreren Rotorstufen effizient abbilden kann. Dabei wird in Kooperation mit dem Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik auch die aeroelastische Kopplung der Schaufelschwingungen verschiedener Rotorstufen modelliert. Durch Experimente sollen die Berechnungsergebnisse auch quantitativ validiert werden. Am IDS wird eine zweistufige Blik untersucht, die elektromagnetisch zu Schwingungen angeregt wird. Die Schwingungsmessung erfolgt laseroptisch. Aeroelastische Experimente finden am Axialverdichtertprüfstand des TFD statt. Im Rahmen des SFBs trägt dieses Projekt zur besseren Lebensdauervorhersage von regenerierten Rotorstufen bei und ermöglicht so eine optimale Entscheidung über Reparaturnotwendigkeit und -verfahren.

Ansprechpartner:

Lukas Schwerdt, M. Sc.

+49(0)511/762-19592

✉ schwerdt@ids.uni-hannover.de

## Fortschrittliche dynamische Analysen mit Kontakt / Modellierung Verschleiß bei dynamischer Belastung

Im Rahmen der Projekte "Fortschrittliche dynamische Analysen mit Kontakt" (gefördert durch das Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V) und "Modellierung Verschleiß bei dynamischer Belastung" (gefördert durch AG Turbo) wird das nichtlineare periodische Schwingungsverhalten zyklisch-symmetrischer Schaufelkränze untersucht. Der Fokus liegt auf der Drehzahlvariabilität, den nichtlinearen Kontaktkräften und den Verschleißeffekten.

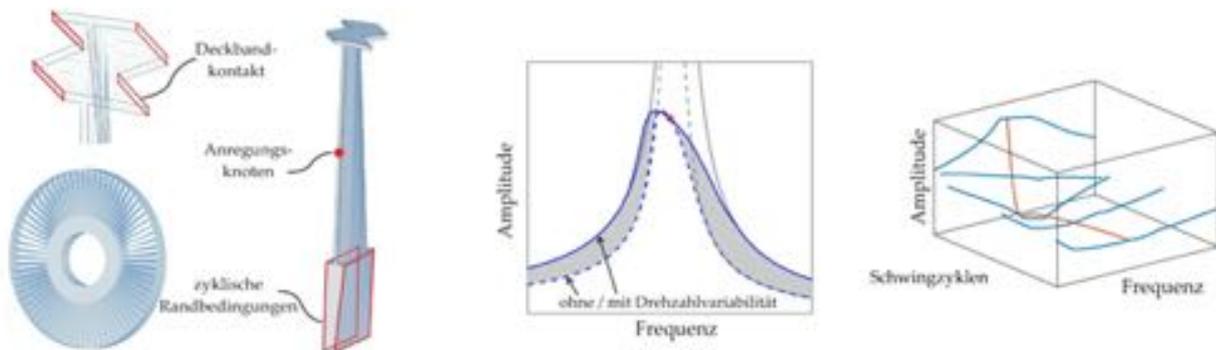


Abbildung 4: Turbinenschaufel mit Deckbandkopplung, Einfluss der Drehzahlvariabilität und des Verschleißes auf den Frequenzgang

Zur Beurteilung der Dauerfestigkeit und Sicherheit von Turbinenschaufeln im Betrieb bedarf es der genauen Kenntnis der auftretenden Schwingungsformen der Schaufeln bzw. der Scheibe, um aus diesen die strukturellen Belastungen des Bauteils ableiten zu können. Ein sehr wichtiger Parameter für die dynamische Untersuchung ist die Drehzahl der Turbine. Die auftretenden Fliehkräfte verformen das Bauteil und verändern somit durch sogenannte *spin-softening* und *stress-stiffening* Effekte die beschreibenden Systemmatrizen am betrachteten Betriebspunkt. Weiterhin ändert sich der Strömungsverlauf entlang der Schaufeln, was Einfluss auf die Anregung der Schwingungen hat. Zudem variieren die Kontaktdrücke und -flächen in den zur Dämpfung vorgesehenen Deckbandkopplungen.

Detailreiche Finite-Elemente-Modelle können mit angemessener Genauigkeit das Schwingungsverhalten der Schaufeln abbilden. Oft ist die Berechnung der Schaufeldynamik eingebettet in eine übergeordnete Optimierungsschleife. In diesen Fällen verbietet sich aufgrund der zahlreichen Freiheitsgrade eine Zeitschrittintegration. Mit der Methode der harmonischen Balance können periodische Bewegungen des Systems, wie sie im eingeschwungenen Zustand auftreten, direkt berechnet werden. Fremderrgte wie auch strömungsselbsterregte Schwin-

gungen, welche zu Grenzyklen führen, können analysiert werden. Weitere Reduktionen der Rechenzeit können erreicht werden durch die Annahme zyklischer Symmetrie, den Ausschluss von Mistuning sowie die Anwendung weiterführender Reduktionsmethoden.

In dieser Formulierung der Schwingungsberechnung lässt sich Verschleiß durch eine inhomogene Rücknahme des Kontaktdrucks in den Kontaktflächen approximativ berücksichtigen. Die Rücknahme selbst berechnet sich anhand eines zuvor definierten Verschleißgesetzes. Der Kausalität des Verschleißfortschritts entsprechend ergibt sich eine iterative Rechenprozedur welche abwechselnd die Anpassung der Kontaktkräfte sowie das darauf basierende Schwingverhalten ermittelt.

Das Ziel der Projekte ist letztlich, die konsistente Berücksichtigung des Drehzahleinflusses und des Verschleißes auf die Schwingungsanalysen in einem Rechentool gebündelt zu implementieren.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Lars Panning-von Scheidt

☎ +49(0)511/762-4170

✉ [panning@ids.uni-hannover.de](mailto:panning@ids.uni-hannover.de)

## Multiresonanzen und Multigrenzzykel

Im Rahmen des Projekts „Multiresonanzen und Multigrenzzykel“ (Industrieförderung) werden Systeme mit zwei nahezu gleichzeitig in Resonanz befindlichen Moden untersucht. Als Multiresonanz bezeichnen wir dabei den fremderregten Fall bei multiharmonischer Anregung. Bei selbsterregten Schwingungen können quasiperiodische Lösungen bzw. Grenztori im Phasenraum auftreten, die man als Multigrenzzykel bezeichnet.

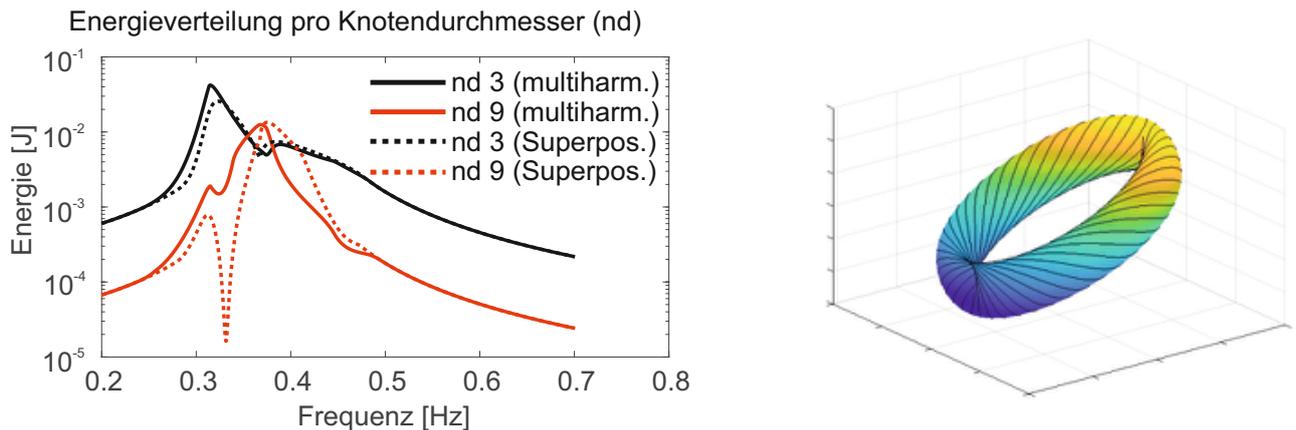


Abbildung 5: Vergleich einer Superposition zweier Anregungsfälle mit einer multiharmonischen Anregung, quasiperiodischer Multigrenzzykel

Bei der Auslegung von Turbinenschaufeln sind nichtlineare Koppellemente zur Erhöhung von Steifigkeit und Dämpfung oft unumgänglich. Infolgedessen gelten lineare Gesetze nicht mehr, sodass ein Energietransport zwischen den Schwingungen einzelner Knotendurchmessern vorliegen kann. Mithilfe eines Minimalmodells mit wenigen Freiheitsgraden wird untersucht, welche Konsequenzen zwei in der Nähe eines kommensurablen Verhältnisses stehende Eigenfrequenzen nach sich ziehen. Dabei lassen sich drei Varianten der Kommensurabilität unterscheiden: 1:1-Resonanzen weisen nahezu identische Eigenfrequenzen auf, 1:n-Resonanzen entstehen durch ein ganzzahliges Verhältnis zweier Eigenfrequenzen und als dritte Möglichkeit besitzen die zu untersuchenden Eigenfrequenzen bei einer n:m-Resonanz näherungsweise einen gemeinsamen Teiler, ohne Vielfache voneinander abzubilden. Auf der Basis von nichtlinearen Lösungsverfahren wird der eingeschwingene Zustand unter Beachtung der zyklischen Randbedingungen erforscht. Dabei gilt es, den Effekt auf den Energiefluss zwischen den Moden abzubilden. Als Einflussfaktoren für die Höhe des Energieflusses gelten beispielsweise die Phase zwischen verschiedenen Anregungsfrequenzen, der Dämpfungsgrad und die Anregungskraft. Auch die Fragestellung, ob es Un-

terschiede beim Energiefluss innerhalb einer oder zwischen zwei verschiedenen Schwingungsfamilien gibt, wird dabei untersucht. Zudem gilt es, die Besonderheiten der multiharmonischen Anregung im Vergleich zu einer Superposition zweier einzelnen Anregungsfälle aufzuzeigen. Hierbei liegt ein Augenmerk auf der Frage, welche weiteren Moden durch interne Resonanzen angeregt werden. Neben den fremderregten Schwingungen weisen auch selbsterregte Schwingungen Energietransport zwischen verschiedenen Knotendurchmessern auf. Auf diese Weise treten quasiperiodische Lösungen auf, sobald die Eigenfrequenzen nicht exakt kommensurabel sind. Dadurch sind Erweiterungen der genannten Verfahren notwendig, um die Lösung berechnen zu können. Hierbei wird festgestellt, unter welchen Bedingungen welche Knotendurchmesser an der Lösung beteiligt sind. Außerdem ist die Abhängigkeit der Lösung von den Anfangsbedingungen Teil der Untersuchungen.

Ansprechpartner:

Niklas Marhenke, M. Sc.

+49(0)511/762-3489

✉ niklas.marhenke@ids.uni-hannover.de

## Verstimmte Beschaukelungen mit aerodynamischer Kopplung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Mistuning mit Aero-Kopplung" wird die Dynamik verstimmter Schaufelkränze unter Berücksichtigung aerodynamischer Kopplungseffekte und nichtlinearer Reibkontakte numerisch und experimentell untersucht. Das Ziel des gemeinschaftlich durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) geförderten Projektes ist die Entwicklung und Validierung effizienter Simulationsmethoden für die zuverlässige Prognose von Schaufelschwingungen.

Infolge von Fertigungstoleranzen und betriebsbedingtem Verschleiß weisen die Schaufeln in Turbomaschinen individuelle dynamische Eigenschaften auf. Diese Verstimmung der Strukturmechanik stört die zyklische Symmetrie des Schaufelkranzes und führt zu einer lokalen Konzentration der Schwingbeanspruchung (vgl. Abbildung 6). Die Lokalisierung hängt neben der Verstimmungsintensität auch wesentlich von der Kopplung zwischen den Schaufeln ab. Der Fokus dieses Vorhabens liegt daher auf einer umfassenden Berücksichtigung verschiedener Kopplungsmechanismen.

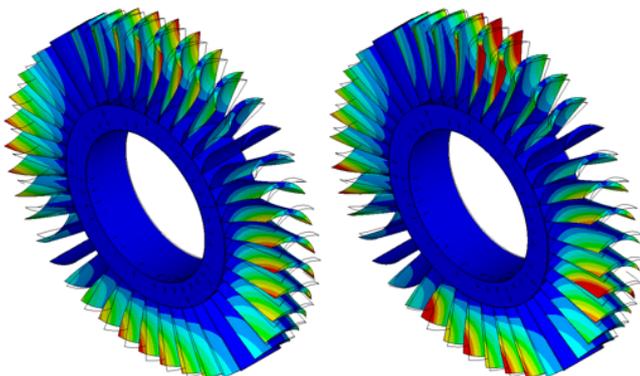


Abbildung 6: Zyklisch symmetrischer (links) und verstimmter Schaufelkranz (rechts)

Strukturseitig wird die linear-elastische Kopplung über die Rotorscheibe um reibungsbehaftete Fügestellen ergänzt. Dies ermöglicht die Simulation nichtlinearer Schwingungen mit geteilten Deckbändern, Stützflügeln und Schaufel-Scheibe-Kontakten im Bereich des Schaufelfußes (vgl. Abbildung 7). Die Dynamik des Schaufelkranzes wird hierbei durch eine reduzierte Anzahl an Strukturmoden approximiert (engl. Reduced Order Model, ROM). Diese modale Beschreibung ermöglicht effiziente Schwingungssimulationen und eine direkte Integration aeroelastischer Kopplungseinflüsse. Die aerodynamischen Einflusskoeffizienten werden aus linearisierten CFD-Simulationen ermittelt und als generalisierte Druckkräfte in die reduzierte Kranzmodellierung implementiert.

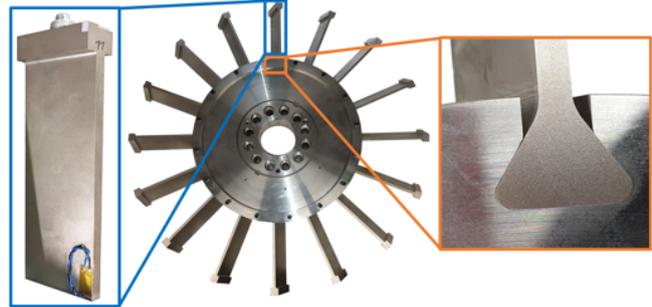


Abbildung 7: Schaufelkranz mit Fußkopplung für Rotationsversuche unter Vakuum

Hierbei wird neben der Kopplung individueller Schaufeln auch die aeroelastische Interaktion zwischen verschiedenen Schwingungsfamilien des Kranzes berücksichtigt (vgl. Abbildung 8). Die Validierung des entwickelten Modellansatzes erfolgt anhand experimenteller Messdaten für zwei verschiedene Versuchsträger. Zur getrennten Validierung der aerodynamischen Kopplung und der nichtlinearen Fügestellendämpfung wird eine durchströmte Axialverdichterblick sowie ein im Vakuum rotierender Schaufelkranz mit Schwalbenschwanzfüßen untersucht. Die Arbeiten werden in Kooperation mit dem Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) der Leibniz Universität Hannover durchgeführt.

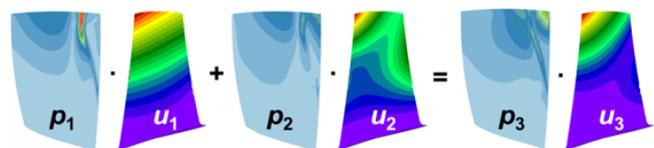


Abbildung 8: Lineare Superposition aerodynamischer Druckkräfte zweier Moden

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Lars Panning-von Scheidt  
 ☎ +49(0)511/762-4170  
 ✉ [panning@ids.uni-hannover.de](mailto:panning@ids.uni-hannover.de)

## Schwingungsverhalten von Schaufeln infolge zufälliger Anregung

Im Rahmen des Arbeitspakets "Schwingungsverhalten von Schaufeln infolge einer Anregung mit einem kontinuierlichen und bandbegrenzten Spektrum" als Teil des Verbundprojekts „ECOFLEX-turbo - SchauTex“ (gefördert durch AG Turbo) wird das Schwingungsverhalten zyklisch symmetrischer Schaufelkränze mit nichtlinearen Kopplungen unter stochastischer Anregung untersucht. Dabei werden sowohl breitbandige bis weiße, als auch schmalbandige Anregungsspektren in Betracht gezogen.

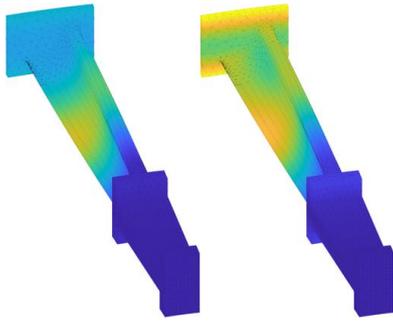


Abbildung 9: Standardabweichung der Verschiebung in Umfangsrichtung an einem Segment mit Deckband bei verschiedenen Kontaktdrücken.

Turbinenschaufeln sind im Betrieb erheblichen Belastungen ausgesetzt. Zur Sicherstellung der Dauerfestigkeit ist es notwendig, das Schwingungsverhalten der Schaufeln möglichst genau vorherzusagen zu können. In realen Systemen treten oftmals nichtlineare Effekte auf. Entweder unbeabsichtigt, beispielsweise aufgrund von kinematischen oder multi-physikalischen Zusammenhängen, oder bewusst erzeugt, um deren Wirkung zu nutzen. So werden zur Reduzierung der Schwingungsamplituden von Turbinenschaufeln z.B. Deckbänder, Unterplattformdämpfer oder andere nichtlineare Koppellemente verwendet, um durch Reibung Energie zu dissipieren.

Zur Berechnung des Schwingverhaltens dieser nichtlinearen mechanischen Systeme gibt es eine Vielzahl von deterministischen Methoden, welche sich meist auf harmonische Anregungen stützen. Aufgrund der wechselnden Anordnung von Rotor- und Statorschaufeln lassen sich Anregungen im stationären Betrieb somit gut beschreiben.

Bisher kaum beachtet im Bereich der Turbomaschinen ist der Fall, in dem die Anregung nicht mehr deterministisch zu beschreiben ist, sondern nur noch mit stochastischen Größen.

Die Schwingungsantwort linearer mechanischer Systeme auf stationäre stochastische Anregung lässt sich im Frequenzbereich ähnlich einfach berechnen wie es für deterministische Anregungen der

Fall ist. Die Antwort wird jedoch nicht mehr in Form von Amplituden und Frequenzgängen beschrieben, sondern als stochastische Momente, Wahrscheinlichkeitsdichten und spektralen Leistungsdichten. Bei nichtlinearen Systemen lassen sich diese stochastischen Größen nicht mehr direkt berechnen. Für Systeme mit wenigen Freiheitsgraden gibt es Methoden, welche mit viel Rechenaufwand die Fokker-Planck-Gleichung lösen, die beschreibt, wie sich die Wahrscheinlichkeitsdichte im Zustandsraum mit der Zeit ändert. Darüber hinaus gibt es Methoden, die ohne die Fokker-Planck-Gleichung auskommen und mit Einschränkungen auch für Mehrfreiheitsgradsysteme geeignet sind. Dies ist z.B. in Form von Monte-Carlo-Simulationen, also Zeitbereichssimulationen einzelner Realisierungen eines Zufallsprozesses, möglich. Ebenfalls möglich ist die Berechnung durch äquivalente Linearisierung des nichtlinearen Systems mit anschließender Lösung des linearisierten Systems. Letzteres Vorgehen ist dabei erheblich weniger zeitintensiv und gleichzeitig für größere Systeme einsetzbar. Bei der äquivalenten Linearisierung wird davon ausgegangen, dass die Systemantwort des nichtlinearen Systems näherungsweise normalverteilt ist und unter dieser Annahme ein lineares System gesucht, welches möglichst ähnlich auf die stochastische Anregung reagiert. Das Ziel des Projektes ist die Berücksichtigung stochastisch stationärer Anregungen zyklisch-symmetrischer Systeme mit mehreren Freiheitsgraden pro Segment. Es werden sowohl lineare Systeme als auch solche mit nichtlinearen Kopplungen, z.B. in Form von Deckbändern betrachtet. Auf der Seite der Anregung werden verschiedene Spektren, von weißem bis zu schmalbandigem Rauschen, berücksichtigt.

Ansprechpartner:

Alwin Förster, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-5381

✉ foerster@ids.uni-hannover.de

## Transiente Schaufeldynamik

Im Rahmen des Projekts "Transiente Schaufeldynamik" wird der Einfluss transienter Vorgänge, wie z.B. Resonanzpassagen, auf das Schwingungsverhalten von Turbinenschaufeln untersucht. Das Vorhaben wird durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) gefördert und in enger Zusammenarbeit mit den Unternehmen des projektbegleitenden Arbeitskreises durchgeführt.

Das weltweite Kraftwerksportfolio bindet mehr und mehr regenerative Energiequellen ein, deren Verfügbarkeit zufälligen Schwankungen unterliegt. Daraus ergibt sich ein zunehmend größerer Anteil an konventionellen Kraftwerken, die zyklisch und auch instationär betrieben werden müssen. Die Lastwechsel bestimmen mit den An- und Abfahrvorgängen die Lebensdauer vieler Kraftwerkskomponenten wesentlich mit, sodass in diesem Projekt insbesondere transiente Resonanzdurchgänge verstimmter Beschaufelungen betrachtet werden. Mistuning beschreibt die Abweichung realer Turbinenschaufeln von ihren Nominaleigenschaften aufgrund von unvermeidbaren Einflüssen wie Materialinhomogenitäten oder Verschleiß. Die resultierenden Unterschiede können Lokalisierungseffekte hervorrufen, bei denen die Schwingamplituden einzelner Schaufeln deutlich erhöht werden. Es hat sich gezeigt, dass dieser Effekt bei transienten Resonanzdurchfahrten und nahe beieinander liegenden Resonanzfrequenzen noch verstärkt werden kann, sodass während der dieser sogar höhere Amplituden auftreten als im stationären Zustand, siehe Abbildung 10.

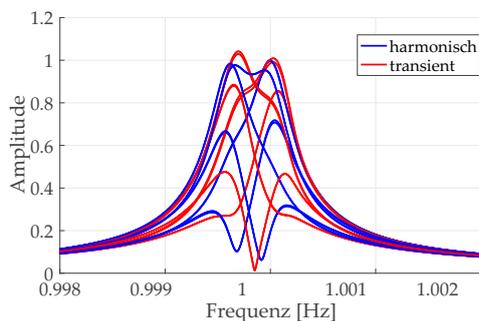


Abbildung 10: Beispielhafte Amplitudenüberhöhung beim Resonanzdurchgang

Zur Untersuchung dieses Effektes werden bestehende Methoden zur mechanischen Modellierung und mathematischen Beschreibung transienter Schwingungen angewendet und weiterentwickelt. Zur experimentellen Validierung der Ergebnisse stehen unter anderem ein Prüfstand mit berührungslos-

ser, akustischer Anregung für vereinfachte Modellschaufelkränze, siehe Abbildung 11, sowie ein Rotationsprüfstand zur Verfügung.



Abbildung 11: Akustische Erregung: Schaufelkranz (1), Halterung (2), Lautsprecher (3)

Vergleiche zwischen gemessenen und simulierten Schwingungsantworten zeigen eine ausgesprochen gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 12.

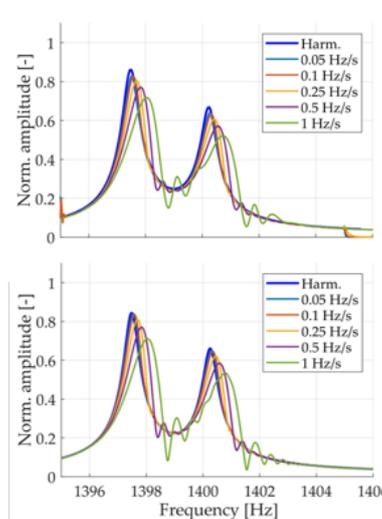


Abbildung 12: Vergleich Messung (oben) und Rechnung (unten) des transienten Resonanzdurchgangs einer verstimmten Blisk

Ansprechpartner:

Klaus-Dieter Schlesier, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-4144

✉ schlesier@ids.uni-hannover.de

## Gekoppelte Rotor-Schaufel-Schwingung

Im Rahmen des Projekts „Gekoppelte Rotor-Schaufel-Schwingung“ wird ein kombiniertes Modell aus Rotor und Schaufelkranz entwickelt, welches in der Lage ist, die aus der Interaktionen beider Komponenten resultierenden Effekte abzubilden. Das Vorhaben ist Teil des Verbundprojekts „ECOFLEX-turbo - SchauTex“ (gefördert durch AG Turbo).

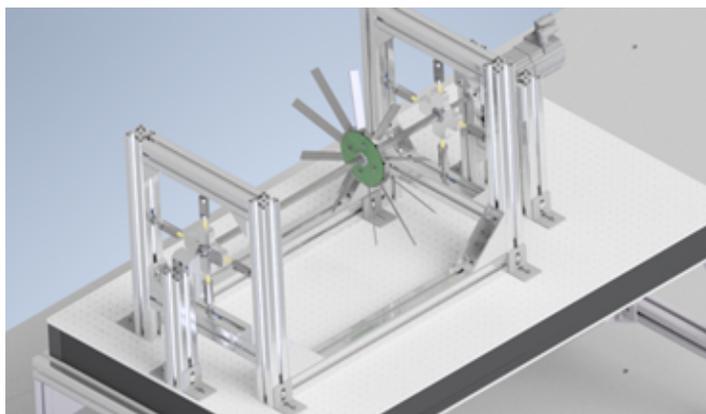


Abbildung 13: Ziel ist es die richtungsabhängigen Unterschiede von Lagerung, Rotor und Beschau felung in einem einzigen gekoppelten Modell zu berücksichtigen.

Bei der Entwicklung neuer Turbomaschinen erfolgt die Auslegung des Rotors und der darauf befindlichen Schaufelkränze weitestgehend separat. Diese Aufteilung erfolgt zum einen, weil beide Komponenten sich bisher nur im geringen Maß gegenseitig beeinflusst haben und zum anderen, weil bis heute keine geeigneten, praktikablen Ansätze für eine kombinierte Untersuchung existieren. Effekte, welche aus der Kopplung resultieren wurden deshalb in der Vergangenheit gezwungenermaßen vernachlässigt.

Aktuelle Trends in der Entwicklung, wie leichtere Rotoren bei gleichzeitig längeren Schaufeln, sorgen dafür, dass der Frequenzabstand zwischen rotor- und schaufeldominierten Moden abnimmt. Mit abnehmendem Frequenzabstand steigt der Grad der gegenseitigen Beeinflussung beider Komponenten, sodass die isolierte Betrachtung ihre Berechtigung verliert. Aus diesem Grund sollen im Projekt neue Methoden entwickelt und erprobt werden, um zukünftig eine kombinierte Betrachtung zu ermöglichen. Ziel ist es dabei, richtungsabhängige Unterschiede sowohl in der Lagerung als auch in der Geometrie der beschau felten Scheibe (Schaufelmistuning) gleichzeitig berücksichtigen zu können. Neben erweiterten Berechnungsmethoden bietet die beschriebene Entwicklung jedoch auch neue

Möglichkeiten im Hinblick auf die Schwingungsüberwachung. In realen System wird im Betrieb im Gegensatz zum Labor nur die Schwingung des Rotors über Sensoren in den Lagern erfasst, eine Überwachung der Schaufelschwingungen ist aus praktischen Gründen nicht möglich. Die zunehmende Interaktion von Schaufeln und Rotor bietet nun das Potential aus der gemessenen Rotorschwingung indirekt Rückschlüsse auf die Schwingungen der Schaufeln und damit auf den Zustand der Schaufeln zu ziehen und so zum Beispiel Verschleiß frühzeitig zu erkennen.

Im Rahmen des Projekts sollen daher erste Untersuchungen zu den beschriebenen Kopplungseffekten durchgeführt werden, um die Ursachen und Einflussgrößen besser zu verstehen und damit die Ausgangsbasis für die Entwicklung neuer Diagnostikmethoden in zukünftigen Projekten zu schaffen. Neben numerischen Simulationen soll die Interaktion zwischen Rotor und Beschau felung auch an einem neu zu entwickelnden Prüfstand untersucht werden.

Ansprechpartner:

Klaus-Dieter Schlesier, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-4144

✉ schlesier@ids.uni-hannover.de

## Entwicklung nichtlinearer Rotordynamik-Gehäusemodelle

Der Fokus bei der Modellierung rotierender Maschinen liegt bisher auf den Komponenten Rotor und Lagerung. Für ein rotordynamischen Gesamtmodell bildet nun die Berücksichtigung der Gehäusedynamik den nächsten Schritt. In dem Projekt „Rotordynamik-Gehäusemodelle und Model-Update“ (gefördert durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., FVV) soll in Zusammenarbeit mit dem Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) ein nichtlineares Gehäusemodell aufgebaut und validiert werden.

Der Einfluss von Umgebungsstrukturen, wie z.B. Gehäuse oder Fundament, wird bei der Berechnung der Rotordynamik mithilfe kommerziell verfügbarer Programmen bisher kaum oder häufig nur in Form einfacher Übertragungsfunktionen berücksichtigt. Dabei können nichtlineare Effekte, insbesondere Reibung in Fügstellen, nicht abgebildet werden. Baurtbedingt handelt es sich bei Gehäusen rotierender Maschinen jedoch um Strukturen mit einer hohen Anzahl an Fügstellen (vgl. Abbildung 14), sodass die Annahme eines linearen Übertragungsverhaltens zu einem nicht zu vernachlässigbaren Fehler führt.

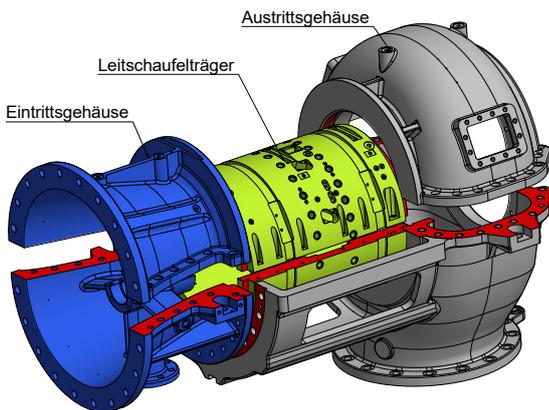


Abbildung 14: Großflächige Fügstellen (rot) der Gehäusekomponenten des Axialverdichters.

Aus diesem Grund soll exemplarisch anhand des TFD-Axialverdichters ein nichtlineares Gehäusemodell aufgebaut werden. Hierbei kann das gesammelte Know-How aus vorangegangener Forschung im Bereich der Turbinenschaufel-Dämpfung genutzt und die Methodiken und Tools zur Berechnung lokaler Reibkontakte auf großflächige Fügstellen erweitert werden.

Ein vielversprechender Ansatz für die Modellierung ist ein komponentenweises Vorgehen. Im ersten Schritt werden lineare FE-Modelle der einzelnen Substrukturen aufgebaut und durch Model-Update-Verfahren an reale Messdaten, die durch das TFD bereitgestellt werden, angepasst. Für eine

möglichst zeiteffiziente Gestaltung der Optimierung ist die Anwendung von Reduktionsmethoden auf die großen Strukturmatrizen nötig. Das Konzept ist Abbildung 15 zu entnehmen.

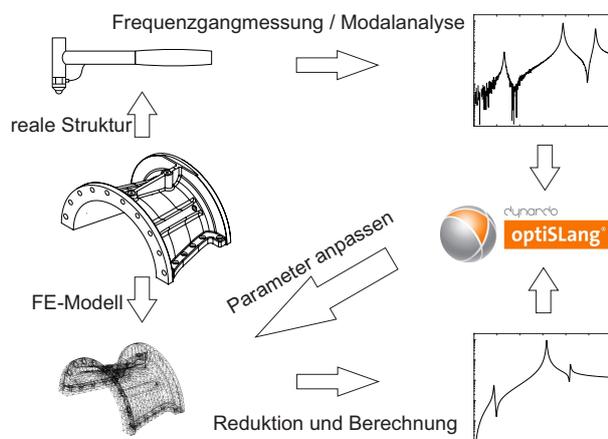


Abbildung 15: Ablauf des Update-Prozesses.

Den nächsten Schritt bildet die Kopplung der realitätsnahen Substrukturen zu Unterbaugruppen bzw. zum Gesamtmodell, in denen nur die Kontaktparameter in einem getrennten Update-Vorgehen identifiziert werden müssen. Auch hierbei ist die Anwendung von Reduktionsmethoden notwendig, da die Fügstellen-Freiheitsgrade insbesondere im Fall von nichtlinearen Kontaktmodellen leistungsintensive Berechnungen erfordern.

Abschließend folgt die Verknüpfung des entwickelten Gehäusemodells über geeignete Schnittstellen zu kommerziell verfügbaren Berechnungswerkzeugen der Rotordynamik.

Zukünftig kann das nichtlineare Gesamtmodell als Digital-Twin mithilfe von Betriebsdaten z.B. zum Health Monitoring eingesetzt werden.

Ansprechpartner:

Martin Paehr, M. Sc.

+49(0)511/762-3941

paehr@ids.uni-hannover.de

## Rotations- und Standversuche

Eine besondere Kompetenz des IDS liegt in der Entwicklung innovativer Dämpfungskonzepte und deren experimenteller Validierung. Für Untersuchungen des Dämpfungseinflusses von Turbinenschaufeln wurden am IDS Rotationsprüfstände sowie Standversuche entwickelt. An den Rotationsprüfständen können Schaufelschwingungen unter dem Einfluss von Fliehkrafteffekten untersucht werden. Der Einsatz von Standversuchen ermöglicht die Identifizierung charakteristischer Dämpfungseigenschaften.

Die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien für Turbomaschinen erfordert einen großen konstruktiven und finanziellen Aufwand. Insbesondere müssen die zur Validierung von strukturdynamischen Simulationsmodellen erforderlichen Daten messtechnisch bestimmt werden.

In den Rotationsprüfständen ROT I und ROT II des IDS können Schaufelkränze bis zu einem Durchmesser von 1200 mm untersucht werden. Um hierbei die zu untersuchenden Effekte vom Einfluss der Aerodämpfung zu isolieren, sind beide Prüfstände mit einer Vakuumkammer ausgestattet. Für Prinzipuntersuchungen an mittelgroßen Rotoren wurde der Rotationsprüfstand MORTIMER aus Abbildung 16 entwickelt. Aufgrund seiner Konstruktion eignet sich dieser ideal zur Erprobung neuer Anregungsmechanismen sowie für Untersuchungen an linearen Strukturen. Zur Erfassung der Schwingungsamplituden wird in den Versuchen sowohl DMS-Messtechnik als auch optische Messungen mittels eines Derotators und Laservibrometrie eingesetzt. Neben den Rotationsprüfständen werden am IDS für Untersuchungen, wie der Bestimmung von charakteristischen Dämpfungseigenschaften und Kontaktparametern, eine Vielzahl an Standversuchen eingesetzt.

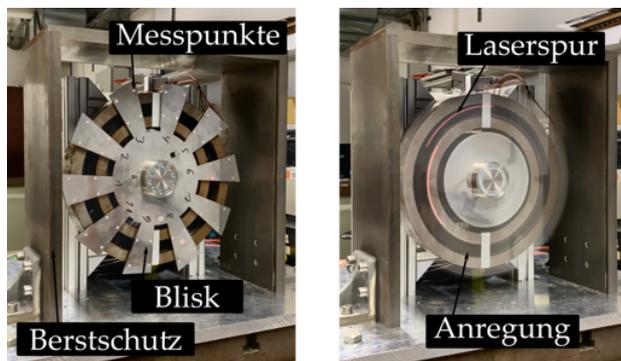


Abbildung 16: Rotationsprüfstand MORTIMER  
(links) Messung unter Rotation  
(rechts)

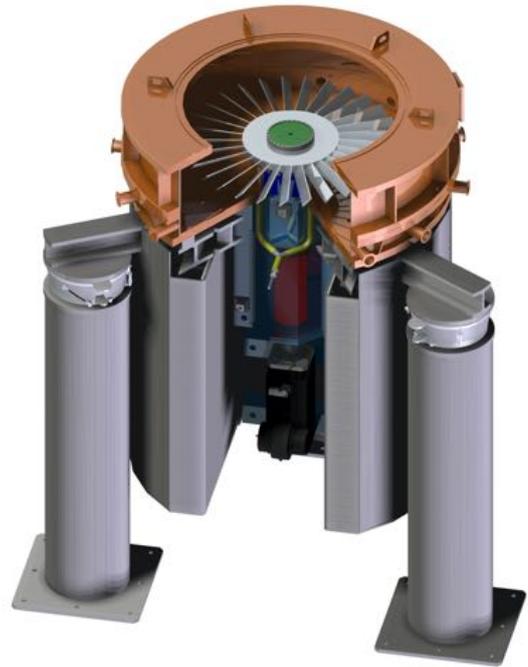


Abbildung 17: Rotationsprüfstand ROT II

Typische Messungen im Rahmen von Standversuchen sind:

- Deckbandkopplung: Untersuchungen an Deckbandschaufeln zwischen fixierten Schaufeln
- Reibelement: Untersuchungen an Schaufelpaaren
- Kraft- und Phasenregelung: Messung von nichtlinearen Frequenzgängen
- Multi-Shaker-Anregung: Realisierung des Phasenversatzes zwischen Schaufeln

Ansprechpartner:

T. Hoffmann, M. Sc., F. Jäger, M. Sc.,  
K. Schlesier, M. Sc., L. Schwerdt, M. Sc.,  
Dr.-Ing. L. Panning-von Scheidt  
☎ +49(0)511/762-4170  
✉ [panning@ids.uni-hannover.de](mailto:panning@ids.uni-hannover.de)

## Schwingungsanregung von Turbinenschaufeln und -läufern

Um qualitativ hochwertige und aussagekräftige Schwingungsmessungen durchführen zu können, ist die Erzeugung einer wohl definierten und auf die Fragestellung angepassten Anregungskraft unerlässlich. Der Entwicklung von Erregungsmechanismen, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen, kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Diese werden zur stationären und dynamischen Anregung von Turbinenschaufeln unterschiedlicher Größen erfolgreich verwendet und projektübergreifend weiterentwickelt.

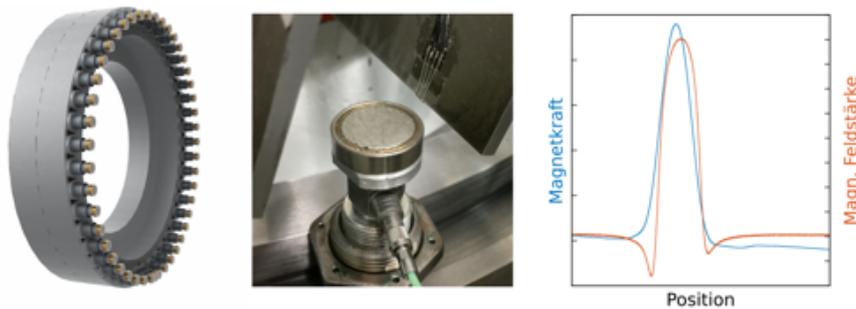


Abbildung 18: Ringerreger mit Permanentmagneten (0,7m Durchmesser); Einzelmagnet mit Kraft und Feldstärkesensor; Messergebnisse einer Schaufelüberfahrt

Eine robuste Möglichkeit zur Schwingungsanregung bildet der Einsatz von Permanentmagneten. Die Anregung eines bestimmten Knotendurchmessers kann hierbei gezielt über die Anzahl der um den Umfang verteilten Magnete realisiert werden. Durch Variation der Rotationsgeschwindigkeit ermöglicht dies einen einfachen Versuchsablauf zur Untersuchung mehrerer Schwingungsformen. Es können hohe Anregungskräfte eingestellt werden. Eine Messung der Schaufelkraft ist indirekt über die magnetische Feldstärke möglich. Obwohl bereits viele erprobte Anregungskonzepte existieren, ist die Weiterentwicklung und Innovation stets Gegenstand der Forschung. So wurde der patentierte elektromagnetische Anregungsmechanismus SINE (Patent: DE 10 2017 114 153 A1 2018.12.27) entwickelt, um Nachteile im Anregungsspektrum bestehender Konzepte zu eliminieren. Die gesamte Anregungsenergie kann in exakt definierte Schwingungsformen einer Turbinenschaufel eingebracht werden. Zur Erzeugung hochpräziser Erregerspek-

tren bei stationären Messungen kommt die akustische Anregung zur Anwendung. Der Vorteil des Systems besteht in der vollständig berührungslosen Anregung und in der äußerst präzisen Steuerung von Frequenz und Phase. Für jeden Lautsprecher wird dabei ein individuelles, nahezu monoharmonisches Signal erzeugt. Durch die gezielte Einstellung und Variation des Phasenunterschiedes an jedem Lautsprecher kann eine für Laufschaufeln typische stationäre oder transiente umlaufende Anregungswelle generiert werden. Neben Experimenten steht auch die Simulation der Erregermechanismen im Fokus, um stets eine genaue Vorhersage über auftretende Krafteinleitungen treffen zu können.

Ansprechpartner:

T. Hoffmann, M. Sc., F. Jäger, M. Sc.,  
 K. Schlesier, M. Sc., Dr.-Ing. L. Panning-von Scheidt  
 ☎ +49(0)511/762-4170  
 ✉ panning@ids.uni-hannover.de



Abbildung 19: Akustische Anregung; Innovativer Anregungsmechanismus SINE; Magnetfeldsimulation

## Schwingungsmessung und Messdatenverarbeitung

Zur Beurteilung des Schwingungszustands von Turbinenschaufeln und -scheiben kommen modernste Messverfahren zur Anwendung. Zur genauen und korrekten Messung des dynamischen Verhaltens der Struktur ist neben der fachgerechten Bedienung der Messgeräte ebenfalls die Nachbearbeitung der Rohsignale von wichtiger Bedeutung. Besondere Herausforderungen ergeben sich häufig aus der Rotation der zu messenden Objekte und den herrschenden Umweltbedingungen im Messaufbau.

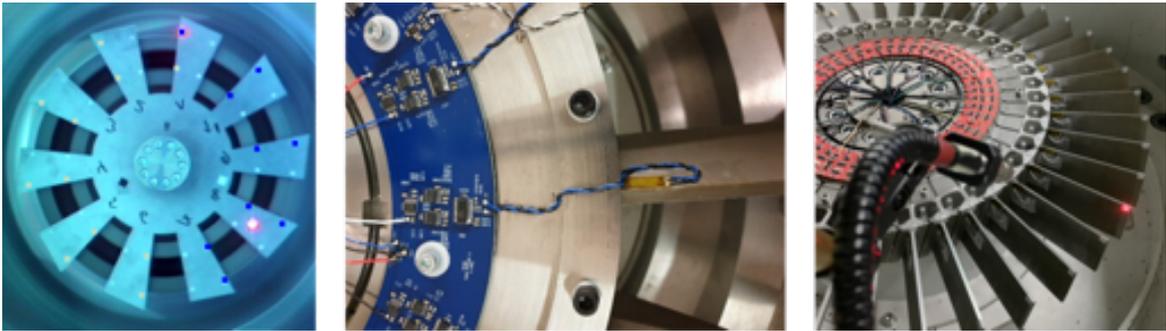


Abbildung 20: Derotatormessung unter Rotation; Messung mit Dehnmessstreifen und Auswerteelektronik; Stationäre Vibrometermessung

Die Auswahl eines geeigneten Messverfahrens zur Schwingungsmessung von Turbinenschaufeln hängt maßgeblich von der Messaufgabe und den Bedingungen der Messung ab. Aus diesem Grund wird ein breites Spektrum an Messprinzipien angewendet. So stellt die Messung mit Dehnmessstreifen ein gut etabliertes Verfahren dar, das auch unter beengten Verhältnissen und extremen Umweltbedingungen wie Vakuum zuverlässig funktioniert. Zur Vorbereitung der Messsignale auf die Analog-Digital-Wandlung kommt eine selbst entwickelte Filter- und Verstärkerschaltung zum Einsatz.

Durch den Einsatz eines Schleifringübertragers ist die Messung mit Dehnmessstreifen auch im rotierenden System problemlos möglich. Einige Strukturen sind aufgrund ihrer Geometrie nicht für die Bestückung mit Sensorik geeignet. Für diese kommen Laser-Vibrometer zum Einsatz, mit denen die aufgrund des Doppler-Effekts auftretende Frequenzverschiebung eines Messlasers bestimmt wird, der auf eine schwingende Oberfläche zielt. Durch den geringen Durchmesser des Laserpunkts ist dieses Verfahren auch für hochauflösende Messungen und für Messungen sehr kleiner Schwingamplituden geeignet. Mithilfe eines Scanning-Vibrometers kann der Schwingungszustand einer ganzen Struktur genau erfasst werden. Für transiente Messvorgänge steht ein Multipoint-Vibrometer zur Verfügung, welches bis zu 48 Messstellen gleichzeitig erfassen kann. Das Abscannen eines rotierenden Systems ist ebenfalls durch einen Derotator, der das Bezugskordinatensystem des Vibrometers in synchrone Rotation versetzt, möglich.



Abbildung 21: Multipoint-Vibrometer

Ansprechpartner:

T. Hoffmann, M. Sc., L. Schwerdt, M. Sc.  
K. Schlesier, M. Sc., Dr.-Ing. L. Panning-von Scheidt  
☎ +49(0)511/762-4170  
✉ [panning@ids.uni-hannover.de](mailto:panning@ids.uni-hannover.de)

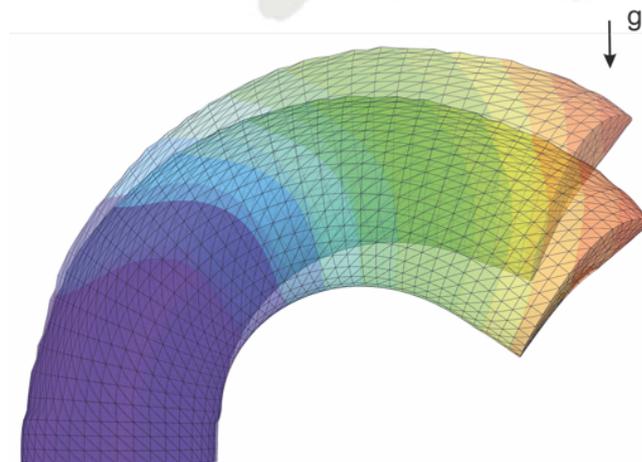
## 3.2 Forschungsgruppe Kontaktmechanik von Elastomeren



Dr.-Ing. Stephanie Kahms  
(Gruppenleiterin)

Rebecca Berthold, M. Sc.  
Dipl.-Ing. Steffen Bothe  
Arne Leenders, M. Sc.  
Nam Duc Nguyen, M. Sc.

- Modellierung von Reibung und Verschleiß
- Untersuchung transienter Vorgänge in geschmierten Dichtkontakten
- Kontaktmechanik von Soft Robot Systems
- Reifen-Fahrbahn-Kontakt
- Profilklotz-Verschleiß
- Oberflächenstrukturen für technische Reibkontakte



## Kontaktmechanik von Elastomeren

Der Forschungsbereich Kontaktmechanik von Elastomeren beschäftigt sich mit der Beschreibung und Modellierung von Elastomerbauteilen im Kontakt mit verschiedenen Gegenspielern. Unsere Forschung erstreckt sich über ein weites Anwendungsgebiet, wie beispielsweise Reifen, die Dichtungstechnik sowie die Interaktion softer Robotersysteme mit ihrer Umgebung.

Die Kontaktmechanik zählt zu den grundlegenden Disziplinen der Ingenieurwissenschaften und hat die Aufgabe die mechanische Wechselwirkung zwischen Körpern, die im statischen bzw. dynamischen Kontakt stehen zu beschreiben. Die Kontaktmechanik ist eng verknüpft mit der Reibung und entsprechende Fragestellungen zählen bereits seit vielen Jahrhunderten zum Repertoire der Themen hoher Relevanz für die gesamte Menschheit. Auch heute ist die Kontaktmechanik für zahlreiche technische Anwendungen, wie u. a. Reifen und Dichtungen, von großer Bedeutung und ist daher nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung.

Elastomere sind formfeste aber elastisch verformbare Kunststoffe. Sie werden in vielen Anwendungen verwendet, da sie die Übertragung großer Haft- und Reibkräfte sowie eine große Deformierbarkeit ermöglichen. Für die Untersuchung der Kontakt- und Reibungsphänomene bedienen wir uns an der Bandbreite von einfachen physikalischen Modellen, wie z.B. dem Bürstenmodell, bis hin zu komplexen Modellierungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode. Mit unseren institutseigenen Prüfständen sind wir in der Lage unsere Modelle zu parametrieren und zu validieren.

### Aktuelle Schwerpunkte unserer Forschungen sind u. a.:

- Die Modellierung von Reibung und Verschleiß,
- Untersuchung transienter Vorgänge in geschmierten Dichtkontakten,
- Kontaktmechanik von Soft Robot Systems,
- Reifen-Fahrbahn-Kontakt,
- Profilklotz-Verschleiß,
- Oberflächenstrukturen für technische Reibkontakte.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Stephanie Kahms

☎ +49(0)511/762-17828

✉ kahms@ids.uni-hannover.de

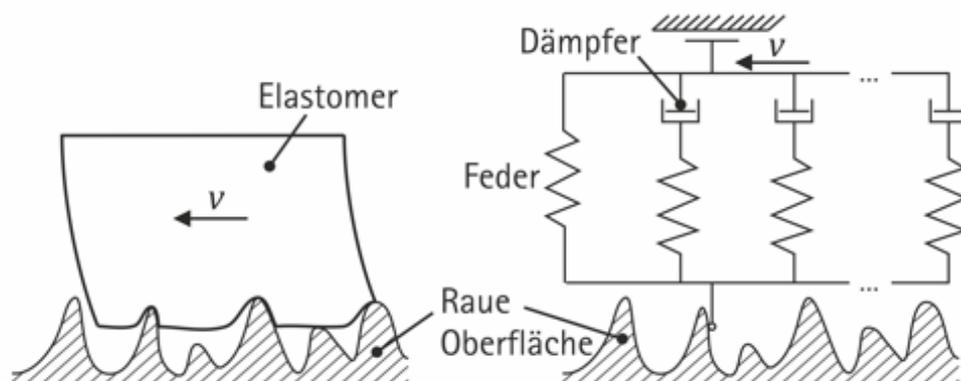


Abbildung 1: Modell eines gleitenden Gummiblocks

## Assessing Friction Characteristics of Tire Tread Rubber (AFRIC<sup>2</sup>)

Im Rahmen des Projekts AFRIC<sup>2</sup> wird der Flugzeugreifen-Landebahn-Kontakt experimentell sowie anhand von Simulationen untersucht. Der Fokus liegt dabei einerseits auf der experimentellen Bestimmung des Reibungskoeffizienten bzw. der modellbasierten Reibwertvorhersage und andererseits auf der Berechnung der Kontaktkräfte und -momente sowie der Temperaturentwicklung innerhalb der Kontaktzone.

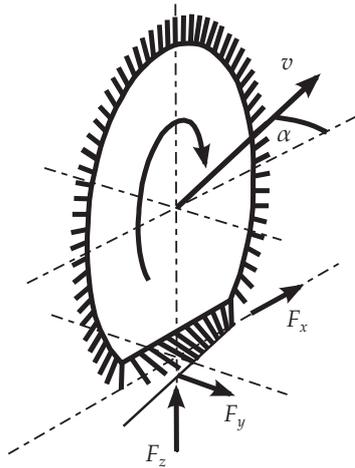


Abbildung 2: Das Bürstenmodell [Pacejka, Tire and Vehicle Dynamics, 2012]

Bei Bodenmanövern von Flugzeugen kommt dem Reifen große Bedeutung zu. Dieser muss die Übertragung der bei Start und Landung wirkenden Trag-, Führungs- und Bremskräfte gewährleisten. Um ein Flugzeug nach dem Touchdown zum Stehen zu bekommen, stehen die Schubumkehr, der Luftwiderstand sowie die Bremskraft der Scheibenbremsen zur Verfügung. Um kurze Bremswege zu erreichen, ist vor allem die Reibung zwischen Reifen und Landebahn wichtig. Die im Kraftschluss von Reifen und Landebahn wirkende Bremskraft ist für einen großen Anteil der Bremsenergie verantwortlich. Während die Reibung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt für Automobil- und Nutzfahrzeugreifen bereits seit vielen Jahren anhand von Modellen untersucht wird, ist dies bei Flugzeugen noch anders. Hier beruht die Entwicklung von Flugzeugreifen bisher weitestgehend auf empirischen Erfahrungen der Hersteller. Zum besseren Verständnis des Bremsverhaltens rücken daher in den letzten Jahren, nach dem Vorbild der Automobilindustrie, Modelle zur Beschreibung der auftretenden Kräfte in den Fokus.

Ein sehr bekanntes Modell zur Beschreibung eines rollenden, deformierbaren Reifens, das auch im Rahmen dieses Projektes verwendet wird, ist das

Bürstenmodell. Die Lauffläche des Reifens wird, wie in Abbildung 2, durch Bürstenhaare ersetzt. Diese ermöglichen die Beschreibung der sich einstellenden Haft- und Gleitzone innerhalb der Reifenaufstandsfläche. Die Bürstenhaare repräsentieren die Elastizität von Karkasse, Gürtel und Lauffläche des Reifens. Erreicht ein Bürstenhaar den Einlauf in die Kontaktfläche, haftet es zunächst und erfährt eine immer größer werdende Verformung, bis es zum Auslauf hin beginnt zu gleiten. Die Kräfte innerhalb der Kontaktzone werden separat für die Haft- und Gleitzone über das Elastizitätsgesetz beziehungsweise die Coulomb'sche Gleitreibungsformel bestimmt. Sie sind dabei abhängig von der Reifensteifigkeit, der Kontaktlänge, dem Schlupf, der vertikalen Kraft sowie dem Reibungskoeffizienten. Die Parameter des Modells müssen experimentell bestimmt werden. Vor allem der Reibungskoeffizient spielt dabei eine wichtige Rolle, da dieser neben der Gleitgeschwindigkeit und der Kontaktspannung auch von der Temperatur abhängig ist (Abbildung 3).

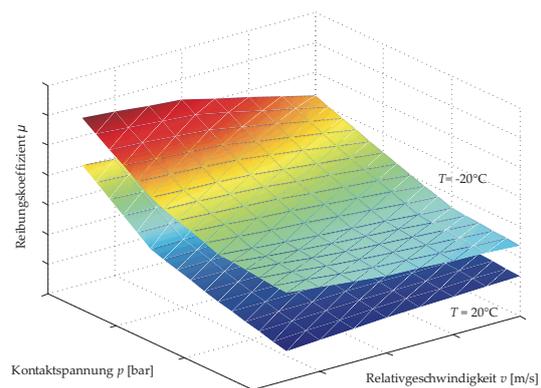


Abbildung 3: Experimentell ermitteltes Reibkennfeld

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Stephanie Kahms

☎ +49(0)511/762-17828

✉ kahms@ids.uni-hannover.de

## Untersuchungen zum transienten Verhalten von Hydraulikdichtungen

Hydraulikdichtungen werden zumeist für Antriebssysteme eingesetzt, bspw. in Landmaschinen, Werkzeugmaschinen oder Förderanlagen. Hierbei wird die Bauteilauslegung zur Kosten- und Zeitersparnis zunehmend durch Simulationen unterstützt. Der geschmierte Dichtkontakt wird über das Schmiermittel und die umgebenden Bauteile, insbesondere die Hydraulikdichtung, gebildet. Der Kontakt sowie die Dichtwirkung unterliegen dabei vielen Einflussgrößen wie Geometrie, Materialauswahl, Oberflächentopologie und Umgebungsbedingungen.

Die Untersuchung der dynamischen Vorgänge im Dichtkontakt erfolgt mithilfe einer Simulationsumgebung. Diese umfasst die Modellierung des Schmierfilms, der Dichtung und die Wechselwirkung beider Teilmodelle. Viskose Schmiermittel im Dichtkontakt können zumeist durch fluiddynamische Gesetzmäßigkeiten wie die Navier-Stokes-Gleichungen oder die Reynoldsgleichung beschrieben werden. Die Dichtung wird auf die Welle gedrückt, siehe Abb. 4, wobei Anpressung, Materialeigenschaften und Maschinenanregungen eine transiente Druckverteilung im Schmierfilm hervorrufen, die auf die deformierbare Dichtung wirkt.

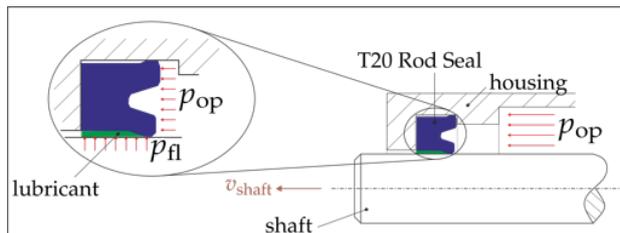


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines geschmierten Dichtkontakts einer hydraulischen Stangendichtung

Die zumeist aus Elastomerwerkstoffen bestehende Hydraulikdichtung kann als viskoelastisch angesehen werden und wird durch entsprechende Materialgesetze wie das Prony-Modell oder fraktionale Ansätze modelliert. Die Deformation der Dichtung bewirkt eine sich ändernde Geometrie des Dichtspalts, was wiederum die Druckverteilung im Schmierfilm beeinflusst. Diese Wechselwirkungen von Schmiermittel und Dichtung müssen bei der simulationsgestützten Modellierung transienter Effekte berücksichtigt werden. Dabei kommen ALE-Ansätze (Arbitrary Lagrangian Eulerian) zum Einsatz, die eine Kopplung der verschiedenen Diskretisierungen (Gitter) von Schmiermittel und Dichtung schaffen.

Bei Deformation der Dichtung und sich ändernder Gestalt des Gitters muss diese Kopplung ggf. dynamisch angepasst werden. Dabei muss durch einen Iterationsprozess sichergestellt werden, dass eine konvergente und numerisch stabile Lösung berechnet wird.

Zu den von uns untersuchten transienten Effekten gehört beispielsweise der gegenseitige Einfluss von Rauheit und Oberflächenbeschaffenheit auf den Schlupf. Mithilfe des Simulationstools können Dichtungen hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens untersucht werden. Exemplarische Ergebnisse für einen vereinfachten Keilspalt sind in Abb. 5 gezeigt.

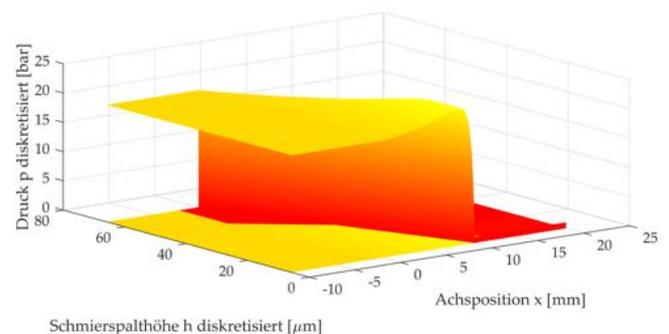


Abbildung 5: Druckverteilung im Keilspalt mit transienter Fluid-Struktur-Wechselwirkung

Um den numerischen Aufwand zu reduzieren, der durch den Iterationsprozess und die vielschichtigen Simulationsbausteine hervorgerufen wird, werden zudem Methoden der Freiheitsgradreduktion angewendet.

Ansprechpartner:

Arne Leenders M. Sc.

☎ +49(0)511/762-17576

✉ leenders@ids.uni-hannover.de

## Coherent Methodology for Modelling and Design of Soft Material Robots "The Soft Material Robotics Toolbox (SMaRT)"

Das Projekt "The Soft Material Robotics Toolbox - SMaRT" beschäftigt sich im Rahmen des Schwerpunktprogramms "Soft Material Robotic Systems" der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit der Entwicklung einer universell einsetzbaren Modellierungsmethode für Entwicklung und Optimierung softer Robotersysteme. Für das Projekt arbeitet das IDS mit dem Institut für Montagetechnik und dem Institut für Mechatronische Systeme zusammen.

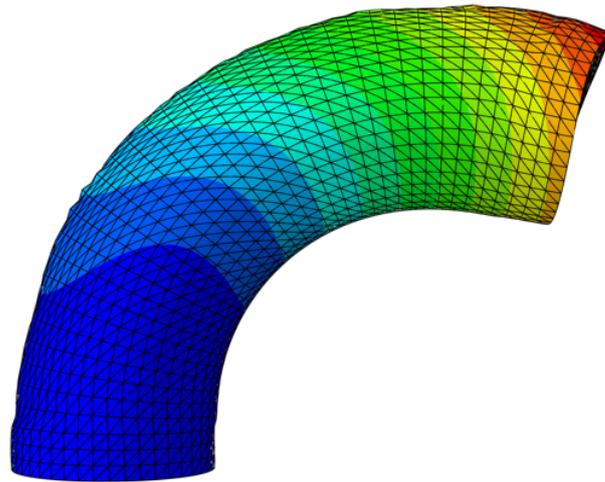


Abbildung 6: FEM-Modell eines weichen Aktors mit faserverstärkten Kammern

Im Vergleich zu ihren starren Gegenstücken zeichnen sich Robotersysteme aus flexiblen, weichen Materialien insbesondere durch signifikante Vorteile bei der Mensch-Roboter-Kollaboration sowie beim Handling von Objekten mit unbekannter Geometrie oder unregelmäßiger Oberflächentopologie aus. Die Entwicklung von weichen Robotern ist jedoch eine Herausforderung, da bis heute keine generische Methodik für eine zielgerichtete Entwicklung von weichen Robotersystemen existiert. Ziel des Projektes ist es, diese Lücke zu schließen und die Vorteile der weichen Roboter durch die Entwicklung einer universellen Modellierungsmethode in unterschiedlichen Anwendungsfällen nutzbar zu machen.

Der Fokus der Modellierungsmethodik liegt auf einer nahtlosen Beschreibung der Statik, Kinematik und Dynamik von weichen Robotersystemen. Für die Darstellung relevanter Aspekte, wie z.B. Material-Nichtlinearität, große Dehnung und Verformung, wird zunächst ein Finite-Elemente-Modell verwendet (Abbildung 6). Diese Finite-Elemente-Modelle sind jedoch meist viel zu komplex für umfangreiche Untersuchungen und eine zielgerichtete Synthese und Anwendung von weichen Robotersystemen. Ihre üblicherweise sehr hohe Anzahl an

Freiheitsgraden wird von uns systematisch reduziert, um Modelle zu erhalten, deren Rechenaufwand angemessen ist, während sie dennoch alle relevanten Aspekte des Gesamtsystems beschreiben. Aus dem reduzierten Modell werden kinematische und dynamische Modelle abgeleitet, die eine gute Grundlage für die frühe Entwicklungsphase liefern. Hauptergebnisse dieses Projekts sind ein Framework sowie die nötigen experimentell validierten Methoden und Werkzeuge, um generische Modelle von weichen Robotersystemen zu erhalten, die beispielsweise für die Gesamtsystemsynthese, die Bewegungsplanung, das Steuerungsdesign und die modellbasierte Optimierung verwendet werden können. Damit werden die Grundlagen für die zukünftige Forschung und Entwicklung von neuartigen weichen Robotern in Medizin, Industrie und anderen Anwendungsbereichen geschaffen.

Ansprechpartner:

Rebecca Berthold, M. Sc.

+49(0)511/762-17851

berthold@ids.uni-hannover.de

## Cost-effective low-friction SEALS by Texturing During Moulding technology (TDM-SEALS/SoftSlide)

In einem Konsortium mit 9 Partnern aus 6 Ländern hat das IDS im EU Projekt TDM-SEALS an der Entwicklung eines Prozesses zur kostengünstigen Herstellung reibungsoptimierter Dichtungen gearbeitet. Im ebenfalls von der EU im Rahmen des "Fast Track to Innovation" Programms geförderten Nachfolgeprojekt SoftSlide arbeitet das IDS nun mit 4 Partnern daran, eine mit in TDM-SEALS entwickelten Methoden texturierte Dichtung kommerziell verfügbar zu machen.

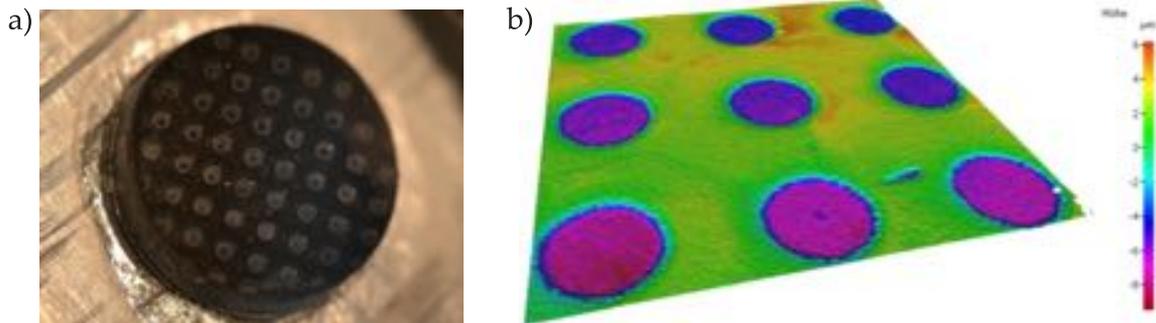


Abbildung 7: a) Tribometerprobe mit Textur b) Falschfarbenbild einer Oberflächentextur

Dichtungen verhindern Stoffübergänge an Systemgrenzen. Sie schützen z.B. empfindliche Systeme vor Verschmutzungen oder unterbinden das Auslaufen von Schmierölen. Häufig kann eine ausreichende Dichtwirkung nur mit berührenden Dichtungen erzielt werden. Besondere Anforderungen an die Dichtung stellen Systeme, bei denen eine Relativbewegung zwischen den abzudichtenden Bauteilen auftritt. In diesem Fall tritt zwischen Dichtung und Gegenauflfläche Reibung auf, welche zu unerwünschten Effekten wie Energieverlusten und Verschleiß führt. Daher wird bei dynamischen Dichtungen in der Regel eine möglichst geringe Reibung angestrebt. Reibung kann zum Beispiel durch Schmiermittel, optimierte Dichtungsgeometrien, optimierte Materialien und/oder geeignete Wahl der Bauteiloberflächen reduziert werden.

In der Vergangenheit wurden gute Ergebnisse mit Oberflächentexturen erzielt. Ausgeprägte Täler in der Dichtungsoberfläche können als Schmierstoffspeicher dienen und den direkten Kontakt zur Gegenauflfläche verringern. In der Regel wird die Oberfläche der Dichtungen nach dem formgebenden Verfahren in einem zusätzlichen Prozessschritt, z.B. über Laser, strukturiert. Dieses Vorgehen ist jedoch aufwendig und teuer, weshalb Oberflächentexturen bis jetzt nur wenige praktische Anwendungen haben. Ziel des Projekts TDM-SEALS war die Entwicklung eines Prozesses, bei dem die Oberfläche von Elastomer- oder Polymerdichtungen di-

rekt während des formgebenden Prozessschrittes strukturiert wird. Dafür wird die Vulkanisations- oder Spritzgussform mit einer Negativtextur versehen. Die Einsparung eines zusätzlichen Bearbeitungsschrittes führt zu geringen Kosten.

Das IDS hatte zwei Aufgaben im Projekt: zum Einen die Entwicklung einer geeigneten Oberflächentextur und zum Anderen die experimentelle Validierung der erzielten Verbesserungen. Die im ersten Schritt entwickelten Texturen, die in Simulationen unter Berücksichtigung von Adhäsions- und Hysteresereibung sowie viskoser Schmierfilmreibung niedrigere Reibwerte zeigten, wurden im zweiten Schritt an einem Pin-on-Disc Tribometer experimentell validiert. Die Reibungsreduktion konnte für texturierte Dichtungsprototypen am Dichtungsprüfstand des IDS bestätigt werden.

Ziele des Nachfolgeprojekts SoftSlide sind die industrielle Fertigung und der Vertrieb von texturierten Dichtungen zu wettbewerbsfähigen Preisen. Die Texturierung erfolgt direkt bei der Dichtungsherstellung durch die Verwendung einer laserbearbeiteten Spritzgussform.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Steffen Bothe

☎ +49(0)511/762-4132

✉ bothe@ids.uni-hannover.de

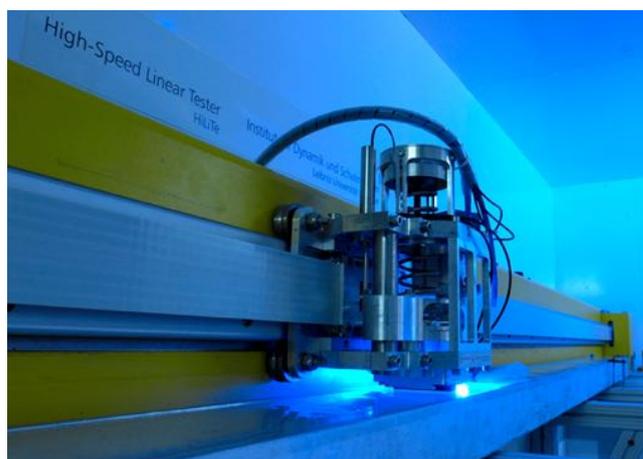
### 3.3 Forschungsgruppe Reibung und Tribologie



Dr.-Ing. Matthias Wangenheim  
(Gruppenleiter)

Markus Brase, M. Sc.  
Jonas Heidelberger, M. Sc.  
Dipl.-Ing. Michael Hindemith  
Mirco Jonkeren, M. Sc.  
Stephan Runge, M. Sc.

- Thermografie und Hochgeschwindigkeitsanalysen
- Einfluss von Oberflächenstrukturen im Dichtkontakt
- Optimierung von Ohrpassstücken eines Hörgerätesystems
- Reibungsoptimierung durch Oberflächenmodifikation an Wellen und Lagern
- Reib- und Verschleißdynamik von Reifenprofilklötzen auf Asphalt, Beton, Schnee und Eis
- Reifenabrolltrajektorien im Labor
- Reibungsoptimierung an Pneumatik- und Hydraulikdichtungen und rotatorischen Dichtungen
- Versuchsmethodikentwicklung für Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an dynamisch belasteten Bauteilen



## Reibung und Tribologie

Wir befassen uns am IDS seit etwa 20 Jahren mit dem dynamischen Reibkontakt technischer Bauteile, in der Regel direkt im industriellen Auftrag. Unser Schwerpunkt liegt insbesondere auf der Elastomerreibung, wie z.B. am Reifen oder an dynamischen Dichtungen. Ziel unserer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist die gezielte, anwendungsspezifische Optimierung der Reibverhältnisse, wofür wir verschiedene theoretische aber insbesondere auch experimentelle Methoden einsetzen.

Die beiden Produktschwerpunkte der Gruppe Reibung und Tribologie unterscheiden sich in Bezug auf die Reibung in ihrem Ziel: Mit Reifen möchte man möglichst große Reibwerte übertragen, während an dynamischen Dicht- und Lagerkontakten möglichst kleine Reibungsverluste angestrebt werden. Anders verhält es sich beim Verschleiß: Dieser ist in jedem Fall möglichst gering zu halten mit einer entsprechend möglichst langen Standzeit der Komponenten.

In diesem Spannungsfeld der Entwicklungsziele untersuchen wir insbesondere experimentell die dominierenden Reibungs- und Verschleißmechanismen, i.d.R. am Originalbauteil. Hierzu entwerfen wir spezialisierte Prüfstände und Prüfmethode, um möglichst nah an den realen Einsatzbedingungen die dynamischen Verhältnisse im Kontakt reproduzieren zu können. Als Beispiele können wir dort die Untersuchung bespikter Reifenprofilklötze auf Eisfahrbahnen nennen oder auch die Untersuchung des transienten Losbrechverhaltens von geschmierten Hydraulikdichtungen. Experimentelle und Simulationsmethoden helfen uns dabei, ein größeres Verständnis für die Vorgänge im Kontakt zu entwickeln und daraus Massnahmen abzuleiten, wie der Reibwert und auch der Verschleiß gezielt beeinflusst werden können.

Ein Schwerpunkt unserer Arbeit liegt dabei in der gezielten Gestaltung der Oberflächeneigenschaften in der Kontaktfläche z.B. durch Beschichtungen, Texturen oder Rauheiten. Weiterhin kann auch die Abstimmung und Optimierung der Eigenschaf-

ten der eingesetzten Werkstoffe erfolgen. Auf diese Weise kann der Reibwert gezielt in großen Bereichen variiert werden, während der Verschleiß in vielen Fällen ebenfalls positiv beeinflusst werden kann.

### Unsere Forschungsschwerpunkte:

- Mehrskalige Oberflächentexturierung am Gummibauteil (im Vulkanisationswerkzeug) zur Reibwertsenkung oder auch -erhöhung.
- Beschichtung zur Beeinflussung der viskosen Reibung.
- Transiente Untersuchungen an pneumatischen und hydraulischen, translatorischen und rotatorischen Dichtungen.
- Untersuchung der Reifenlaufstreifenreibung auf Schnee, Eis, Asphalt, Beton, Gravel - Indoor und Outdoor.
- Nicht zuletzt sind wir gefragte Sprecher auf Fach- und Anwendertagungen oder bei **Schulungen** und **Beratungen** direkt beim Kunden.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Matthias Wangenheim

☎ +49(0)511/762-4166

✉ wangenheim@ids.uni-hannover.de

## Friction Optimisation of Seals through advanced Laser Surface Texturing of Moulds (MouldTex)

Im Rahmen des „Factories of the Future“ Programms arbeitet das Institut für Dynamik und Schwingungen im EU-Projekt MouldTex an der Entwicklung mehrskaliger Oberflächentexturen, die zur Reibungsoptimierung dynamischer Dichtungen beitragen. Der Fokus des IDS liegt in diesem Projekt auf der experimentellen und modellbasierten Analyse der Reibkräfte im dynamischen Dichtkontakt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Texturen und Betriebsbedingungen.

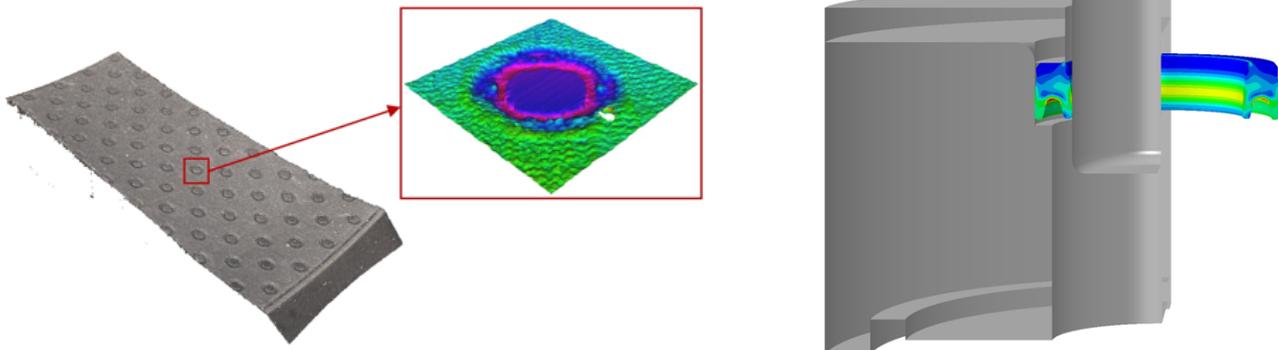


Abbildung 1: Dichtlippe einer Stangendichtung mit Detailaufnahme der Oberflächentextur (links) und FEM-Simulation einer Stangendichtung im eingebauten Zustand (rechts).

Dichtungen sind erforderlich, um ungewollte Stoffübergänge zwischen zwei Arbeitsräumen mit gemeinsamer Grenzfläche zu verhindern. So kann ein technisches System beispielsweise vor Verunreinigungen geschützt oder das Austreten von Schmier- und Betriebsstoffen verhindert werden. Insbesondere bei dynamischen Dichtungen, die durch eine Relativbewegung zwischen Dichtung und abzudichtendem Bauteil charakterisiert sind, ist die Verringerung des Reibungsniveaus ein wichtiges Entwicklungsziel, um den Wirkungsgrad des Systems zu steigern. Die Reibung kann durch den Einsatz von Schmiermitteln, optimierten Dichtungsgeometrien beziehungsweise Materialien, aber auch durch die geeignete Wahl von mehrskaligen Oberflächentexturen gesenkt werden.

Im EU-Projekt MouldTex werden die mehrskaligen Oberflächentexturen in Form von makroskopischen Vertiefungen und mikroskopischen Rauheiten auf die Dichtungsoberfläche appliziert (siehe Abbildung 1 links). Die Herstellung der Dichtungen erfolgt mittels einer innovativen, für die Massenfertigung geeigneten Produktionsmethode, bei der die Oberflächentextur direkt während des Vulkanisationsprozesses von der lasertexturierten Form auf die Dichtung übertragen wird. Das IDS unter-

sucht während des Projektes sowohl die Reibkräfte translatorischer als auch rotatorischer Dichtungen und bestimmt das Reibungsreduktionspotential unterschiedlicher Oberflächen. Zum Verständnis der wirkenden Reibmechanismen und zur Vorhersage der Reibkräfte wird außerdem ein Mischreibungsmodell entwickelt, das Trocken- und Fluidreibeffekte in Abhängigkeit unterschiedlicher Betriebsbedingungen und Oberflächentexturen berücksichtigt (siehe Abbildung 1 rechts). Die Mechanismen, die zur Reibungsreduktion der mehrskaligen Oberflächentexturen beitragen, sind unter anderem die Verringerung der realen Kontaktfläche, die Verbesserung des hydrodynamischen Druckaufbaus zwischen Dichtung und Gegenlauffläche sowie die Eigenschaft der Textur den Schmierstoff zu speichern und die Abriebpartikel einzufangen. Das Ziel des Projektes ist die experimentelle und modellbasierte Identifizierung optimaler Texturen, welche die Reibung um mindestens 20% reduzieren.

Ansprechpartner:

Markus Brase, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-4527

✉ brase@ids.uni-hannover.de

## Pattern Mechanics in Lab 2

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, mit Hilfe neuer Testmethoden die Einflussfaktoren beim Kontakt zwischen PKW-Reifen und einer schneebedeckten Fahrbahn detailliert zu beschreiben. Hierzu werden der Hochgeschwindigkeitsprüfstand (HiLiTe), sowie ein zweiter Prüfstand verwendet, mit dem in speziell konzipierten Versuchen verschiedene Hypothesen zur Kraftübertragung zwischen Reifen-Profilklotz und Untergrund gezielt untersucht werden können.

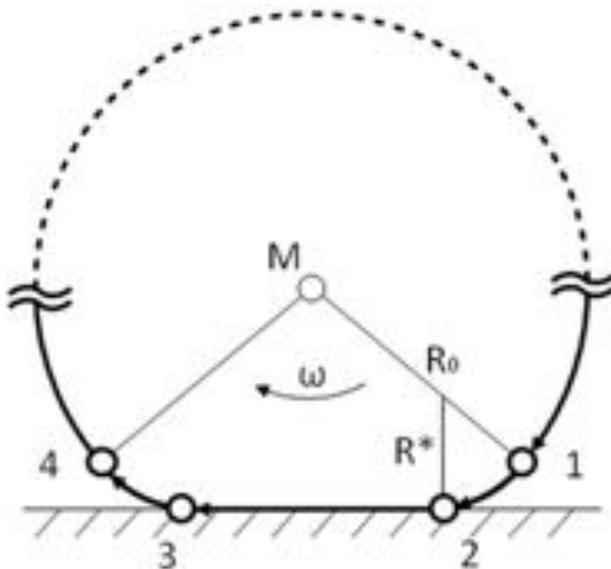


Abbildung 2: Reifen im Fahrbahnkontakt / Abrolltrajektorie (1 bis 4)

Für die Optimierung von Winterreifen im Bezug auf die übertragbaren Kräfte ist ein tiefgehendes Verständnis der auftretenden Effekte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt unerlässlich. Versuche zu diesem Thema können am IDS mit dem Hochgeschwindigkeitslinearprüfstand (HiLiTe) durchgeführt werden. Der HiLiTe erlaubt das Testen eines einzelnen Reifenprofilklotzes auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen, wie Asphalt, Eis und Schnee. Durch seinen Aufbau ist er auf einen konstanten Schlupf zwischen Gummiprobe und Fahrbahn von 100% sowie eine lineare Bewegung begrenzt, die Gleitwege betragen bis zu vier Meter. Versuche können durch Anpassen der Normalkraft und der Reibgeschwindigkeit variiert werden.

Um eine realitätsnähere Nachbildung der Kontaktvorgänge zu erreichen wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dem die Abrollbewegung eines Profilklot-

zes an einem PKW-Reifen für eine einzelne Laborprobe (Abbildung 2) nachgebildet wird, um eine verbesserte Testmethode für Profilklötze auf Schnee zu entwickeln. Das Ziel ist eine direkte Vorhersage der zu erwartenden Reifenperformance.

Die Gleitwege, Gleitgeschwindigkeiten und Lasten richten sich nach den Vorgaben des realen Reifen-Fahrbahn-Kontaktes, um die Versuche mit möglichst realitätsnahen Parametern durchführen zu können. Dazu wird der kinematische Durchlauf eines einzelnen Reifenprofilklotzes auf einer Oberfläche nachgebildet. Dieser durchläuft die Einlaufphase in den Kontakt (1-2), das Durchlaufen der Kontaktzone mit Übergang von Haft- zu Gleitphase (2-3) und das Auslaufen aus dem Kontakt (3-4). Durch die reproduzierbare Abrollbewegung im Labor können die einzelnen Mechanismen, die zu einer Kraftübertragung zwischen Reifen und Untergrund führen genauer untersucht werden. Hierzu gehören neben der Reibung zwischen Profilklotz und Schneeoberfläche auch das Eindringen der Profilklötze in den Schnee (Fräsen).

Um die Vergleichbarkeit zu Outdoor-Versuchen und eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wurde die bestehende Methode der Schneeherstellung so erweitert, dass Schnee mit definiert einstellbaren und exakt reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden kann. Durch eine geeignete Präparation weist der künstlich hergestellte Schnee dieselben Merkmale auf wie natürlicher Schnee.

Ansprechpartner:

Jonas Heidelberg, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-3732

✉ heidelberg@ids.uni-hannover.de

## Improving the performance of silicone earpieces by finite-element-analysis

Der häufig leider nur unzureichende Tragekomfort von Hörsystemen ist einer von drei Hauptgründen, weshalb eine Vielzahl von Patienten mit einem Hörverlust die angepassten Hörgeräte im Alltag nicht tragen. Im Rahmen dieses Projektes werden die Einflüsse auf den Tragekomfort von Hörgeräten evaluiert und darauf aufbauend der Tragekomfort unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode optimiert. Aufgrund interindividuell stark ausgeprägter anatomischer Unterschiede liegt ein Schwerpunkt auf der Digitalisierung von Gehörgängen.

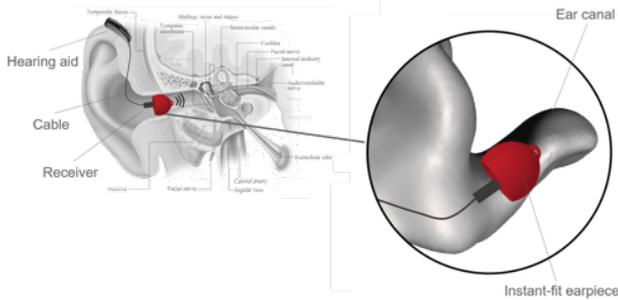


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Ohrs mit einem angepassten Hörgerät - [Hearing loss - outer, inner & middle ear, Roth, ergänzend bearbeitet, 2016].

Weltweit leiden mehr als 360 Millionen Menschen unter einem Hörverlust. Ein Großteil der Patienten kann mit konventionellen Hörgeräten versorgt werden. Von den Herstellern werden hierfür verschiedenste Lösungen angeboten. Bei vielen Systemen wird der Lautsprecher mit Hilfe eines weichen Silikonohrpassstückes im Gehörgang gelagert. Diese Silikonohrpassstücke werden oft als unangenehm empfunden und dichten teils nicht vollständig nach außen hin ab. Die unbequeme Wahrnehmung kommt zum Teil daher, dass das Ohrpassstück je nach Grad der Stauchung mit einer relativ hohen Kraft gegen den Gehörgang drückt. In einem Extremfall wirft das Ohrpassstück Falten, was zu einem Abfall der akustischen Dichtung und zu punktuellen Druckstellen führen kann.

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes ist es, ein besseres Verständnis für die biomechanischen Wechselwirkungen zwischen Silikonohrpassstück und einem anatomisch geformten Gehörgang zu entwickeln. Bis zum heutigen Zeitpunkt ist generell nur sehr wenig über die Einflüsse konstruktiver Parameter auf den Tragekomfort von Hörgeräten bekannt. Mit Hilfe verschiedener Methoden soll ein größerer Überblick über den Tragekomfort entste-

hen und zugleich auch Optimierungen an bestehenden Ohrpassstücken vorgenommen werden. Zum Beispiel wird mit Unterstützung der Finite-Elemente-Analyse ein parametrisiertes Design entwickelt, womit die bekannten Schwächen eliminiert werden können. Zugleich lassen sich modifizierte Designvorschläge innerhalb von realen Gehörgangsgeometrien validieren, sodass Vergleiche zwischen bestehenden und neuen Geometrien durchgeführt werden können.

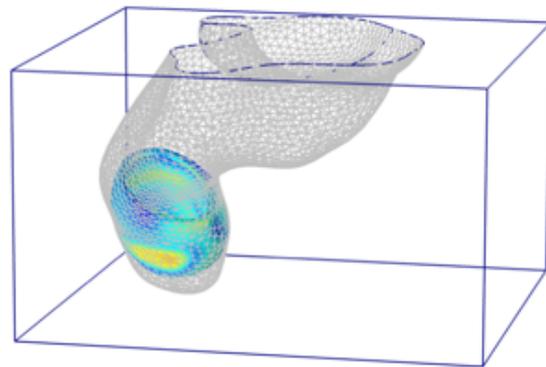


Abbildung 4: Negativabdruck eines gescannten Ohrs mit einem platzierten Silikonohrpassstück - FEM Modell.

Für die Analyse und Beurteilung der weichen dünnwandigen Bauteile im Gehörgang setzen wir die FEM ein. Die von uns durchgeführten Machbarkeitsstudien haben gezeigt, dass Schwachstellen der Systeme schnell sichtbar gemacht und anschließend behoben werden können, wodurch kostenintensive experimentelle Studien minimiert werden.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Matthias Wangenheim

+49(0)511/762-4166

wangenheim@ids.uni-hannover.de

## Innovation Ecosystem to Accelerate the Industrial Uptake of Advanced Surface Nano-Technologies (NewSkin)

Im Rahmen des EU-Projektes „NewSkin“ arbeitet das IDS an der Entstehung eines Open Innovation Test Beds (OITB) zur Beschleunigung der industriellen Anwendung von nanotechnologisch modifizierter Oberflächen. Dieses OITB soll die notwendigen Technologien, Ressourcen und Dienstleistungen bereitstellen, um die industrielle Herstellung von Gütern mit nanomodifizierten Oberflächen effizient und kosteneffektiv zu ermöglichen.

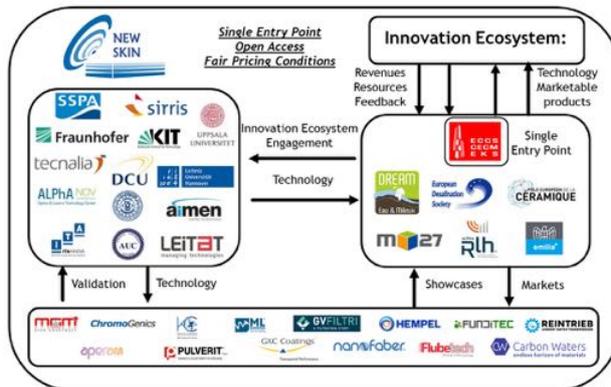


Abbildung 5: Struktur des Open Innovation Test Beds, das im Rahmen des Projektes „NewSkin“ errichtet werden soll.

Nanotechnologisch modifizierte Oberflächen besitzen ein enormes Potential in vielen Bereichen (u.a. Transport, Erneuerbare Energien, Medizintechnik, Stahlbaukonstruktion). Dennoch bestehen derzeit noch große Barrieren auf dem Weg zur kommerziellen Nutzung der Technologien in industriellen Anwendungen. Aus diesem Grund verfolgt das EU-Projekt „NewSkin“ das Ziel der Erschaffung eines Open Innovation Test Beds (OITB). Dieses soll die notwendige Forschungsinfrastruktur (Innovation Ecosystem) bereitstellen, um die industrielle Aufnahme dieser Technologien zu beschleunigen. Erforderliche Prozesse hierfür sind

- die Definition des Designs der modifizierten Oberflächenstrukturen,
- die Optimierung von Pilotanlagen zur Prototypenherstellung und der Definition industrieller Prozesse,
- die Entwicklung von Testanlagen zur Bewertung der neuen Oberflächeneigenschaften unter realen Einsatzbedingungen,
- die Bereitstellung kommerzieller Dienstleistungen.

Alle diese Kompetenzen sollen im Rahmen des Projektes durch die Zusammenarbeit europäischer Forschungseinrichtungen und Unternehmen in einem Innovation Ecosystem zusammengeführt werden (siehe Abbildung 5). Das IDS beschäftigt sich dabei im Rahmen des Projektes sowohl mit dem Oberflächendesign als auch mit der Errichtung notwendiger Testanlagen und Prüfstände. Der Fokus des IDS liegt dabei auf dem tribologischen Kontakt zwischen Oberflächen technischer Komponenten in Relativbewegung. Die zu errichtenden Prüfstände dienen der Bewertung modifizierter Oberflächen und der Quantifizierung der Auswirkungen auf die Energieeffizienz sowie das Verschleißverhalten technischer Komponenten. Untersucht werden sollen dabei transiente Bewegungs- und Lastprofile sowohl in translatorischen als auch in rotatorischen Anwendungen. Zudem sollen Prüfkapazitäten erschaffen werden, die das parallele Durchführen von Lebensdauerversuchen an bis zu fünf Komponenten ermöglichen. Die Demonstration der neuartigen Oberflächenmodifikationen erfolgt zunächst anhand verschiedener Beispielkomponenten. Dazu werden Dichtungen, Zahnräder, Lager, Wellen, Radialwellendichtringe, aber auch Turbinenschaufeln und Gesamtsysteme, wie z.B. Kompressoren betrachtet. Anschließend erfolgt die Öffnung des Innovation Ecosystems für die Wirtschaft, um die Technologie der Oberflächenmodifizierung auf eine große Zahl von Industrie- sowie Konsumgütern zu übertragen.

Nach Abschluss des Projektes soll das OITB als eigenständige Organisation fortbestehen, um die geschaffene Forschungsinfrastruktur der Wirtschaft weiterhin zur Verfügung zu stellen.

Ansprechpartner:

Mirco Jonkeren, M. Sc. & Markus Brase, M. Sc.

+49(0)511/762-4593

jonkeren@ids.uni-hannover.de

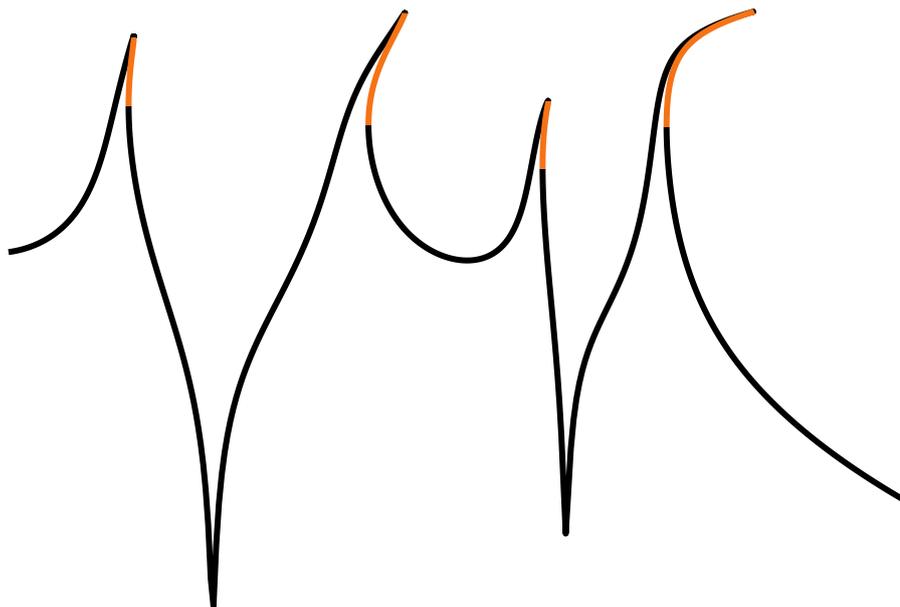
## 3.4 Forschungsgruppe Nichtlineare Strukturtechnik



Dr.-Ing. Sebastian Tatzko  
(Gruppenleiter)

Hannes Fischer, M. Sc.  
Martin Jahn, M. Sc.  
Thomas Kasper, M. Sc.  
Gleb Kleyman, M. Sc.

- Numerische und experimentelle Bestimmung nichtlinearer Schwingungsantworten
- Numerische und experimentelle nichtlineare Modalanalyse
- Systemidentifikation, Modellierung und Modellordnungsreduktion
- Nichtlineare Federn und Dämpfer
- Reibungsdämpfung und Stoßkontakt
- Nichtlineare Tilger
- Geometrisch nichtlineares Verhalten durch große Verformungen
- Nichtlineares Materialverhalten



## Nichtlineare Strukturtechnik

Nichtlineare Strukturtechnik umfasst technische Schwingungsprobleme, die mit linearen Methoden nicht behandelt werden können. In schwingungstechnisch relevanten Anwendungen lassen sich nichtlineare Kräfteinwirkungen auf Strukturen, zum Beispiel durch Reibung oder von der Last abhängige Lagerkennlinien, kaum vermeiden. Möchte man die nichtlinearen Einflüsse in der Auslegung berücksichtigen sind spezielle Modellierungsansätze und numerische Lösungsverfahren erforderlich.

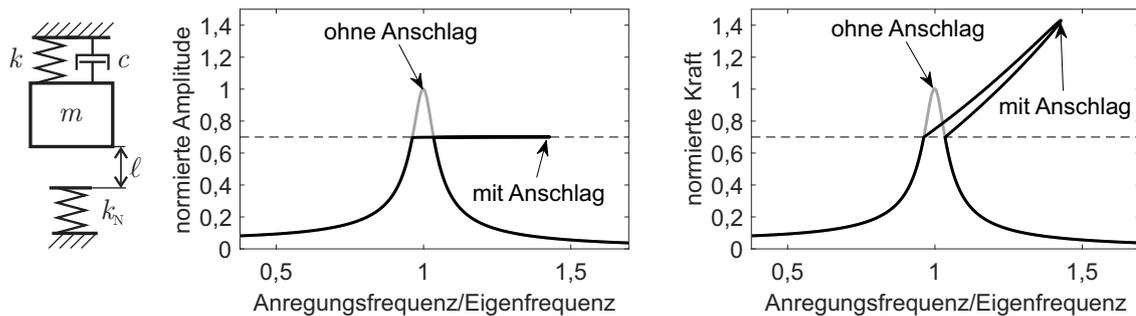


Abbildung 1: Schwingungsantwort eines nichtlinearen Schwingers mit Stoßkontakt

Die Schwingungsanalyse dient in der Regel der Auslegung von Maschinen und Bauteilen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs. Werden kleine Schwingungen vorausgesetzt, verhalten sich viele Systeme in guter Näherung linear. Bekannte mathematische Verfahren können dann effizient im Designprozess eingesetzt werden.

Der Ausdruck *kleine Schwingungen* deutet bereits an, dass Schwingungen im Allgemeinen nicht linear sind, wenn Schwingungsamplituden nur groß genug werden. Bei vielen Anwendungen sind daher die linearen Ansätze nicht geeignet, um eine Vorhersage der Schwingungsantwort zu bestimmen, zum Beispiel bei Leichtbaustrukturen oder in mikromechanischen Systemen. Nichtlineare Schwingungen treten allerdings oft gerade dann auf, wenn man diese vermeiden möchte. Strukturen, die zur Sicherheit beispielsweise mit Gummipuffern in ihrer Auslenkung begrenzt werden, zeigen nichtlineares Verhalten wenn es zum Anschlagen an den Gummipuffer kommt. In Abbildung 1 ist die Schwingungsantwort des dargestellten Systems mit steifem Anschlag gezeigt. Die maximal auftretende Amplitude der Auslenkung wird im Bereich der Resonanz erfolgreich begrenzt, die Maßnahme führt jedoch zu einem *Abknicken* des Amplitudengangs oberhalb der Resonanz und damit zu einem Frequenzbereich mit mehreren möglichen Schwingungszuständen. Rechts in Abbildung 1 sind die auf die Masse wirkenden Kräfte dargestellt, die wie erwartet bei Kon-

takt mit dem Anschlag stark ansteigen.

Ist man in der Lage die nichtlinearen Kräfte mathematisch zu beschreiben führt die Modellbildung auf neue Herausforderungen. Ein nichtlineares System antwortet bei harmonischer Anregung nicht mehr nur mit der Frequenz der Anregung, sondern enthält weitere harmonische Anteile. Für eine Anregungsfrequenz können mehrere Lösungen existieren, so dass ein System bei der selben Anregung mit unterschiedlichen Schwingungsamplituden antworten kann. Von diesen möglichen Schwingungsantworten sind nicht alle stabil, was im Unterschied zum Linearen eine Stabilitätsanalyse erfordert.

Für die Teilaufgaben *Identifikation*, *Modellbildung*, *Numerische Berechnung* und *Experimentelle Validierung* erarbeiten wir am IDS Methoden und Lösungen, um nichtlineare Systeme besser beschreiben und verstehen zu können. Mit unseren numerischen und experimentellen Werkzeugen ist darüber hinaus auch der gezielte Einsatz von Nichtlinearitäten möglich. Kennlinien nichtlinearer Kräfte können in den Designprozess integriert und zur Beeinflussung der Schwingungsantwort genutzt werden.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Sebastian Tatzko

☎ +49(0)511/762-4115

✉ tatzko@ids.uni-hannover.de

## Wellenausbreitung in Strukturen mit linearer und nichtlinearer lokaler Dämpfung

Bei der dynamischen Auslegung von Bauteilen gilt es schwingungskritische Zustände (Resonanzüberhöhung) zu vermeiden und dadurch eine höhere Lebensdauer zu realisieren. Auf Grundlage der modalen Daten lassen sich numerische Modelle und FE-Modelle ableiten, wobei häufig die Proportionaldämpfung vereinfachend angenommen wird. Diese Näherung ist in Fällen mit lokaler Dämpfungswirkung nicht geeignet. Durch lineare und nichtlineare lokale Dämpfer entstehen im System Wanderwellen, die entsprechend modelliert und analysiert werden müssen.

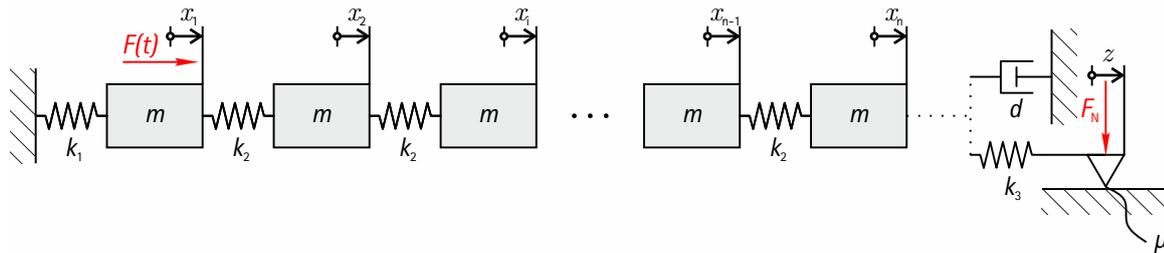


Abbildung 2: Schwingerkette mit  $n$  Freiheitsgraden und lokaler Dämpfung

Die in Abbildung 2 dargestellte Schwingerkette, bestehend aus Feder-Masse-Elementen, ist am rechten Ende lokal viskos (linear) bzw. durch Reibung gedämpft (nichtlinear). An der ersten Masse links wird eine harmonische Kraft eingeleitet. Zwischen dem Kraftangriffspunkt und dem als Energiesenke wirkenden Dämpfer bilden sich Wanderwellen aus, die je nach Wahl der Parameter unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

In Abbildung 3 ist jeweils der Wanderwellenanteil der Schwingungsantworten des linearen und des nichtlinearen Systems bei Variation der Anregungsfrequenz sowie des Dämpfungskoeffizienten  $d$  (linear) bzw. der Kraft  $F_N$  (nichtlinear) abgebildet. Für das nichtlineare System wurden die Schwingungsantworten mit der *Harmonischen Balance Methode* ermittelt. Zusätzlich sind links die Eigenfrequenzen aus einer komplexen Modalanalyse des gedämpften linearen Systems als rote Strichlinien eingezeichnet. Bei Wanderwellen mit geringem Wanderwellenanteil sind die Knoten der Schwingungen gut an festen Stellen lokalisiert. Im Umkehrschluss existieren bei hohem Wanderwellenanteil keine ortsfesten Schwingungsknoten. Besonders im niedrigeren Frequenzbereich ist erkennbar, dass eine Korrelation zwischen Änderung der Eigenfrequenz und Wanderwellenanteil besteht. Diese Auffälligkeit lässt sich über die gesamte Parameterkarte beobachten. Die grundlegende Verteilung im nichtlinearen Fall ist ähnlich zum linear gedämpften. Das reibungsgedämpfte System weist jedoch markante Gebiete mit vergleichsweise niedrigen Wanderwellenanteil auf.

teilen auf.

Für weiterführende Untersuchungen werden jüngste Methoden zur nichtlinearen (komplexen) Modalanalyse, wie das *Damped Motion Concept* oder das in Hannover entwickelte *Extended Periodic Motion Concept* implementiert, angepasst und ausgewertet.

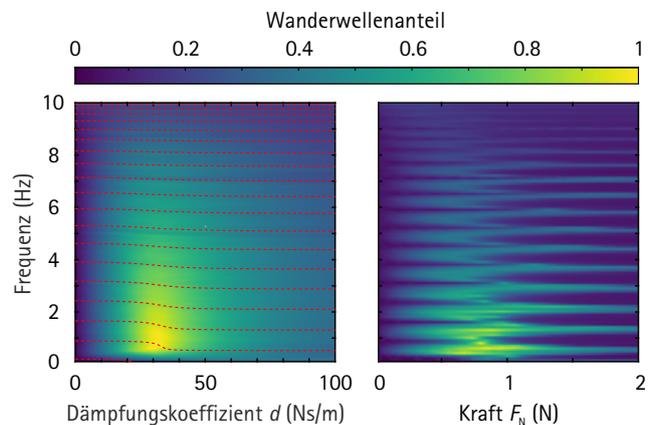


Abbildung 3: Wanderwellenanteil bei unterschiedlichen Parametern des viskos gedämpften Systems (links) und des reibungsgedämpften Systems (rechts).

Ansprechpartner:

Hannes Fischer, M. Sc.

+49(0)511/762-17493

fischer@ids.uni-hannover.de

## Reglerbasierte Identifikationsverfahren für nichtlineare Systeme

Das Ziel des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1897 „Calm, Smooth and Smart“ ist die grundlegende Erforschung von Dissipationsmechanismen, um diese gezielt in den Produktentwicklungsprozess einzubringen. Innerhalb der zweiten Phase des Schwerpunktprogramms werden von uns Verfahren für die experimentelle Identifikation der dynamischen Parameter im Gesamtsystem untersucht und entwickelt.

Moderne Leichtbaukonstruktionen können sehr schwingungsanfällig sein. Um die Schwingungsamplituden zu reduzieren, werden gezielt nichtlineare Dämpfungselemente eingebracht, z.B. in Form von Reibkontakten. Darüber hinaus gibt es Ansätze, bei denen nichtlineare Federelemente und Kraft-Verformungs-Charakteristika die Schwingungsamplituden reduzieren. Diese Konzepte führen zu einer komplizierten, nichtlinearen Dynamik, die besser verstanden und experimentell validiert werden muss, um in naher Zukunft eine robuste und zuverlässige Auslegung von Leichtbaustrukturen zu gewährleisten.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal linearer und nichtlinearer Strukturen ist die Eindeutigkeit der Lösung, wie Abbildung 4 verdeutlicht.

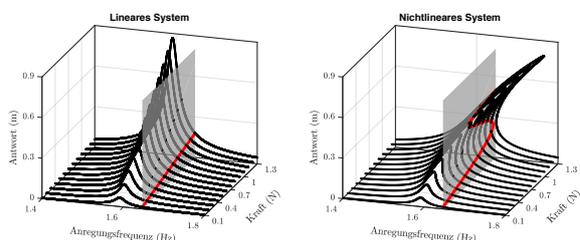


Abbildung 4: Frequenzgänge eines Systems mit linearer und nichtlinearer Steifigkeit.

Ein nichtlineares System kann auf eine bestimmte monofrequente harmonische Kraft-Anregung mit unterschiedlichen Schwingungsamplituden antworten. Der Übergang zwischen diesen Systemantworten erscheint zufällig und lässt sich kaum steuern. Für die korrekte Identifikation solcher Systeme sind daher stabilisierende Regelkreisstrukturen, wie in Abbildung 5, notwendig. Dabei wird nicht wie im linearen Fall üblich die Anregungskraft vorgegeben, sondern die Systemantwort. Das Referenzsignal (die Erregerkraft) wird dabei durch einen speziellen Algorithmus iterativ angepasst, bis sich die gewünschte Systemantwort einstellt. Aus den Messdaten werden im Postprocessing die Frequenzgänge gewonnen. Dieses Verfahren bezeichnet

man als reglerbasierte Pfadverfolgung. In Abbildung 6 sind die so identifizierten Frequenzgänge zweier Systeme dargestellt.



Abbildung 5: Regelkreis zur Stabilisierung instabiler Gleichgewichtslagen.

Eine alternative Methode zu diesem Konzept ist die klassische Phasenregelschleife. Analog zu Abbildung 5 wird hierbei jedoch nicht die Systemantwort selbst, sondern ihre Phasenlage zur Anregungskraft geregelt. Auch damit lassen sich nichtlineare Systeme stabilisieren und deren Frequenzgänge bestimmen.

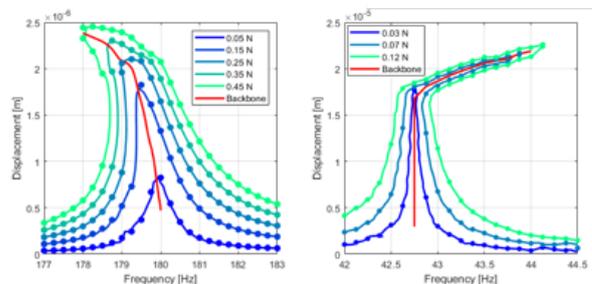


Abbildung 6: Experimentell identifizierte Frequenzgänge eines Systems mit Reibung (li.) und Stoßkontakt (re.).

Als nächstes werden Konzepte entwickelt, um die bisher verwendeten Methoden auf größere Strukturen mit vielen Anregungspunkten zu erweitern. Zudem wird der Fokus darauf gelegt nichtlineare modale Parameter zu identifizieren, welche direkt mit numerischen Verfahren für nichtlineares Modelupdating verwendet werden können.

Ansprechpartner:

Gleb Kleyman, M. Sc.

+49(0)511/762-17493

kleyman@ids.uni-hannover.de

## Untersuchung von Reluktanzkraftdämpfung

Im Rahmen des Projektes werden Systeme zur berührungslosen Schwingungsdämpfung untersucht, deren Kraftwirkung auf Maxwell'schen Grenzflächenkräften basiert, die auch als Reluktanzkraft bezeichnet werden. Die Dämpfungswirkung der Systeme wird in Abhängigkeit verschiedener Auslegungs- und Schwingungsparameter analysiert. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen sowohl die Effizienz des Auslegungsprozesses, als auch die Effektivität der Schwingungsdämpfer selbst erhöhen.

Das betrachtete System besteht aus einem permanenten Hubmagneten, der ein bewegliches Joch anzieht. Das Joch ist Teil einer schwingenden Struktur, meist in Form eines magnetischen Leiters der mit der schwingenden Struktur verbunden ist. In einer mit dem magnetischen Fluss des Hubmagneten verketteten und mit einem Widerstand beschalteten Spule wird bei Änderung des Luftspalts eine elektrische Spannung induziert und Energie im Widerstand verbrannt. Ein entsprechendes System ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

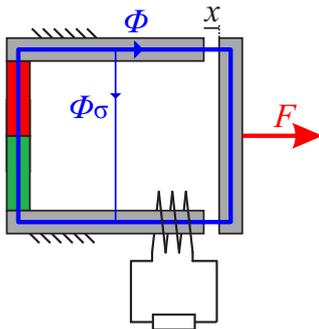


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Reluktanzkraftdämpfers

Die berührungslose Funktion des Reluktanzkraftdämpfers ermöglicht eine große Bandbreite von konstruktiven Lösungen. Insbesondere sind dabei Bewegungen orthogonal zur Richtung der Dämpfungswirkung möglich. Reluktanzkraftdämpfer werden daher beispielsweise an schnell drehenden Rotoren eingesetzt. Weitere Vorteile sind die Verschleißfreiheit und die weitgehende Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen. Die passive Beschaltung schränkt die maximal erreichbare Dämpfungsleistung gegenüber einer aktiven Regelung ein, jedoch wird aufgrund des Permanentmagneten keine externe Energieversorgung benötigt. Der Dämpfer kann auch bei Verwendung an schwer zugänglichen Orten durch Anpassung des externen Widerstands noch nachträglich auf veränderte Betriebsbedingungen abgestimmt werden. Der technisch nutzbare Frequenzbereich passt gut zu dem des menschlichen Gehörs, sodass sich die Anwendung

im Komfort-Bereich, im Kfz oder in der Umgebung stationärer Maschinen, anbietet.

Bei vorgegebener Schwingung des Jochs werden die mechanischen Eigenschaften der Dämpfer analysiert, wobei die Reluktanzkraft in Abhängigkeit verschiedener Parameter betrachtet wird. Zusätzlich wird der Einfluss auf schwingungsfähige Systeme untersucht und numerische Analysen durch entsprechende experimentelle Untersuchungen abgesichert. Abbildung 8 zeigt den physikalischen Aufbau eines Reluktanzkraftdämpfers im Labor.

Die elektro-mechanische Energiewandlung unter Ausnutzung der Reluktanzkraft wird durch nichtlineare Zusammenhänge beschrieben und erfordert für die numerische Analyse fortgeschrittene Verfahren. Periodische Lösungen nichtlinearer Differentialgleichungen werden mit der Harmonischen Balance ermittelt. Um die Effizienz der Auslegung zu verbessern werden neben den numerischen Methoden Linearisierungsverfahren weiterentwickelt, mit denen analytische Lösungen für die zugrundeliegenden nichtlinearen Gleichungssysteme als Näherung zugänglich werden. Das Systemverhalten lässt sich damit in direkter Abhängigkeit der entsprechenden Parameter beschreiben.

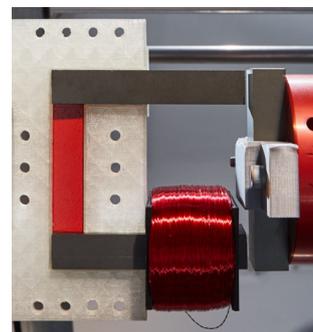


Abbildung 8: Physikalischer Aufbau des Systems

Ansprechpartner:

Martin Jahn, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-3870

✉ jahn@ids.uni-hannover.de

## Self-Sensing mit piezoelektrischen Biegewandlern

Es gibt viele Anwendungen bei denen ein Aktor gegen eine unbekannte Last arbeiten und dabei trotzdem eine vorgegebene Auslenkung stellen muss. Um das realisieren zu können, werden normalerweise zusätzliche Sensoren, die den zurückgelegten Weg des belasteten Aktors messen, eingesetzt. Oft ist es jedoch aus konstruktiven Gründen nicht möglich oder nicht wirtschaftlich zusätzliche Sensoren einzusetzen; hier kann Self-Sensing helfen.

Unter Self-Sensing versteht man die simultane Nutzung eines aktiven Materials als Aktor und Sensor. Aufgrund ihres hervorragenden bidirektionalen Übertragungsverhaltens eignen sich vor allem piezoelektrische Materialien hierfür. Self-Sensing mit piezoelektrischen Wandlern ist besonders geeignet für Systeme mit hoher Aktordichte oder begrenztem Bauraum, bei denen die Aktoren definierte Auslenkungen stellen müssen. Beispiele hierfür sind biomimetische Systeme, mikrochirurgische Werkzeuge oder taktile Displays.

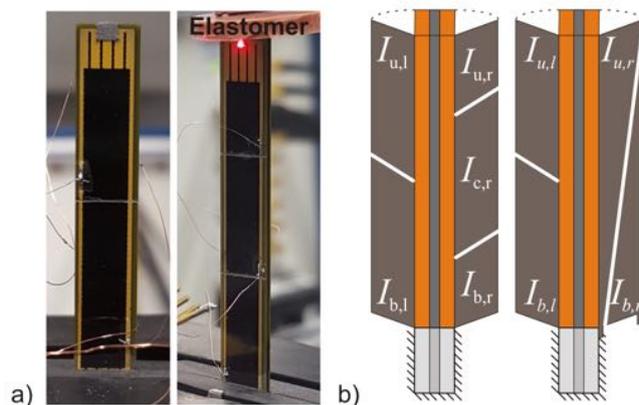


Abbildung 9: a) Piezoelektrischer Biegewandler mit segmentierten Elektroden, mit und ohne Last an der Spitze; b) Mögliche Segmentierungen: einseitige Variation der Segmente und asymmetrische Segmentierung

Die häufigsten Self-Sensing-Ansätze für piezoelektrische Systeme basieren auf der Analyse der elektrischen Eingangsspannung und des Eingangsstroms. In diesem Fall werden relevante Zustandsgrößen wie z.B. die Aktorauslenkung aus den elektrischen Betriebsgrößen in externen Schaltkreisen ermittelt. Am IDS wurde ein neuartiges Self-Sensing-Konzept für piezoelektrische Biege wandler entwickelt. Dieses Konzept ermöglicht die Bestimmung aller Zustandsgrößen eines Biegeaktors, der gegen eine unbekannte mechanische Last arbeitet.

Dabei werden die Elektroden des Aktors segmentiert, um Informationen über die Ladungsverteilung im piezoelektrischen Material zu erhalten und daraus modellbasiert z. B. auf die momentan vorliegende Schwingungsform des belasteten Biege wandlers schließen zu können. Erforderlich sind mindestens zwei Segmente, um die unbekannt mechanischen Größen berechnen zu können. Eine weitere Erhöhung der Segmentanzahl verringert den Modellierungsaufwand, erhöht aber gleichzeitig den Aufwand für die Messung der elektrischen Klemmgrößen. Unterschiedliche Elektrodengeometrien zur Vereinfachung der Kontaktierung und zur Optimierung des Self-Sensing-Ergebnisses sind ebenfalls realisierbar.

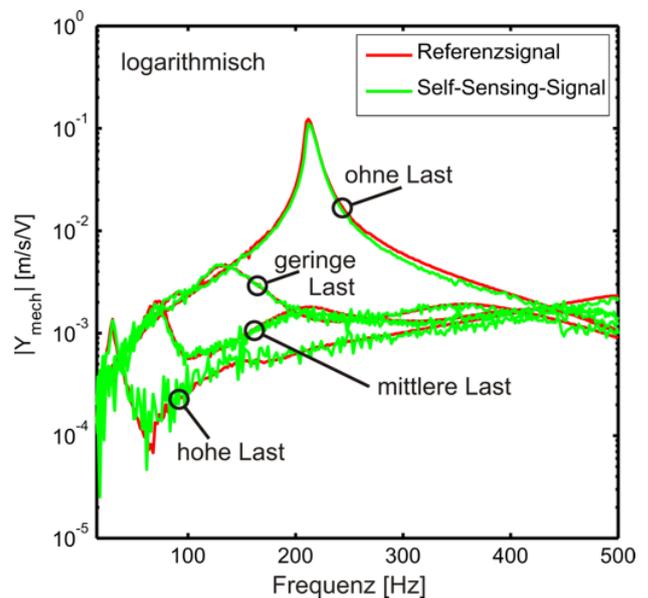


Abbildung 10: Vergleich von Self-Sensing-Messungen mit LDV-Messungen an der Aktorspitze

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Sebastian Tatzko

+49(0)511/762-4115

tatzko@ids.uni-hannover.de

## Nichtlineare Dynamik von Strukturen mit Granulatdämpfung

Granulare Dämpfung lässt sich vielseitig zur Reduktion strukturdynamischer Schwingungen einsetzen. Hohlräume in einer Struktur werden teilweise mit Granulat gefüllt, sodass durch Reibung und Stöße Energie dissipiert werden kann. Hierzu führen wir am IDS experimentelle Untersuchungen durch. Aus den Beobachtungen werden vereinfachte Modelle zur Beschreibung der komplexen dynamischen Zusammenhänge abgeleitet.

Granulare Dämpfung oder auch Partikeldämpfung führt zu stark nichtlinearem dynamischen Verhalten. Der einfache und kostengünstige Aufbau macht dieses Prinzip hochinteressant für den Einsatz zur breitbandigen Dämpfung schwingungsanfälliger Strukturen. Jedoch liegt dabei ein kompliziertes dynamisches Verhalten vor, das die zielgerichtete Optimierung erschwert. Moderne Verfahren in der additiven Fertigung eröffnen neue Möglichkeiten Hohlräume in nahezu beliebiger Form in einer Struktur zu platzieren, die mit Partikeln befüllt werden können. So bieten vor allem schwingungsanfällige und schwach gedämpfte Leichtbaustrukturen, die häufig Kammern und Hohlräume aufweisen, ideale Voraussetzungen für Granulatdämpfung.

In Abbildung 12 ist ein Laborversuch zu sehen, mit dem das Wirkprinzip sowie das damit verbundene nichtlineare Schwingungsverhalten untersucht werden. Ein Stahlrohr wird mit einer geringen Menge Sand befüllt und durch einen Stoß in Schwingungen versetzt. Abbildung 11 veranschaulicht die starke Dämpfungswirkung trotz der geringen Füllmenge anhand der berechneten Spektrogramme. Mit der geringen Menge Sand ist die Schwingung nach kurzer Zeit stark abgeklungen, was im Labor auch deutlich hörbar ist. Außerdem fällt eine Verschiebung zu tieferen Frequenzen auf.

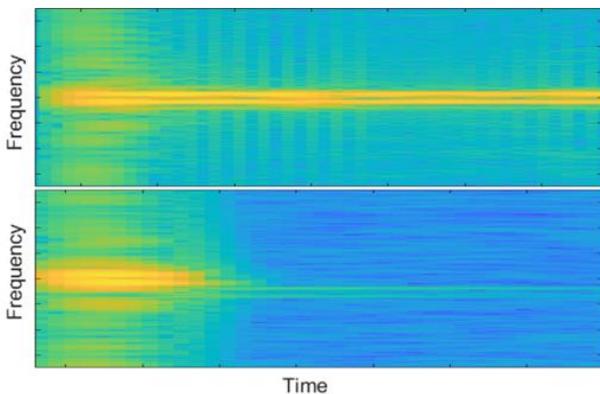


Abbildung 11: Kurzzeit-Fouriertransformation der Ausschwingversuche. Oben: ohne Sand; Unten: geringe Menge Sand.



Abbildung 12: Experiment zur granularen Dämpfung im Labor: An Gitarrensaiten aufgehängtes Rohr mit geringer Menge Sand befüllt.

Die Modellierung von Granulat- oder Partikeldämpfern kann anhand von Partikelsimulationen erfolgen. Jedoch wird der Rechenaufwand durch die Abbildung jedes Kornes und damit einhergehende Kontaktbedingungen sowohl mit der Struktur, als auch unter den Partikeln, enorm. Alternativ versuchen wir die beobachteten Phänomene mit niedrigdimensionalen mechanischen Modellen nachzubilden. Mit dem in Abbildung 13 gezeigten Modell ist es gelungen den prinzipiellen Schwingungsverlauf nachzuvollziehen. Sowohl die Dämpfungswirkung, als auch die Frequenzänderung werden durch das Modell gut abgebildet.

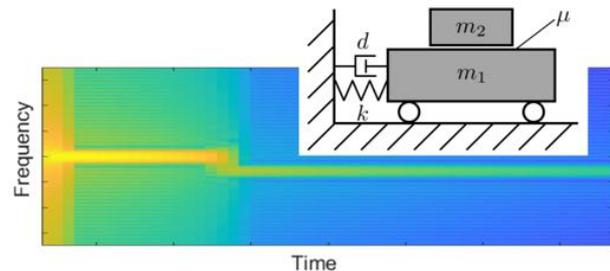


Abbildung 13: Simulation der Granulatdämpfung mit mechanischem Ersatzmodell

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Sebastian Tatzko

+49(0)511/762-4115

tatzko@ids.uni-hannover.de

## 3.5 Forschungsgruppe Piezo- und Ultraschalltechnologie



Dr.-Ing. Jens Twiefel  
(Gruppenleiter)

Dipl.-Ing. Gabriel Ertz  
Dr.-Ing. Yangyang Long  
Christian Nowroth, M. Sc.  
Dipl.-Ing. Ilja Pletner  
Andreas Schmelt, M. Eng.  
Yongyong Zhu, M. Sc.

- Systemmodellierung, Auslegung und Regelung von Systemen für Leistungsultraschall
- Experimentelle Charakterisierung von Schwingsystemen und Prozessen
- Piezosysteme
- Ultraschallverbindungstechnik, Drahtbonden, Reibschweißen und Sintern
- Ultraschallprozesstechnik und Kavitationsregelung
- Ultraschallelevation, -transport und -antriebe



## Piezo- und Ultraschalltechnik

In vielen modernen Systemen werden elektromechanische Wandler für vielfältige Anwendungen benötigt. Sie dienen als Steller für Positionieraufgaben, als Sensor zur Kraft- oder Dehnungsmessung, als Generator in autarken Systemen oder als Schwingungserzeuger in Ultraschalltransducern. Piezoelektrische Wandler werden in vielfältigen Anwendungen, u.a. dem Ultraschallschweißen oder der Ultraschallprozesstechnik eingesetzt.

Die Ultraschalltechnik ist aus dem Alltag heute nicht mehr wegzudenken. Sie wird für vielfältige Aufgaben genutzt, beispielsweise in der Verpackungsindustrie zum Verschweißen von Kunststoffverpackungen oder in der Automobilindustrie zum Fügen von Plastikteilen. Ein anderes Einsatzgebiet ist die Nutzung der hohen Schallenergie in Flüssigkeiten, am bekanntesten in der Ultraschallreinigung, aber auch für die Herstellung von Nanopartikeln oder die Verbesserung von Gießprozessen. Daneben ist Reibungsreduktion durch überlagerte Schwingungen (im Ultraschallbereich) eine aktuelle Technologie, die zurzeit für viele Anwendungen evaluiert wird.

Auch für spezielle Transport- und Antriebsaufgaben bieten sich Ultraschallsysteme an. So können die angeregten Schwingungsformen genutzt werden, um in piezoelektrischen Schwingungsmotoren die Bewegung zu erzeugen.

Eine neuartige berührungslose Lagertechnologie basiert auf dem physikalischen Effekt der Ultraschalllevitation. Dabei erzeugt die Ultraschallschwingung einen Überdruck im Spalt zwischen Transducer und Objekt. Daher schwebt das Objekt auf einem Luftfilm. Mit einer geeigneten Regelung lässt sich der Luftspalt sehr genau einstellen. Das Prinzip kann sowohl für translatorische als auch für rotatorische Lager genutzt werden.

Um in all diesen Prozessen die notwendigen Bewegungs- oder Druckamplituden bereitzustellen, werden die zur Anregung verwendeten piezoelektrischen Wandler in Ihrer Resonanzfrequenz betrieben, also in dem Betriebspunkt, in dem es möglich ist, das System auch mit vergleichsweise kleiner Anregung in starke Schwingungen zu versetzen. Bei passender Auslegung der Bauteile stellt die Resonanz als Betriebspunkt kein Problem dar. Dass es trotz Resonanz nicht zu unendlich großen Schwingungsamplituden kommt, liegt an der stets vorhandenen Dämpfung im System.

Da die Resonanzfrequenz kein fester Wert ist, sondern von verschiedenen Randbedingungen abhängt, muss im Allgemeinen der Betriebspunkt eingeregelt werden. Hierfür haben wir unterschiedliche Ansteuerungsstrategien entwickelt, die auf einer Fremderregung mit Phasenregler oder dem Prinzip der Autoresonanz basieren. Die im Betrieb auftretende Frequenzänderung (sowie die Admittanzänderung) ist eine Folge der Änderung von Systemeigenschaften bzw. von Nichtlinearitäten. Besitzt man eine ausreichende Systemkenntnis, können aus diesen Änderungen Rückschlüsse auf den Prozess bzw. auf die Eigenschaften der im Prozess genutzten Medien gezogen werden.

In den vergangenen Jahrzehnten wurde die Dynamik der schwingenden Struktur in der Regel meist ohne die Rück- bzw. Wechselwirkung mit dem Prozess betrachtet. Um die Systeme weiter optimieren zu können, erforschen wir am IDS diese Einflüsse und entwickeln mathematische Modelle zu ihrer Beschreibung. Eine wichtige Rolle spielen dabei wechselnde Kontaktvorgänge sowie der Einfluss nichtlinearer Systemeigenschaften. Um die erarbeiteten Methoden und Erkenntnisse nutzbar zu machen, werden diese in effektive Werkzeuge zur Systemauslegung, wie das am IDS entwickelte Programmsystem BekS, aber auch in kommerzieller Software, integriert.

Neben der Aktorik stellt die Energiewandlung ein weiteres Arbeitsgebiet dar, bei dem vor allem piezoelektrische Generatoren untersucht werden. Diese dienen als Energiequelle für autarke Anwendungen, wie beispielsweise drahtlose Sensoren.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

☎ +49(0)511/762-4167

✉ [twiefel@ids.uni-hannover.de](mailto:twiefel@ids.uni-hannover.de)

## Taktile Displays für Virtual-Reality-Anwendungen

Jeder Büro- oder Heimcomputer kann Grafik und Sound in einer Qualität darstellen, die kaum einer Verbesserung bedarf. Haptische Eindrücke hingegen beschränken sich in der Regel nur auf die Konturen von Tastatur und Maus. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes entwickelt das IDS in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikroproduktionstechnik und dem Welfenlab ein taktiles Display, das ein Erasten von unterschiedlichen virtuellen Oberflächenstrukturen wie Textilien, Leder, Holz und Kunststoff ermöglichen soll.

Die potenziellen Anwendungsgebiete für taktile Ausgabegeräte sind vielfältig. Neben der Unterhaltungsindustrie und dem E-Commerce bieten sich auch die virtuelle Prototypenentwicklung und das virtuelle Training als Anwendungsbereich an. Ein Einsatz als Feedbackgeber in der Medizintechnik, der Fahrzeug- und Maschinensteuerung sowie für die sensorische Unterstützung von Blinden ist ebenfalls vorstellbar.



Abbildung 1: Computermaus mit taktilem Display

Aus dem laufenden Projekt entstand bereits ein prototypisches taktiles Display, welches in eine Computermaus integriert wurde, siehe Abbildung 1. Dieses Display ermöglicht eine Aktivierung der Haut über Schereffekte. Die dabei von den Aktorelementen des Taktilem Displays erzeugten Schwingungen mit Amplituden im  $\mu\text{m}$ -Bereich sind - basierend auf einem physiologischen Modell des Tastsinns - so gewählt, dass an der Fingerkuppe eine Anregung entsteht, die den gewünschten Tast-Eindruck hervorruft. Es wurde auch eine entsprechende Software implementiert, bei der mit der Maus über verschiedene virtuelle Oberflächen gefahren werden kann. Das besondere daran ist, dass auch die Geschwindigkeitsinformationen mit in die Reizerzeugung einfließen und so eine realistischere Wahrnehmung generieren.

Nachdem die grundsätzliche Machbarkeit gezeigt

werden konnte, wird nun der menschliche Wahrnehmungsprozess intensiv untersucht, um die Eigenschaften der nächsten Displaygeneration noch besser anzupassen.

Ein neues Display Konzept mit gekoppelten Aktoren sieht vor, die für die Erzeugung von Hautschereffekten verantwortlichen piezoelektrischen Biegeaktoren mit Aktoren zu koppeln, die eine Anregung normal zur Haut ermöglichen. Diese Normalkraftaktoren basieren auf dem Reluktanzprinzip. Vom IDS kommen die piezoelektrischen Biegeaktoren. Die Normalkraftaktoren, werden vom Institut für Mikroproduktionstechnik entwickelt.

Auf Basis des im wesentlichen vom Welfenlab entwickelten Wahrnehmungsmodells, erfolgt die Displayansteuerung. Zur Beschreibung des Aktorverhaltens des piezoelektrischen Biegeaktors wurde bereits ein analytisches Aktormodell entwickelt sowie die vom Finger ausgehenden Kontaktlasten gemessen und in ein Lastmodell übersetzt.

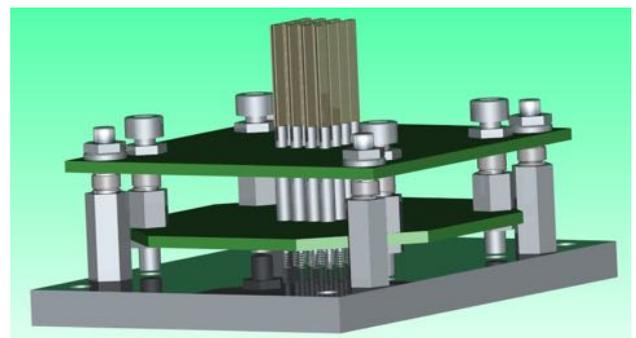


Abbildung 2: CAD-Modell des taktilem Display's mit gekoppelter Aktorik

Ansprechpartner:

Andreas Sebastian Schmelt, M. Eng.

☎ +49(0)511/762-14622

✉ schmelt@ids.uni-hannover.de

## Reibungsreduktion im Pneumatikdichtkontakt

In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt wird die Reibungsreduktion im Kontakt zwischen Elastomermaterial und Metall untersucht, wie er bei der Verwendung von Dichtungen in Pneumatikzylindern vorkommt. Dazu wird die Kontaktzone zu Schwingungen im Ultraschallbereich angeregt. Durch die Anregung wird eine Reduktion von sowohl der Haftreibung beim Anfahren des Zylinders als auch der Gleitreibung bei hohen Gleitgeschwindigkeiten angestrebt.

Pneumatikzylinder finden ihre Anwendung in vielseitigen Stellaufgaben technischer Systeme. Im Zuge erhöhter Wirtschaftlichkeit und Prozessqualität wird neben dem Erreichen von Endpositionen die exakte Einhaltung bestimmter Weg-Zeit Profile gefordert. Dies wird durch ein Nachschwingen erschwert, das bei der Überwindung der Haftreibkräfte zwischen Dichtung und beweglichen Zylinderteilen entsteht.

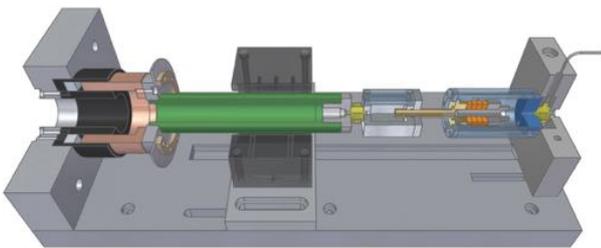


Abbildung 3: Anlage zur Untersuchung der Reibungsreduktion mittels Ultraschall

Zur Untersuchung des Einflusses der Ultraschallanregung auf die Reibkräfte wurde eine spezielle Anlage entworfen, siehe Abbildung 3. Die Erzeugung einer Relativbewegung zwischen Dichtung und Metallzylinder durch einen sogenannten Voice Coil Motor ermöglicht die Messung der Reibkräfte ohne Störeinflüsse, wie z. B. die Reibung im Antriebsstrang. Im Betrieb findet nun eine Überlagerung der Vorschubbewegung des Metallzylinders mit der Ultraschallschwingung in axialer Richtung statt. Durch eine Geschwindigkeitsregelung können die Reibkräfte bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Zylinders und bei variierenden Ultraschallamplituden gemessen werden. Dabei lässt sich ein positiver Effekt der Anregung des Kontakts durch Ultraschall beobachten, siehe Abbildung 4. Mit zunehmender Ultraschallamplitude kann eine Reduktion der Reibkräfte um bis zu 26% erreicht werden. Diese Reduktion kann, abhängig vom Material der Dichtung, durch höhere Erregeramplituden

noch weiter gesteigert werden. Mithilfe einer Kraftregelung lassen sich außerdem die Haftreibkräfte ermitteln. Durch eine lineare Erhöhung der Sollkraft lässt sich anhand eines Triangulationssensors der Moment bestimmen, an dem der Zylinder die Haftreibung überwindet. Infolge der Ultraschallanregung lässt sich auch hier eine Reduktion der Haftreibkräfte um bis zu 73% beobachten.

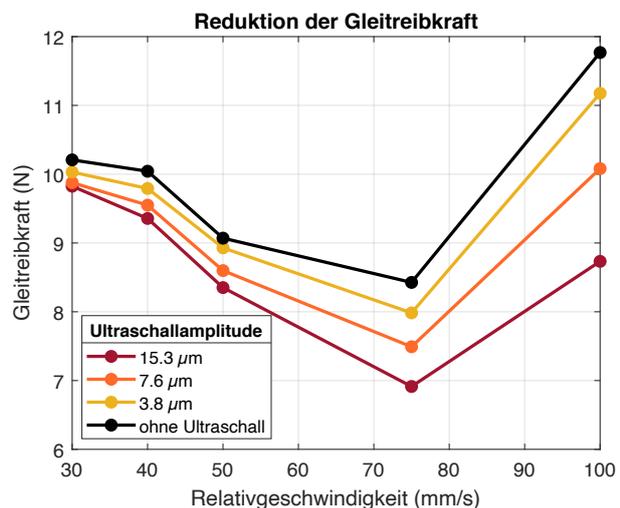


Abbildung 4: Gleitreibungskraft in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Ultraschallamplituden

Im Fokus aktueller Untersuchungen liegt sowohl der Materialverschleiß als auch die Umsetzung sanfter Anfahrvorgänge durch eine Kombination von Geschwindigkeits- und Kraftregelung. So kann das Potential dieser Technologie für das präzise Abfahren vorgegebener Weg-Zeit Profile im Betrieb genutzt werden.

Ansprechpartner:

Christian Nowroth, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-4330

✉ nowroth@ids.uni-hannover.de

## Auswirkung von Ultraschallschwingungen auf die inkrementelle Blechumformung

Durch Einsatz von Ultraschallschwingungen in der inkrementellen Blechumformung kann eine Reduzierung der Umformkraft erreicht werden. Ziel dieses Projekts ist die Untersuchung der Auswirkungen von Ultraschallschwingungen auf den Umformprozess sowie die grundsätzliche Erforschung der Vorgänge, auf denen der sog. akusto-elastische Effekt beruht.

Die inkrementelle Blechumformung ist ein innovatives Umformverfahren, bei dem ohne Formwerkzeug mit hoher Formbarkeit und kurzen Bearbeitungszeiten schnell Kleinserien gefertigt werden können. Der Einsatz von Ultraschallschwingungen im inkrementellen Blechumformungsprozess kann die Umformkraft wesentlich reduzieren und die Grenzflächentemperatur erhöhen.

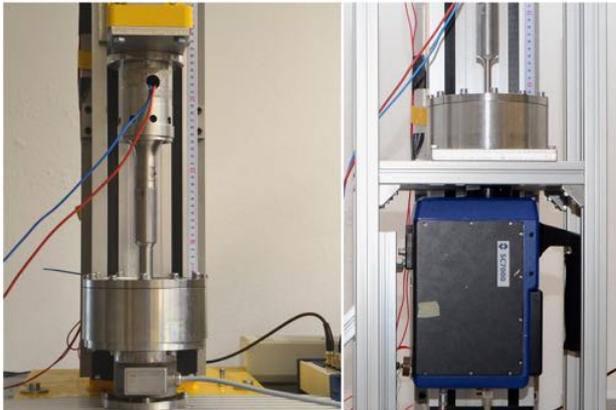


Abbildung 5: Messung von Umformkraft und Temperatur

Im Rahmen erster Voruntersuchungen wurden die Auswirkungen von Parametern, wie Blechmaterial, Ultraschalleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Werkzeugdurchmesser, auf eine Reduzierung der Kraft und eine Erhöhung der Temperatur untersucht. Die jeweiligen Messaufbauten sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine Reduzierung der Kraft von bis zu 70 % und eine Temperaturerhöhung in der Grenzschicht auf 18,77 °C.

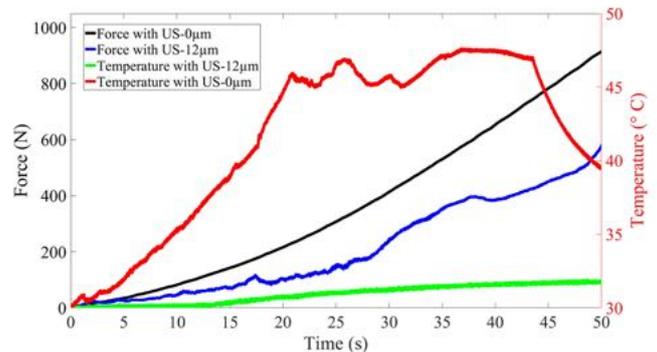


Abbildung 6: Messkurve der Kraft und Temperatur

Eine höhere Ultraschalleistung und eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit können aufgrund der akustischen Entfestigung durch Ultraschall zu einer erheblichen Reduktion der Kraft führen. Wird bei der inkrementalen Blechumformung Ultraschall eingesetzt, so entsteht aufgrund der hin- und hergehenden Relativbewegung der beiden Kontaktflächen mehr Reibarbeit, wodurch in der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Blech eine höhere Temperatur erzeugt wird. Ein Vergleich der Temperaturänderung mit und ohne Ultraschall ist Abbildung 6 zu entnehmen.

Die bisher erzielten experimentellen Ergebnisse zeigen, dass eine höhere Ultraschalleistung, eine niedrigere Formänderungsfestigkeit und eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit zu einer weiteren Erhöhung der Energie in der Umformregion führen.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Yangyang Long

+49(0)511/762-17996

long@ids.uni-hannover.de

## Kombinierte Ultraschall-Magnet-Levitationsführung für den Einsatz in Werkzeugmaschinen

Aufgrund ihrer kompakten Bauweise und kontaktfreien Funktion gewinnen aerodynamische und -statische Luftlager zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz umfasst Mikro-Turbomaschinen, Verdichter in Brennstoffzellen Präzisionslagerungen u.v.m.. Geringe Reibung und Verschleißfreiheit sind dominierenden Vorteile dieser Lager. Von Nachteil ist die mangelnde Fähigkeit zur Aufnahme mechanischer Zugkraft. Dieses Problem können aktive Ultraschallager beheben.

Bei der Squeeze-Film-Ultraschalllevitation wird die Kompressibilität der Luft zum Aufbau eines tragenden Luftpolsters genutzt. In Verbindung mit einer magnetischen Vorspannung entsteht in einem Luftspalt von 10-30  $\mu\text{m}$  der tragende Luftfilm. Dabei ist die Tragkraft abhängig von der Schwingungsamplitude der eingesetzten Ultraschalltransducer. Durch Messung des Luftspalts und Regelung der Schwingungsamplitude kann die Position des gelagerten Objekts aktiv ausregelt werden.



Abbildung 7: Ultraschall-Levitationsaktor

Abbildung 7 zeigt einen anwendungsspezifisch entwickelten Ultraschall-Levitationsaktor für eine kombinierte Ultraschall-Magnet-Levitationsführung. Von besonderem Interesse ist hierbei die Untersuchung der Ultraschalllevitationstechnologie auf ihre Eignung für den Einsatz als Lager in produktionstechnischen Maschinen. Dazu muss die Stabilität des tragenden Luftfilms gesichert sein sowie eine ausreichend hohe Levitationskraft erreicht werden. Im Zuge des von der DFG geförderten Projektes werden mit Hilfe von Computersimulationen des Spaltdrucks (siehe Abbildung 9) sowie anhand von umfangreichen experimentellen Untersuchungen am realen System die Betriebsbereiche dieser vielversprechenden Lagertechnologie ermittelt. Daneben werden die aktiven Positioniereigenschaften der in Abbildung 8 dargestellten Linearführung untersucht.

Kombinierte Ultraschall-Magnet-Levitationsaktoren

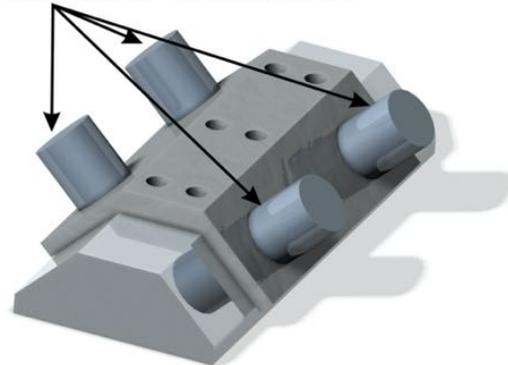


Abbildung 8: Neuartige Linearführung

Hierbei besteht die Aufgabe einer Mehrfreiheitsgradregelung des Schlittens mit Hilfe von bidirektional wirkenden Ultraschall-Magnet-Levitationsaktoren. Diese Art der Aktorik kommt im Rahmen dieses Projektes zum ersten Mal zum Einsatz und bildet eine neuartige, berührungslose Lagertechnologie, die in einem gemeinsamen Patent geschützt ist.

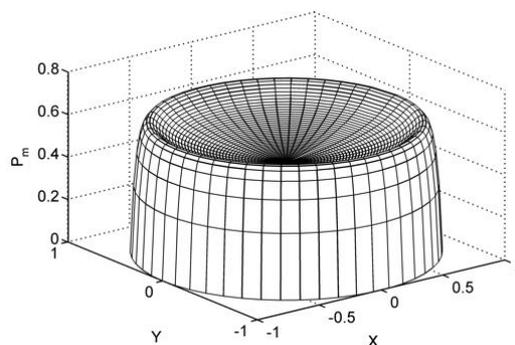


Abbildung 9: Druckverteilung auf der Aktoroberfläche

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

+49(0)511/762-4167

twiefel@ids.uni-hannover.de

## Ultraschallunterstütztes Laserstrahlschweißen

Im Teilprojekt A3 des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereichs 1153 "Tailored Forming" wird in Zusammenarbeit mit dem Laserzentrum Hannover e.V. untersucht, wie beim Laserstrahlfügen von gleichartigen (Stahl-Stahl) und artfremden Mischverbindungen (Stahl-Edelstahl) eine Ultraschallanregung des Schmelzbades den Fügeprozess beeinflusst und damit die Umformbarkeit des Mischverbunds verbessert bzw. generell erst ermöglicht.

Das Laserstrahlschweißen ist für die Herstellung von Hybridbauteilen prinzipiell geeignet. Durch Laserleistungen von bis zu 16 kW können hohe Einschweißiefen erzielt werden, die eine Voraussetzung zur vollflächigen Verbindung der Probekörper, wie z. B. von Wellen, sind.

Im Rahmen dieses Projektes wird untersucht, in welcher Weise die Qualität der Verbindungsbildung verbessert werden kann, wenn während des Schweißprozesses Ultraschallschwingungen in der Fügezone angeregt werden. Für die Ultraschallanregung wurde in der ersten Förderperiode eine spezielle Anlage entworfen, siehe Abbildung 10. Die zu schweißenden Werkstücke sind hierbei Teil des schwingungsfähigen Systems. Dieses ist drehbar gelagert, um über den gesamten Umfang schweißen zu können. Das Schwingensystem wird durch Hydraulikzylinder vorgespannt, sodass ein Abheben der Werkstücke aufgrund der Schwingung verhindert wird. Eine für den Betrieb von Leistungslaserstrahlwandlern konzipierte Regelungselektronik sorgt für eine konstante Schwingungsamplitude.

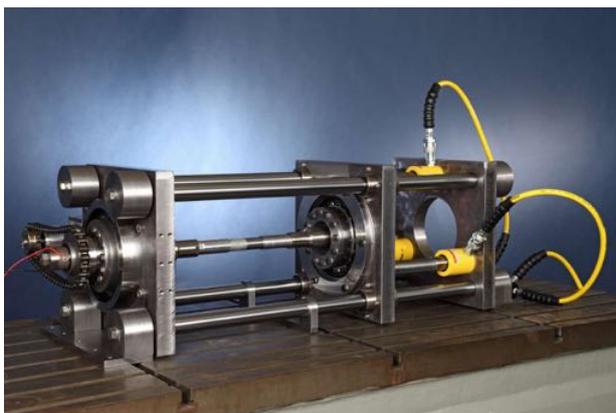


Abbildung 10: Anlage zum ultraschallunterstützten Laserstrahlschweißen

Es konnte gezeigt werden, dass die Überlagerung

des Schweißprozesses mit Ultraschall positive Auswirkungen auf die Schweißnahteigenschaften hat. Abhängig von der Amplitude konnte eine homogenere und feinere Körnung sowie die abnehmende Tendenz zur Rissbildung beobachtet werden.

Darüber hinaus konnte durch die Ultraschallanregung sowohl die Verteilung der Poren als auch die Schweißnahtgeometrie beeinflusst werden. In der zweiten Förderperiode sollen nun weit verzweigte Zusammenhänge zwischen Parametern und Schweißnahteigenschaften untersucht werden. Eine umfangreiche Prozessüberwachung, mit einem Qualitätsbeobachter soll auf Basis eines phänomenologisch-statistischen Modells eine Vorhersage der Schweißnahtqualität noch während des Prozesses ermöglichen.

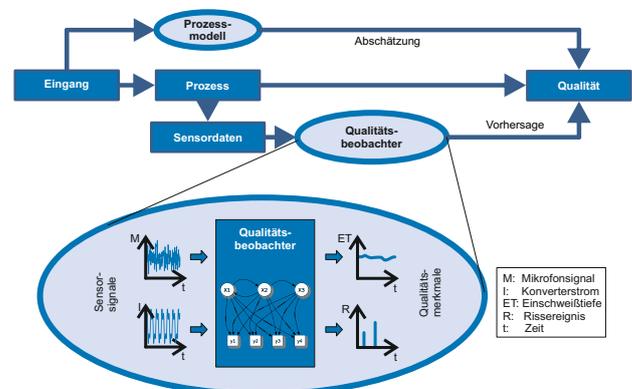


Abbildung 11: Struktur zur modellbasierten Vorhersage der Schweißnahtqualität

Ansprechpartner:

Christian Nowroth, M. Sc.

☎ +49(0)511/762-4330

✉ nowroth@ids.uni-hannover.de

## Ultraschall-Drahtbonds

In diesem Projekt werden die Vorgänge beim Ultraschall-Drahtbonds einschließlich dem Kontakt- und Reibverhalten an den beiden Grenzflächen, die Vorgänge bei der Entfernung von Oxiden, der Entstehung von Mikroschweißnähten an der Übergangsstelle sowie die Energieflüsse näher erforscht. Ein umfassenderes Verständnis der zugrundeliegenden Vorgänge ermöglicht eine bessere Regelung und Weiterentwicklung des Bondprozesses. Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Ultraschall-Drahtbonds wird seit Jahrzehnten in integrierten Schaltungen, Leistungsgeräten und anderen Anwendungen eingesetzt. Ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Bondvorgänge samt Reibung, Entfernung von Oxiden, Entstehung von Mikroschweißnähten und Energieflüssen kann die Bondgüte und -zuverlässigkeit erhöhen.

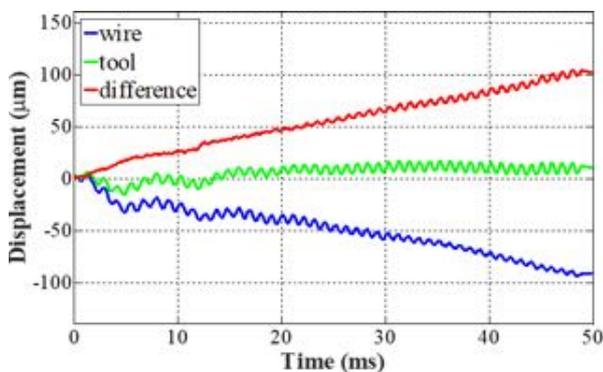


Abbildung 12: Relativbewegung von Werkzeug und Draht

Beim Anlegen von Ultraschall entsteht Reibung an den beiden Grenzflächen zwischen Werkzeug und Draht bzw. Draht und Substrat. Die Relativbewegungen an diesen beiden Grenzflächen wurden mit einem Echtzeit-Beobachtersystem erfasst und die Ergebnisse in Abbildung 12 dargestellt. Generell nimmt während des Bondprozesses die relative Verschiebungsamplitude an der Grenzfläche zwischen Draht und Substrat ab, während sie zwischen Werkzeug und Draht zunimmt.

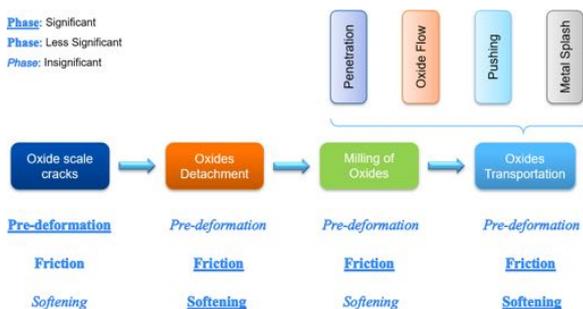


Abbildung 13: Vorgänge während der Entfernung von Oxiden

Die Reibung an der Grenzfläche von Draht und Substrat führt zur Entfernung von Oxiden und zur Entstehung von Mikroschweißnähten. Wie aus Abbildung 13 ersichtlich erfolgt das Entfernen von Oxiden in vier Schritten: Rissbildung in der Zunderschicht, Ablösung diskreter Oxidschuppen, Zerkleinerung der Flocken in kleine Partikel, die aus der Kontaktzone hinaustransportiert werden. Nach dem Entfernen der lokal vorhandenen Oxide liegt der Metall-Metall-Kontakt frei und es bilden sich Mikroschweißnähte. Die Rissbildung im gesamten Mikroschweißnahtbereich bestimmt die finale Bondgüte.

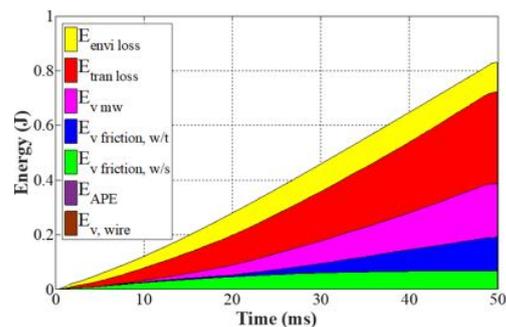


Abbildung 14: Energieflüsse bei 7,5 N 17,9 W

Die Energieflüsse der Eingangsenergie des Ultraschall-Transducers bis zu der Grenzfläche zwischen Draht und Substrat wurden quantifiziert, siehe Abbildung 14. Ein Teil der Energie ging im Transducer verloren. Der überwiegende Teil der Ausgangsenergie des Transducers wurde durch die Reibung an den beiden Grenzflächen abgeführt und durch die Entstehung von Mikroschweißnähten aufgebraucht. Die Energie für den akusto-elastischen Effekt war trotz des Einflusses auf die kontinuierliche plastische Formänderung des Drahts wesentlich geringer.

Ansprechpartner:  
 Dr.-Ing. Yangyang Long  
 ☎ +49(0)511/762-17996  
 ✉ long@ids.uni-hannover.de

## Molekulardynamik-Simulation der Vorgänge beim Ultraschallfügen

Der Einfluss von Ultraschallschwingungen auf das Entstehen und Brechen von Mikroschweißnähten, die Interdiffusion und andere Vorgänge ist noch unklar. Messtechnische Untersuchungen dieser Vorgänge sind entweder äußerst schwierig oder sehr kostenintensiv. Da die Vorgänge sich auf atomarem Niveau abspielen, ist die Molekulardynamik-Simulation ein höchst wirksames und geeignetes Untersuchungsverfahren. Es zeigt sich, dass Ultraschallschwingungen einen erheblichen Einfluss auf diese Vorgänge haben.

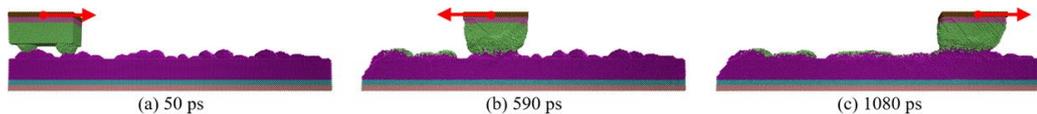


Abbildung 15: Entstehen und Brechen von Mikroschweißnähten bei Schwingungen und Bewegung in horizontaler Richtung

Während des Fügens unter Ultraschallanregung entstehen Mikroschweißnähte, die umgeformt, gebrochen und erneut umgeformt werden. Der Wettstreit zwischen dem Entstehen und Brechen der Nähte bestimmt die Bondgüte. Wie in Abbildung 15 verdeutlicht. Durch die Schwingung und die kontinuierliche plastische Verformung gleitet der Draht (oberer Teil) auf dem Substrat. Während der Bewegung kommt es zu einer starken Veränderung der Oberflächentopographie des Drahts als auch des Substrats. Im gesamten Mikroschweißnahtbereich kommt es zu sich ändernden Scherspannungen, siehe Abbildung 16. Sie steigen zu Beginn an und nehmen mit dem Erreichen der Substratkante ab.

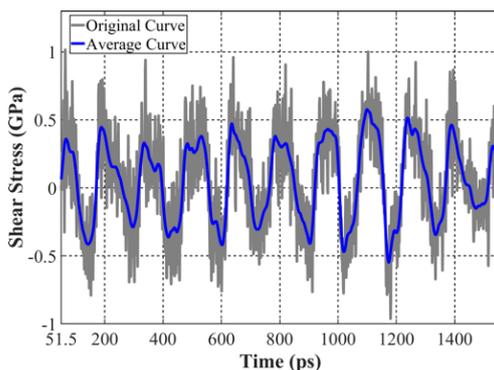


Abbildung 16: Scherspannung bei der Bewegung

Es wird deutlich, dass sich an Stellen, an denen alte Mikroschweißnähte gebrochen sind, erneut Mikroschweißnähte bilden können, und dies sogar mit den gleichen Rauheitsspitzen. Die konstante horizontale Bewegung des Drahtes verändert die Oberflächentopographien in hohem Maße. Bei gleichen Bedingungen wirkt sich eine höhere Festigkeit der Werkstoffe negativ auf das Entstehen der Mikroschweißnaht aus. Dagegen wirkt sich ein größere

Abstand oder eine stärkere Verformung der Rauheitsspitzen positiv auf das Entstehen von Mikroschweißnähten aus. Größere Schwingungsamplituden bewirken eine schnellere Änderung der Mikroschweißnähte, jedoch nicht unbedingt eine Zunahme der resultierenden Scherspannung und des Mikroschweißnahtbereichs.

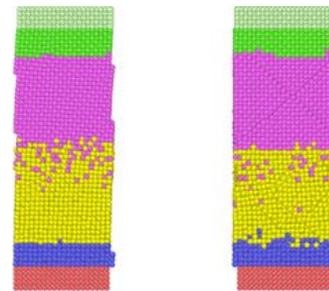


Abbildung 17: Diffusion bei Schwingung in horizontaler (li) und vertikaler (re) Richtung

Ultraschallschwingungen verstärken die Diffusion beträchtlich. So kommt es zum Beispiel in einem Cu-Al-System bei 300 K nach 3 ns nicht zu Diffusion. Bei Ultraschallanregung findet jedoch Diffusion statt. Wie in Abbildung 17 dargestellt kann eine Diffusion von Cu nach Al beobachtet werden, egal ob die Anregung in horizontaler oder vertikaler Richtung erfolgt. Durch die Schwingungen kommt es zu zahlreichen Fehlern, die die Diffusion in hohem Maße verstärken. Schwingungsamplitude und -frequenz beeinflussen den Prozess maßgeblich.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Yangyang Long

+49(0)511/762-17996

long@ids.uni-hannover.de

## Potentiale des Ultraschalleinsatzes beim Niedertemperatursintern

Das Niedertemperatursintern ist ein Fügeverfahren von hoher Relevanz für elektrische Komponenten in Windkraftanlagen und Fahrzeugen für die Elektromobilität. Dabei steigen die Anforderungen an die Elektronik im Hinblick auf den thermischen und elektrischen Kontakt-Widerstand, der bei Sinterverfahren grundsätzlich sehr gering sein kann. Um den sehr hohen Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit gerecht zu werden, müssen bestehende Verfahren weiter verbessert werden. In diesem Projekt wird die Wirkung von Ultraschall auf den Sinter-Prozess erforscht.



Abbildung 18: 40 kHz Schwingensystem für eindimensionale parallele und vertikale Anregung

Die Verbindungstechnik des Niedertemperatursinterns ist Anfang der 90er Jahre von Schwarzbauer und Kuhnert entwickelt worden. Bei diesem Verbindungsverfahren werden ein Substrat und eine weitere elektrische Komponente zum Beispiel eine Diode oder ein IGBT mit einer dünnen Zwischenschicht aus Silberpaste vollflächig miteinander verbunden. Der Vorteil der vollflächigen Verbindung besteht in der höheren Temperaturwechselfähigkeit, der höheren mechanischen Stabilität und der besseren elektrischen und thermischen Leitfähigkeit. Es handelt sich um ein Sinterverfahren, bei dem Diffusionsvorgänge zwischen den Silberpartikeln des Substrats, der Paste und der zu verbindenden Komponenten genutzt werden. Hierfür wird das Substrat mit der aufgetragenen Paste eine gewisse Zeit vorgeheizt, sodass die organischen Bindemittel der Paste verdampfen können. Im Anschluss wird über einen Pressenstempel mit einem Druck von ca. 40 MPa die zuversinternde Komponente angepresst. Ziel der Forschungen ist es, die Wirkung einer zusätzlichen Ultraschallbehandlung während der Verbindungsbildung zu untersuchen. Sowohl die Frequenz und die Amplitude als auch die Kinematik der Ultraschallschwingung sind dabei wichtige Parameter. Das IDS hat einen automatischen

Prüfstand und unterschiedliche piezoelektrische Schwingensysteme entwickelt, um Parameterstudien für diese Untersuchungen durchzuführen. Zur Anregung werden Schwingensysteme mit Betriebsfrequenzen zwischen 20-60 kHz, die parallel oder senkrecht zur Verbindungsebene betrieben werden, genutzt. In der Abbildung 18 ist exemplarisch ein Schwingensystem dargestellt. Die Ultraschallsysteme führen ein- oder mehrdimensionale Bewegungen an der Spitze aus, um den Diffusionsprozess zu unterstützen. Um die Auslenkungsamplituden zu bestimmen, wird die Bewegung der Sonotrode mit einem 3D Laserdopplervibrometer erfasst und ausgewertet. Zur Bewertung der Verbindungsqualität werden Linear- und Torsionsschertests durchgeführt, siehe Abbildung 19.

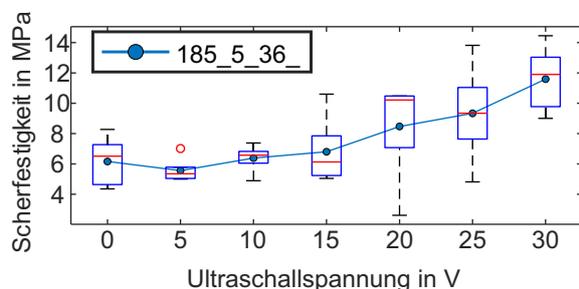


Abbildung 19: Scherfestigkeitserhöhung durch den Einsatz von Ultraschall

Durch den Ultraschall kann die Verbindung in kürzester Zeit und bei geringerer Prozesstemperatur als ohne Ultraschall erfolgen. Die vermutete Ursache für diesen positiven Effekt ist, neben einer höheren Verdichtung der Silberpartikel, auch die Partikelschwingung selbst, die zu einer schnelleren Diffusion führen könnte.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

☎ +49(0)511/762-4167

✉ [twiefel@ids.uni-hannover.de](mailto:twiefel@ids.uni-hannover.de)

## Sonomechatronik

Im Gebiet der Sonochemie existieren zahlreiche Prozesse, die durch die Wirkung von Ultraschall unterstützt oder erst möglich werden. Hierbei wird akustische Kavitation eingesetzt um Prozesse und Reaktionen zu beeinflussen. Am IDS werden unterschiedliche mechanische und elektronische Komponenten zur Erzeugung und Detektion von Kavitation erforscht und entwickelt. Ein aktuell untersuchtes Konzept zur Regelung der Kavitationsintensität wird hier vorgestellt. Die Verbindung von Sonochemie mit den Konzepten der Mechatronik nennen wir Sonomechatronik.

Das Phänomen der Kavitation, d.h. die Entstehung, Schwingung und Implosion kleinster luft- oder gasgefüllter Blasen in Flüssigkeiten, wird vielfach gezielt in technischen Prozessen eingesetzt. Wird Kavitation, wie z. B. bei der Ultraschallreinigung, mittels Schall erzeugt, wird dies als akustische Kavitation bezeichnet. Damit kavitationsbasierende Prozesse bei konstanter Kavitationsintensität und energetisch möglichst effizient ablaufen können, ist es wünschenswert diesen Prozess geregelt durchzuführen.

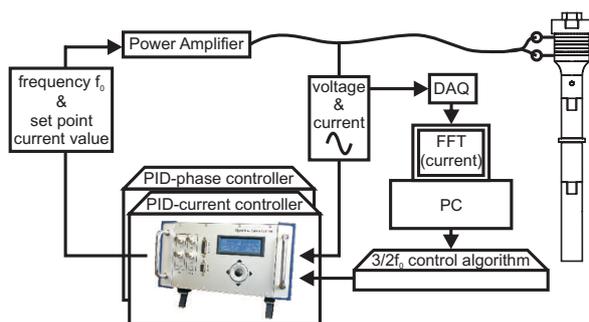


Abbildung 20: Prinzipskizze des verwendeten Regelkreises

Die durch die akustische Anregung erzeugten Kavitationsblasen führen Schwingungen aus und wirken dadurch selbst als Schallquellen. Diese Schwingungen treten bei bestimmten Frequenzen auf, die als Indikatoren für das Vorhandensein von Kavitation genutzt werden können. Mit einem neuartigen Ansatz ist es möglich diese Indikatoren ohne zusätzliche Messgeräte zu detektieren. Hierbei wird der piezoelektrische Ultraschallwandler gleichzeitig als Aktor und Sensor genutzt. Am IDS werden die Zusammenhänge zwischen auftretenden Frequenzanteilen und den Vorgängen in der beschallten Flüssigkeit erforscht und Indikatoren für die Kavitationsintensität abgeleitet.

Die erlangten Kenntnisse nutzen wir, um eine Regelung der Intensität für transiente, chaotische Kavitationsprozesse umzusetzen. So ist es mit dem verwendeten Versuchsaufbau (Abbildung 20) möglich, unter anderem das Auftreten und die Intensität von transienter Kavitation, bei der die erzeugten Blasen implodieren, anhand des Frequenzanteils zu detektieren, der dem 1,5-fachen der Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers entspricht. Eine beispielhafte Messung mit aktiver Intensitätsregelung ist in Abbildung 21 dargestellt.

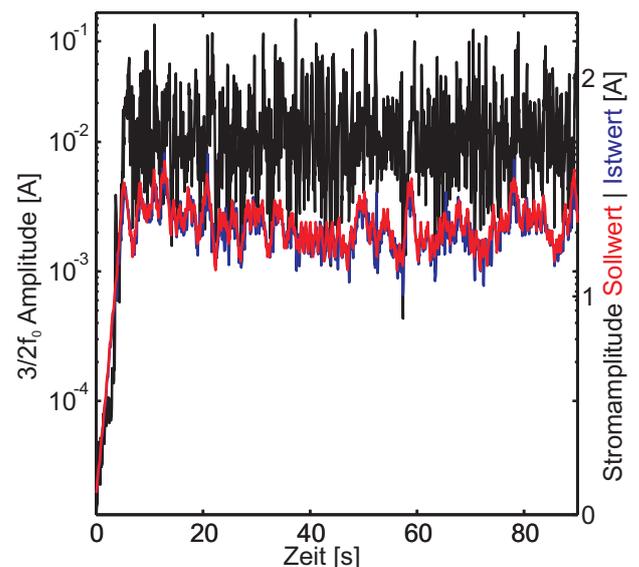


Abbildung 21: Messung mit aktiver Kavitationsintensitätsregelung

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

☎ +49(0)511/762-4167

✉ [twiefel@ids.uni-hannover.de](mailto:twiefel@ids.uni-hannover.de)

## Material-Verfestigung durch Ultraschall-Kavitation

Material-Verfestigung, auch Peening genannt, durch Ultraschall-Kavitation ist ein Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung. Durch das Kollabieren von Kavitationsblasen werden auf die zu behandelnde Oberfläche hohe Druckstöße ausgeübt und damit ihre Festigkeit erhöht. In diesem Projekt soll untersucht werden, wie sich Kavitationsfelder in kleinen Spalten ausbreiten. Unser Ziel ist, den Zusammenhang zwischen Betriebsparametern, wie Schwingungsamplitude und Arbeitsabstand, und der erreichbaren Material-Verfestigung zu erforschen.

Kavitation die an einer metallischen Grenzfläche auftritt ist üblicherweise mit Verschleiß infolge von Materialerosion verbunden, wobei vier Phasen unterschieden werden: Inkubation, Beschleunigung, Phase der maximalen Erosionsrate, Verminderungsphase. Während der Inkubationsphase ist der Materialverlust gering und es kommt durch die hohen, von den Kavitationsblasen erzeugten, Druckstöße zu einer plastischen Verformung. Auf und unter der metallischen Grenzfläche werden Eigenspannungen entwickelt, die je nach Werkstoff durch Zwillingsbildung, Gleiten oder Spannungsphasen-Umwandlung entstehen. Die Materialverfestigung durch Ultraschall-Kavitation sollte deshalb bevorzugt nur während der kurzen Inkubationsphase durchgeführt werden, während der Massenverlust gering und die plastische Formänderung hoch ist. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Oberflächeneigenschaften und die Ermüdungseigenschaften aus. Genau wie das herkömmliche Kugelstrahlverfahren erzeugt Peening durch US-Kavitation an der Oberfläche Druckeigenspannungen, wodurch die Oberflächenhärte zunimmt, ohne jedoch die Oberflächenrauigkeit nennenswert zu erhöhen. Außerdem handelt es sich bei diesem Peeningverfahren um ein umweltfreundliches Verfahren, weil statt kugeligem Strahlmittel nur Flüssigkeiten erforderlich sind.

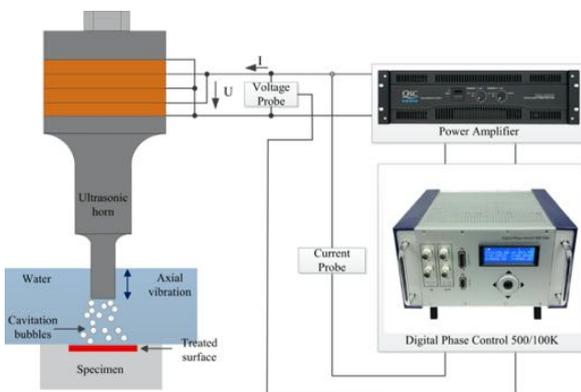


Abbildung 22: Versuchsaufbau

Abbildung 22 zeigt den Versuchsaufbau beim Peening mit US-Kavitation. Um eine gute Wirkung zu

erzielen, ist ein kleiner Arbeitsabstand von normalerweise unter 1 mm erforderlich. Bei geringen Arbeitsspalten ergibt sich nur ein dünner Flüssigkeitsfilm, in dem Kavitation auftritt. In der Vergangenheit wurden hauptsächlich die Auswirkungen der unterschiedlichen experimentellen Parameter, wie Frequenz, Temperatur und Schwingungsamplitude untersucht. Eine Untersuchung des Arbeitsabstands und der Ausbreitung des Kavitationsfelds in kleinen Spalten wurde bisher nicht ausreichend durchgeführt. Ziel des Projekts ist es, die Relation zwischen experimentellen Parametern und der Leistungsfähigkeit des Peeningverfahrens durch US-Kavitation, insbesondere bei kleinem Arbeitsspalt, zu erforschen. Mittels Sono-Chemolumineszenz (SCL) können sonochemische Reaktionsfelder visualisiert und das Kavitationsfeld beschrieben werden. Die Leistungsfähigkeit des Peenings kann anhand der plastischen Formänderung der behandelten Oberfläche beurteilt werden. Abbildung 23 zeigt die Formänderung einer Werkstückoberfläche unter dem Mikroskop nach Peening mit US-Kavitation.

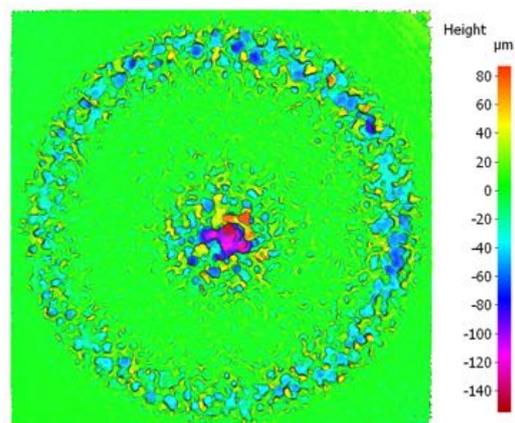


Abbildung 23: Formänderung einer Oberfläche

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

+49(0)511/762-4167

twiefel@ids.uni-hannover.de

## Piezoelektrische Ultraschallantriebe

Die fortschreitende Automatisierung und Technisierung stellt kontinuierlich höhere Anforderungen an die verwendeten Antriebskomponenten. Die Systeme sollen immer genauer und gleichzeitig energieeffizienter arbeiten, ohne an Dynamik einzubüßen. Speziell in hochpräzisen Klein- und Kleinstantrieben sind piezoelektrische Schwingungsantriebe eine vielversprechende Alternative zu konventionellen elektromagnetischen oder elektrodynamischen Antrieben.

Piezoelektrische Antriebe bestehen aus einem Stator und einem Rotor. Hierbei bezeichnet der Stator ein ortsfestes und der Rotor ein bewegtes Teil, unabhängig davon, ob es sich um einen rotatorischen oder translatorischen Antrieb handelt. Der Stator wird zu hochfrequenten Strukturschwingungen angeregt, sodass sich die Oberflächenpunkte auf elliptischen Trajektorien bewegen. Wird nun der Rotor gegen den Stator gepresst, wird er von diesen elliptischen Bewegungen mitgezogen (vgl. Abbildung 24). Der Vortrieb beruht auf den reibkraftschlüssigen Prozessen im Kontakt zwischen den beiden Körpern. Zeit- und ortsabhängig kommt es dabei zum Haften, Gleiten und Separieren der Kontaktpartner.

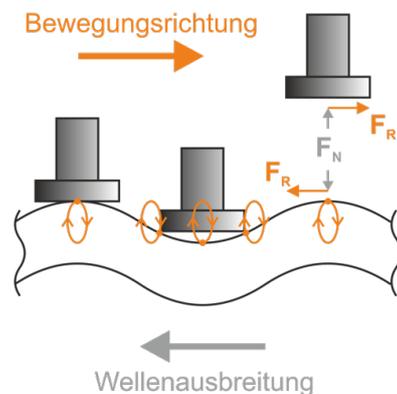


Abbildung 24: Funktionsprinzip eines translatorischen Wanderwellenmotors

Bei den Antrieben unterscheidet man zwischen Steh- und Wanderwellenmotoren. Stehwellenantriebe erzeugen die elliptische Trajektorie des Stators durch die gezielte Überlagerung von zwei Stehwellen bzw. Eigenschwingungsformen. Abbildung 25 zeigt einen rotatorischen Stehwellenmotor. Im Gegensatz dazu wird bei den Wanderwellenmotoren die elliptische Trajektorie durch eine möglichst ideal fortschreitende Welle erzeugt. Für bestimmte Geometrien kann man dies durch die Überlagerung von

zwei Stehwellen erreichen, die einen räumlichen und zeitlichen Versatz zueinander aufweisen. Aber auch die Kombination von Schwingungsquelle, Wellenleiter und Absorber ist möglich.

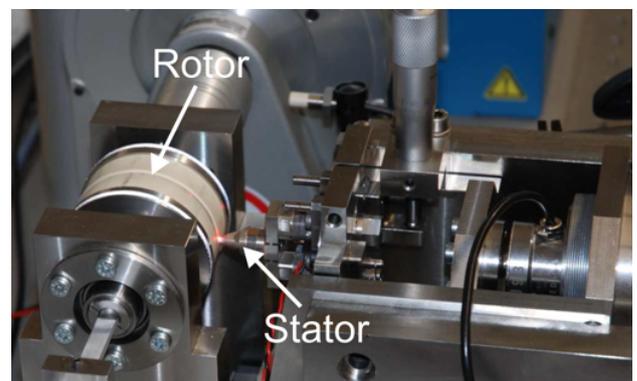


Abbildung 25: Stehwellenmotor im Labor

Das Institut für Dynamik und Schwingungen befasst sich seit vielen Jahren mit der grundlegenden Untersuchung von Stehwellen- und Wanderwellenmotoren. Ein Fokus liegt auf der Integration dieser vielversprechenden Antriebstechnik in neue Anwendungsfelder, um auch dort von den Vorteilen wie

- geräuschloser Betrieb
- hohe Positioniergenauigkeit
- gutes Start-Stopp-Verhalten
- große Haltekraft ohne Energieversorgung

zu profitieren. Hierfür werden theoretische, modellbasierte Untersuchungen durchgeführt sowie Prototypen experimentell charakterisiert und validiert.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

☎ +49(0)511/762-4167

✉ twiefel@ids.uni-hannover.de

## Titansonotrode (TiAl6V4) aus dem 3D-Drucker

Mittels Lasersinter 3D-Druck ist es mittlerweile möglich, komplexe Geometrien, mit dem aus der Luftfahrtindustrie bekannten Hochleistungswerkstoff Titan Grade 5 (TiAl6V4), herzustellen. Im Institut für Dynamik und Schwingungen wurden Schwingeigenschaften und Erwärmung einer 3D-gedruckten Ultraschallsonotrode und einer CNC-gefrästen Vergleichssonotrode untersucht und verglichen. Hierzu wurden die charakteristischen Ersatzparameter des äquivalenten elektro-mechanischen Ersatzsystems und die Sonotrodenerwärmung im Betrieb untersucht.

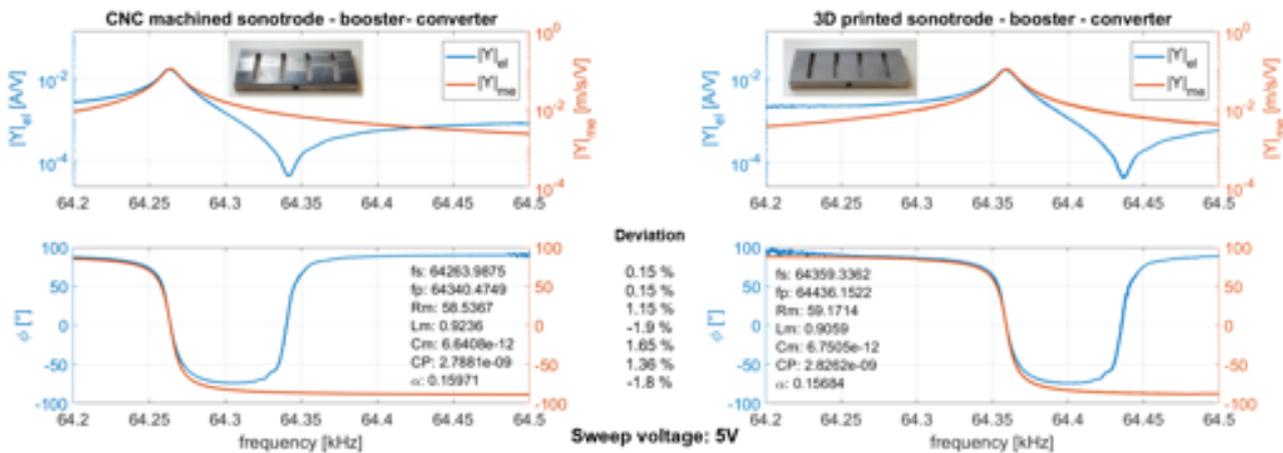


Abbildung 26: Übertragungsfunktion und ermittelte Ersatzparameter, links: CNC-gefräste Sonotrode; rechts: 3D-gedruckte Sonotrode

Die Sonotroden wurden auf eine longitudinale  $\lambda/2$ -Form bei ca. 64 kHz ausgelegt. Modalhammertests der Sonotroden mit Laservibrometermessungen zeigen, dass die Schwingungsformen, die Schwinggüten (CNC: 9399, 3D: 9245) als auch die Frequenz der jeweiligen Moden sehr ähnlich sind. (Abweichungen max. 1,6%). Zur Untersuchung der Ersatzparameter wurde die Sonotrode mit einem Booster und einem Konverter gekoppelt.

parameter weisen einen Unterschied von 2% auf. Untersuchungen der Temperaturverteilung der Sonotrode zeigen allerdings, dass es bei größeren Amplituden von  $7 \mu m$  an der Sonotrodenspitze (25-fach vgl. zu Sweep) im Bereich der Verschraubung zu starken Erwärmungen kommt. Zukünftige Untersuchungen von Sonotroden mit veränderten Geometrien, Materialien und 3D-Druckverfahren für den Einsatz als Leistungultraschallwerkzeug sind geplant.

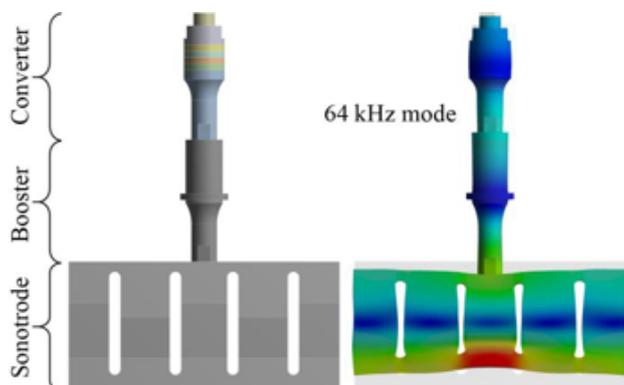


Abbildung 27: Gesamtschwingssystem

Bei dem Gesamtsystem handelt es sich um ein  $3/2 \lambda$ -System. Die Resonanzfrequenzabweichung des Gesamtsystems mit den unterschiedlichen Sonotroden liegt bei 96 Hz (0,15% Unterschied). Die Ersatz-

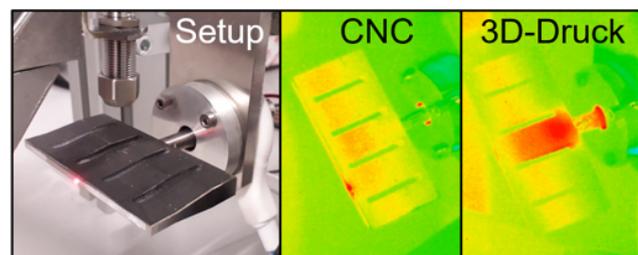


Abbildung 28: Thermokameramessungen der Sonotrodenerwärmung

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Gabriel Ertz  
 ☎ +49(0)511/762-4168  
 ✉ ertz@ids.uni-hannover.de

## Hochdynamische Regelung von Ultraschallwandlern

Resonante Ultraschallaktoren können vielfältig eingesetzt werden. Die Ultraschallenergie kann genutzt werden, um Prozesse wie Ultraschallschweißen oder Bonden zu realisieren oder ultraschallunterstütztes Drehen oder Bohren zu beschleunigen und die Prozesseffizienz zu steigern. Im Verlauf solcher Prozesse ändern sich die auf einen Ultraschallwandler einwirkenden Prozessgrößen, aber es wird gefordert, dass die Regelung die prozessbestimmenden Größen konstant hält. Hieraus ergeben sich hohe Anforderungen an die Regelung und Signalverarbeitung.

Beim ultraschallunterstützten Drehen ändern sich die Prozessgrößen mit einer relativ hohen Dynamik. In diesem Fall ist es unerlässlich, eine ausreichend schnelle Regelung zu implementieren. Bei fremderregten Systemen werden Ultraschallwandler oft mit Hilfe einer überlagerten Phasen- und Amplitudenregelung betrieben. Hierbei gewährleistet die Phasenregelung den Resonanzbetrieb und die Amplitudenregelung eine konstante Schwingungsamplitude. Aufgrund der hohen Resonanzfrequenzen der Ultraschallwandler, im Bereich von 20 bis 100kHz, muss eine ausreichend schnelle und dennoch exakte Phasen- und Amplitudenbestimmung erfolgen. Die hochdynamische Regelung benötigt eine schnelle Datenerfassung und -verarbeitung, die innerhalb einer Schwingungsperiode die erfassten Daten dem Regelalgorithmus zur Verfügung stellen kann.



Abbildung 29: Prototyp eines Ultraschallwerkzeugs für den Einsatz in Drehmaschinen

Das Ultraschallwerkzeug in Abbildung 29 basiert auf einem piezoelektrischen Transducer, der mit einer Wechselspannung bei einer Frequenz von 20kHz betrieben wird. Das Design des Werkzeugs erfolgte nach schwingungstechnischen Gesichtspunkten mit dem Ziel einer möglichst großen Schwingungsamplitude in Schnittrichtung. Das Ultraschallwerkzeug besitzt zwei Schwingungsknoten. Die Lagerung liegt in einem der Schwingungsknoten, um möglichst wenig Schwingungsenergie in die

Lagerstelle zu übertragen.

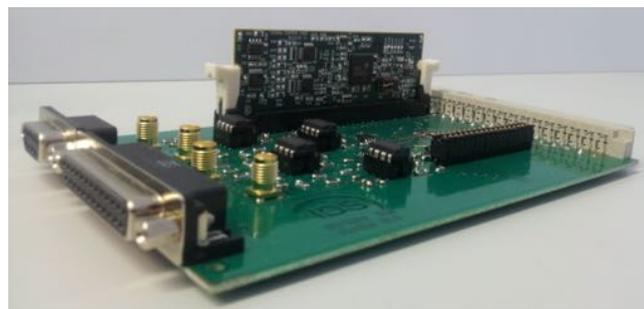


Abbildung 30: Hardware zur Ansteuerung von Ultraschallwandlern

Die in Abbildung 30 gezeigte Hardware benutzt die phasenempfindliche Demodulation, um die Klemmgrößen am Ultraschallwerkzeug auszuwerten. Die innerhalb einer Schwingungsperiode ermittelte Phase und Amplitude werden dem Regler zur Verfügung gestellt. Die Plattform basiert auf einem mit 300 MHz getakteten Mikrocontroller, dem AD-Converter mit einer Abtastfrequenz von 2 MHz, der die Strom- und Spannungswerte liefert. Mit dieser Hardware können Reglertaktungen von bis zu 10kHz realisiert werden.

Die verwendete Plattform basiert auf der DPC 500/100k und besteht aus AD-Wandlern, Mikrocontroller sowie DA-Wandlern und eignet sich für eine Vielzahl an Einsatzgebieten, die im Bereich von Regelung, Datenauswertung sowie Ansteuerung verschiedenster Verstärkertypen liegen. Diese Hardware ergänzt die DPC 500/100k für hochdynamische Systeme.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jens Twiefel

☎ +49(0)511/762-4167

✉ [twiefel@ids.uni-hannover.de](mailto:twiefel@ids.uni-hannover.de)

## Mess- und Steuerungshardware zur Untersuchung von Ultraschallsystemen

Zum Messen, Steuern und Regeln von Ultraschallanwendungen wurden am Institut für Dynamik und Schwingungen spezielle Hardwarelösungen entwickelt. Zur Ausnutzung der Amplitudenüberhöhung werden Ultraschallsysteme in ihrer Resonanzfrequenz betrieben. Laständerungen, Temperatur sowie weitere Faktoren verschieben die Resonanzfrequenz eines Ultraschallsystems, daher ist ein rein gesteuerter Betrieb nicht sinnvoll. Mit Hilfe von Resonanzregelungen können die Systeme stabil in Resonanz betrieben werden.

Für den Betrieb piezoelektrischer Systeme nahe ihrer Resonanz existieren zwei schwingungstechnische Ansätze: zum einen erzwungene Schwingungen mit Frequenz- und Amplitudenregelung der Anregung und zum anderen selbsterregte Schwingungen mit einer Regelung des Phasenwinkels in einer Rückführschleife sowie der Regelung der Energie der Anregung. Im Fall erzwungener Schwingungen ist es notwendig, kontinuierlich die Resonanzfrequenz des Ultraschallsystems zu bestimmen. Dies wird bei piezoelektrischen Aktoren üblicherweise durch einen Phasenvergleich zwischen Aktorstrom und -spannung bewerkstelligt. Hierzu kommen im Allgemeinen PLL-Konzepte (**Phase-Locked-Loop**) zum Einsatz. Bei selbsterregten Schwingungen wird über ein Begrenzungsglied der Strom mitkoppelnd zurückgeführt. Dieses Prinzip wird auch Autoresonanz oder Self-Oscillation genannt.



Abbildung 31: Digital Phase-Control 500/100K (IDS) System zur Phasen- und Amplitudenregelung

Grundsätzlich besteht die Herausforderung darin, Ultraschallsysteme in Gegenwart von Nichtlinearitäten stabil in ihrem Arbeitspunkt zu betreiben. Hierzu wird das Verhalten von PLL-Konzepten mit dem am Institut für Dynamik und Schwingungen entwickelten Mess- und Regelungssystem

(siehe Abbildung 31) untersucht. Mit Hilfe dieser speziell entwickelten Hardware ist der stabile Betrieb von Ultraschallsystemen, in dem als "instabiler Ast" bezeichneten Bereich nichtlinearer Schwinger, möglich. Normalerweise ist dieser "instabile Ast" durch das Auftreten des sogenannten Sprungphänomens gekennzeichnet. Mit den am Institut für Dynamik und Schwingungen entwickelten Methoden wird das Sprungphänomen vermieden, und der gesamte Frequenzbereich um die nichtlineare Resonanz steht somit für einen stabilen Betrieb zur Verfügung. Dies wird durch die in Abbildung 32 dargestellte Messung verdeutlicht. Durch die Vorgabe verschiedener Phasenwerte wurde hierbei der Frequenzgang eines nichtlinearen Ultraschallsystems mit dem Regelungssystem aus Abbildung 31 aufgezeichnet.

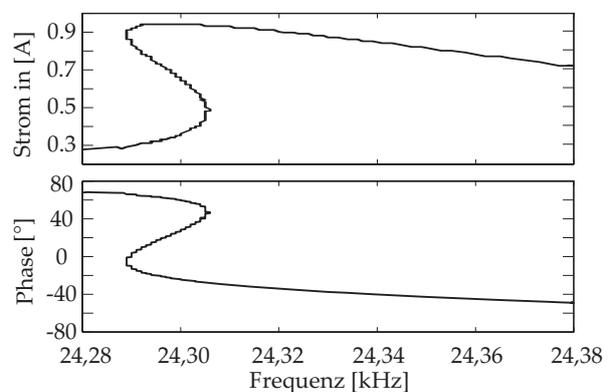


Abbildung 32: Gemessener Frequenzgang eines nichtlinearen Ultraschalltransducers

Ansprechpartner:  
 Dr.-Ing. Jens Twiefel  
 ☎ +49(0)511/762-4167  
 ✉ twiefel@ids.uni-hannover.de

## Luftgekoppelte zerstörungsfreie Ultraschallprüfung

Holzwerkstoffplatten sind als Baumaterial weit verbreitet. Um die Qualität zu gewährleisten, müssen Hersteller diese zerstörungsfrei prüfen. Denn Fehler können dazu führen, dass ein Sessel zusammenbricht oder im schlimmsten Fall ein Gebäude einstürzt. Im Rahmen eines ZIM-Projektes arbeiten die Firma Fagus-GreCon und das IDS am nächsten Entwicklungsschritt eines Verfahrens, das mit luftgekoppelten Ultraschall nutzt, um Holzwerkstoffplatten bereits in der Produktion zerstörungsfrei zu prüfen und Qualitätsmängel zuverlässig zu erkennen.

Holzplattenwerkstoffe werden in vielen Bereichen eingesetzt. Für den Heimwerker daheim, in der Möbelindustrie, bis hin zu Großbauprojekten. Dabei muss in der Regel sichergestellt werden, dass das Material fehlerfrei ist. Dafür müssen die Plattenwerkstoffe zerstörungsfrei geprüft werden. Neben dem allseits bekannten Röntgenverfahren, verwendet man hier die Ultraschallprüfung, ähnlich der medizinischen Bildgebung.

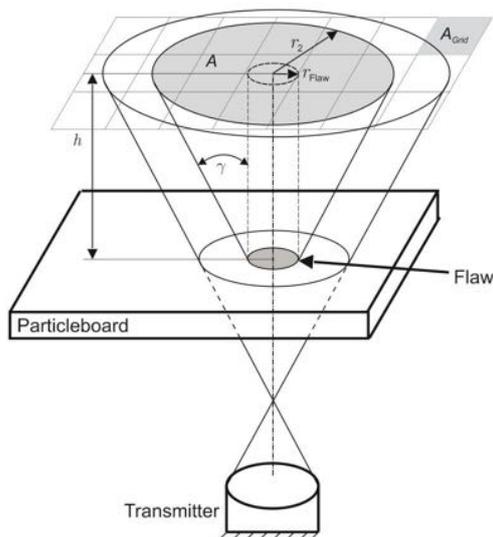


Abbildung 33: Schematische Darstellung der direkten Durchschallung eines Plattenwerkstoffes

Bei der direkten Durchschallung von Holzplattenwerkstoffen sendet ein Transmitter einen Ultraschallimpuls in das Umgebungsmedium Luft. Die gesendete Ultraschallwelle trifft auf die Platte und wird von ihr zu einem großen Teil reflektiert. Ein sehr kleiner Teil wird durch die Platte geleitet und wird dann auf der anderen Seite der Platte wieder an das Umgebungsmedium transmittiert. In einer gewissen Entfernung zur Platte zeichnet dann ein Mikrofon das durchgelassene Schallfeld rasterar-

tig auf (siehe Abbildung 1). Mit Hilfe von am IDS entwickelten Berechnungsverfahren kann aus den aufgezeichneten Schallsignalen die Schalldruckverteilung direkt auf der Platte bestimmt werden. Durch diese Verfahren können Fehlstellen in Größen von wenigen Millimetern eindeutig identifiziert werden. Durch eine Erweiterung dieses Verfahrens ist eine Maximierung der Messpunktabstände erreicht worden, um selbst mit Messpunktabständen die viel größer sind als die zu detektierenden Fehler, eine zuverlässige Fehleridentifikation zu gewährleisten. Dadurch ist es möglich bis zu 98% der Versuchszeit gegenüber den bisher bekannten Prüfverfahren zu sparen. In Abbildung 2 ist der Unterschied zwischen einer fehlerfreien Probe und einer mit einem Fehler, dargestellt.

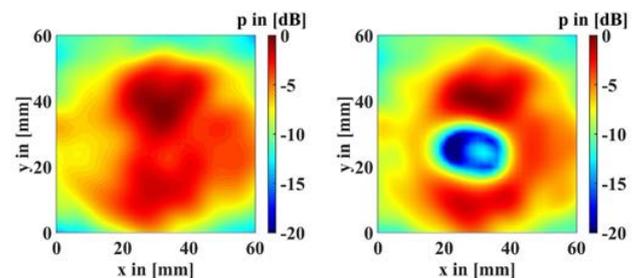


Abbildung 34: Links: Fehlerfreier Prüfbereich; Rechts: Fehler im Prüfbereich

Zukünftige Forschungen haben das Ziel, die Bewegung der Platte bei der Prüfung zu berücksichtigen und eine noch bessere Auflösung als bisher zu erreichen.

Ansprechpartner:

M.Eng. Andreas Sebastian Schmelt

☎ +49(0)511/762-14622

✉ schmelt@ids.uni-hannover.de

## Beeinflussung der Lichtausbreitung

Dieses Projekt ist Teil der Forschung in der Arbeitsgruppe S1 des von der DFG geförderten Exzellenzclusters "PhoenixD". Die Vision von PhoenixD ist es, optische Präzisionssysteme schnell und kostengünstig produzieren. Forscher aus den Bereichen Maschinenbau, Physik, Elektrotechnik, Informatik und Chemie arbeiten zusammen, um optische Systeme zu simulieren, herzustellen und anzuwenden.

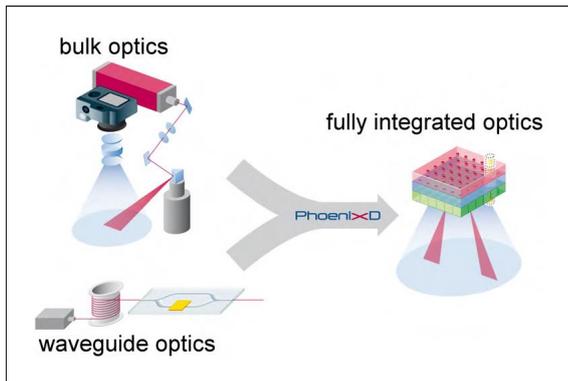


Abbildung 35: Umfassende Integration von Präzisionsoptik

Dieses Projekt konzentriert sich hauptsächlich auf die Untersuchung der Lichtausbreitung in akustooptischen Materialien, die durch akustische Oberflächenwellen angeregt werden. Ziel des Projekts ist es, akustooptische Bauteile auf einer dünnen Materialschicht zu miniaturisieren und in kleine optische Systeme (wie z. B. Integrierte Mikrowellenphotonik, Abbildung 36) zu integrieren.

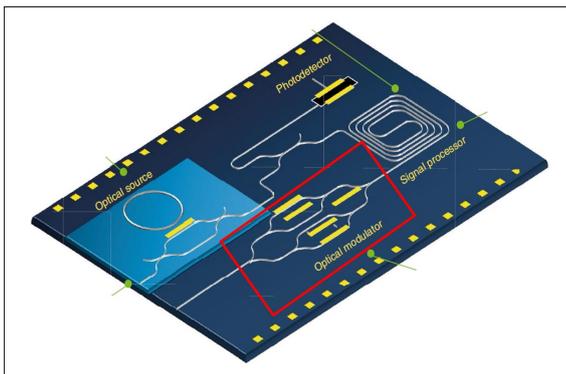


Abbildung 36: Integrierte Mikrowellenphotonik

Der akustooptische Modulator spielt eine sehr wichtige Rolle bei der Manipulation der Lichtausbreitung. Bereits seit vielen Jahren werden akustooptische Elemente, die auf akustischen Körperwellen basieren, untersucht. Sie sind inzwischen weit verbreitet. Modulatoren auf Basis von akustischen Oberflächenwellen sind dagegen neu und werden

erst seit kurzem erforscht und entwickelt. Akustooptische Komponente, die akustische Oberflächenwellen auf einer dünnen Lithiumniobatschicht verwenden, weisen äußerst kleiner Strukturgrößen auf und können sehr gut miniaturisiert werden. Die Wechselwirkung zwischen Licht und mechanischen Wellen die hier zur Manipulation und Steuerung des Lichts verwendet wird ist der photoelastische Effekt. Dieser Effekt bewirkt eine Änderung des Brechungsindex, unter dem Einfluss einer mechanischen.

Abbildung 37 zeigt die schematische Anordnung des akustooptischen Modulators vom Typ Mach-Zehnder Interferometer. Akustische Oberflächenwellen werden von Interdigital Transducern (IDTs) erzeugt. Wenn sich die akustische Oberflächenwelle durch die Mach-Zehnder-Interferometer-Struktur ausbreitet, ändert der photoelastische Effekt die Phase der optischen Signale und moduliert somit das Ausgangslicht. Um die Modulationseffizienz zu maximieren, wurde der Abstand zwischen den beiden Armen auf ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge  $\lambda/2$  der Oberfläche eingestellt.

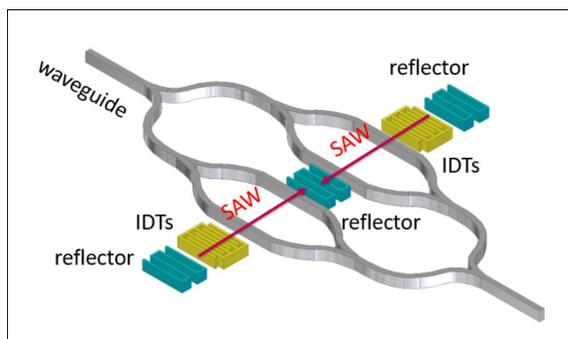


Abbildung 37: Mach-Zehnder Interferometer

Ansprechpartner:

Yongyong Zhu, M. Sc.

+49(0)511/762-5004

✉ zhu@ids.uni-hannover.de

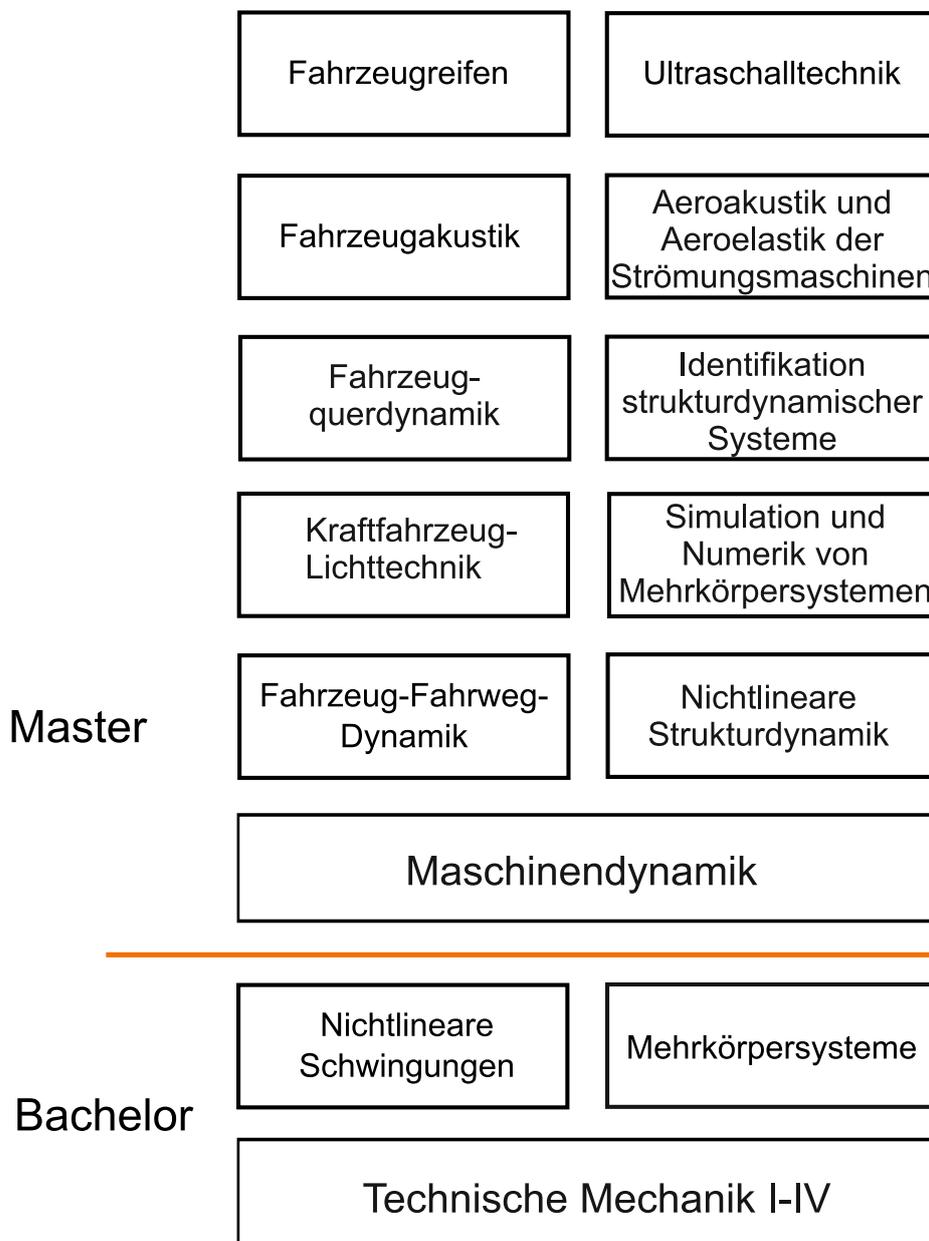
# 4 Lehre

The image is a collage of diagrams and images related to classical mechanics, arranged in a grid-like fashion.

- Top Left:** A diagram of a simple pendulum with mass  $m$ , length  $\ell$ , and pivot  $O$ . The angle is  $\varphi$  and gravity is  $g$ . Below it are the equations of motion:
$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{\ell} \sin \varphi = 0$$
$$f(\varphi) = \frac{g}{\ell} \sin \varphi$$
- Top Center:** A coordinate system with axes  $y'$  and  $z'$ .
- Top Right:** A diagram of a mechanical system with two carts on a horizontal surface. The left cart has mass  $2m$  and the right cart has mass  $m$ . They are connected by a spring with stiffness  $c$  and a damper with coefficient  $d$ . The left cart is also connected to a fixed wall by a spring with stiffness  $2c$  and a damper with coefficient  $2d$ . Displacements are labeled  $x_1$  and  $x_2$ .
- Middle Left:** A photograph of a lecturer in a suit standing in a lecture hall, addressing a large audience of students seated at desks.
- Bottom Center:** A phase portrait in the  $x$ - $v$  plane, showing concentric closed orbits around a central point, indicating periodic motion.

## 4.1 Übersicht

Das IDS bietet zahlreiche Vorlesungen für die Bachelor- und Masterstudiengänge u.a. für Studierende des Maschinenbaus, der Mechatronik, Energietechnik und Elektrotechnik an. Die angebotenen Lehrveranstaltungen werden dabei stets überarbeitet und ergänzt. Insbesondere wurde auch das englischsprachige Lehrangebot erweitert. Mit den Vorlesungen Automotive Lighting, Business, Technology & Development of Vehicle Tires, Engineering Dynamics and Vibrations sowie Introduction to Mechanical Vibrations werden die Vorlesungen Kraftfahrzeug-Lichttechnik, Fahrzeugreifen, Maschinendynamik sowie Technische Mechanik IV auf englisch gehalten bzw. parallel zur deutschen Vorlesung in einer ergänzenden englischsprachigen Variante angeboten.



## 4.2 Lehrveranstaltungen im Bachelor

### Technische Mechanik 1

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek, Prof. Dr.-Ing. P. Wriggers, Dr.-Ing. M. Wangenheim ]

Grundgrößen, Maßeinheiten, Vektorrechnung, Einführung in die Modellbildung, der Begriff der Kraft, ebene und räumliche Kräftegruppen, Erstarungsprinzip, NEWTON'sche Axiome, Statik von Systemen starrer Körper, parallele Kräftegruppen, Kräftemittelpunkt und Schwerpunkt, Haftung und Reibung, Seilreibung, Fachwerke, Balken und Rahmen, Arbeits- und Energiebegriffe, Stabilität.

### Technische Mechanik 2

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek, Prof. Dr.-Ing. P. Wriggers ]

Einachsiger Zug und Druck, ebener und räumlicher Spannungszustand, Wärmedehnung, Biegung, Torsion, Energiemethoden in der Festigkeitslehre, Knickung, Festigkeitshypothesen, Berechnung von Schnittgrößenverläufen und Verformungen in statisch unbestimmten Systemen.

### Technische Mechanik 3

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek, Prof. Dr.-Ing. P. Wriggers, Dr.-Ing. M. Wangenheim ]

Eindimensionale Bewegung, Bewegung eines Punktes im Raum, ebene Bewegung starrer Körper (Momentanpol), Grundlagen der räumlichen Bewegung starrer Körper, Kinetik des starren Körpers, Grundgesetze der Mechanik (Impuls- und Drallsatz) und davon abgeleitete Sätze (Leistungssatz, Arbeitssatz), Trägheitseigenschaften starrer Körper, Stoßvorgänge, Prinzip der virtuellen Verschiebungen, Lagrange'sche Gleichungen

### Technische Mechanik 4

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek, Prof. Dr.-Ing. P. Wriggers ]

Einführung der Grundbegriffe zur Beschreibung von Schwingungen, freie ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen von Systemen mit einem Freiheitsgrad, Erzwungene Schwingungen bei harmonischer und periodischer Anregung, Schwingungssysteme mit mehreren Freiheitsgraden (Resonanz und Tilgung), Schwingungen eindimensionaler Kontinua (Stäbe, Balken), Näherungsverfahren.

## Mehrkörpersysteme

[ Dr.-Ing. L. Panning-von Scheidt ]

Kinematische und kinetische Grundlagen, Newton-Euler-Gleichungen, Lagrangesche Gleichungen, Formalismen für MKS, Prinzipie von D'Alembert, Jourdain und Gauß, Stabilitätsprobleme, Analyse des Bewegungsverhaltens anhand von Beispielen, Kreiseltheorie.

## Nichtlineare Schwingungen

[ Dr.-Ing. L. Panning-von Scheidt ]

Freie, selbsterregte, parametererregte und fremderregte Schwingungen, mathematische Beschreibung und Näherungsverfahren, Harmonische Balance, Strömungsrechnung, Einführung in die Chaostheorie, Veranschaulichung der nichtlinearen Effekte anhand von Experimenten, Videos und Rechnersimulationen.

## 4.3 Lehrveranstaltungen im Master

### Maschinendynamik

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek ]

Systeme mit endlich vielen Freiheitsgraden, Eigenwert- und Anfangswertproblem, Rayleigh-Quotient, modale Entkopplung, Reduktionsverfahren, Rotordynamik, Laval-Läufer, Kreiselwirkung, Systeme mit gyroskopischen und zirkulatorischen Kräften, Grundlagen der experimentellen Modalanalyse

### Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek ]

Modelle für die Komponenten Fahrzeug, Fahrweg inkl. stochastischer Störungen, Trag- und Führsystem; Verknüpfung der Komponenten zum Gesamtsystem, Rad-Schiene-Spurführung, Reifen-Fahrbahn-Kontakt; Vertikaldynamik: Untersuchung der Auslegungsziele Fahrstabilität, Fahrsicherheit und Fahrkomfort; Einspurmodell; aktive Systeme; Anwendungen auf Straßen-, Schienen- und Magnetschwebefahrzeuge; Gastvorträge durch Dozenten von Bombardier, Continental, Wabco, u.a.

### Aeroakustik und Aeroelastik der Strömungsmaschinen

[ Prof. Dr.-Ing. J. Seume, Dr.-Ing. L. Panning-von Scheidt ]

Grundlagen der Aeroakustik, Schallentstehung und Transport, Aerothermoakustik, Grundlagen der Aeroelastik, Aeroelastische Effekte (Flattern, erzwungene Schwingungen, akustische Resonanz), Stabilitäts- und Auslegungskriterien, Dämpfungscharakteristik (Aerodynamik und Struktur), Mistuning (Struktur und Aerodynamik), experimentelle Untersuchungen (Methodik und Equipment), Diskussion der Effekte am praxisnahen Beispiel der Turbomaschine.

### Ultraschalltechnik für industrielle Produktion, Medizin- und Automobiltechnik

[ Dr.-Ing. Jens Twiefel ]

Einsatzbereiche der Ultraschalltechnik, Wellenausbreitung im Stab, Methode der Übertragungsmatrizen, piezoelektrische Werkstoffe, Ultraschallwandler, Wellenausbreitung in Fluiden, Wellenausbreitung im Festkörper.

### Kraftfahrzeug-Lichttechnik

[ Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek, Prof. Dr.-Ing. R. Lachmayer ]

Grundlagen der Lichttechnik, Lichtquellen, Scheinwerfer, Rückleuchten, mechanische und elektronische Komponenten, lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme, Grundlagen der visuellen Wahrnehmung, Aufbau des Auges, Tag-, Dämmerungs- und Nachtsehen, physiologische und psychologische Blendung, Umfeldsensorik, Bildverarbeitung, aktive lichttechnische Systeme.

### Lehrveranstaltungen externer Lehrbeauftragter:

#### Simulation und Numerik von Mehrkörpersystemen

[ Dr.-Ing. M. Hahn (iXtronics GmbH) ]

Einsatz von MKS im mechatronischen Entwurfprozess, Entwurfswerkzeuge, Regelungsentwurf, physikalische Modellbildung von MKS, MKS-Formalismen, Numerik und Integrationsverfahren, echtzeitfähige MKS-Simulation.



## Fahrzeugreifen

[ Dr.-Ing. B. Wies (Continental Reifen Deutschland GmbH) ]

Marktentwicklung und Geschäftsumfeld der Reifenindustrie, Reifenkonstruktion und Reifenentwicklung: Reifenaufbau, Gebrauchseigenschaften, Normen und gesetzliche Anforderungen, Fertigungstechnik, Materialeinsatz, physikalische Eigenschaften von Gummi & Viskoelastizität, Gummireibung, stationäre und in-stationäre Reifenführungskräfte, Reifenmechanik & Reifenkennlinien, Reifenversuch, Reifenmodelle & Simulation



## Fahrzeugakustik

[ Prof. Dr.-Ing. G. S. Gäbel (HAW Hamburg) ]

Grundlagen der Akustik, Schallwahrnehmung, Akustische Messtechnik und Messverfahren, Normen und Richtlinien, Fahrzeuggeräusche, Schalldämpfung und Schalldämmung im Fahrzeug, aktive Maßnahmen zur Luft- und Körperschallkompensation



## Identifikation strukturdynamischer Systeme

[ Dr. Marc Böswald ]

Grundlagen und Verfahren der experimentellen Modalanalyse, Modaltests, modale Eigenschaften, Eigenfrequenzen, Dämpfungsmaße und Eigenvektoren äquivalente, dynamische Modelle, das strukturdynamische Verhalten, weitergehende dynamische Untersuchungen, Überprüfung der Vorhersagefähigkeiten numerischer Modelle



## Fahrzeugquerdynamik

[ Dr.-Ing. J. Böttcher (WABCO), Dipl.-Ing. C. Cramer (Continental Reifen Deutschland GmbH) ]

Einspurmodell, stationäre Kreisfahrt, dynamisches Verhalten, homogene Differentialgleichung, Stabilität, inhomogene Differentialgleichung, Gierregelung, nichtlineares Systemverhalten, Näherungsverhalten



## 4.4 Tutorien und studentische Labore

### 4.4.1 ACTIVE-Advanced Classroom for Training in Vibration Experiments



Abbildung 1: ACTIVE-Labor mit Labor-Arbeitsplätzen und Versuchseinrichtungen für studentische Laborarbeiten

In den letzten Jahren wurde am Institut für Dynamik und Schwingungen das Studentenlabor von Grund auf neu gestaltet und modernisiert. Ziel des Vorhabens war es, das Lehrangebot qualitativ und quantitativ zu erweitern und den Studenten einen praxisnahen Zugang zu den erlernten theoretischen Grundlagen durch Tutorien zu ermöglichen. Die angebotenen Tutorien und Labore schlagen zusätzlich eine Brücke zu den aktuellen Forschungsthemen des Instituts. Die Kernkomponente des entstandenen Labors bilden sechs Arbeitsplätze, die jeweils von zwei Studierenden genutzt werden können. Neben einem Computer mit aktuellen Mess- und Simulationsprogrammen steht an jedem Arbeitsplatz moderne und gleichartige Messtechnik zur Verfügung, wie die Studierenden diese typischerweise auch an Arbeitsplätzen in der Industrie vorfinden werden.

Im ACTIVE-Labor werden unter anderem die Versuche zum Allgemeinen Messtechnischen Labor (AML) durchgeführt. Hier finden die Studierenden im Rahmen ihres Bachelor-Studiums den ersten Zugang zu messtechnischen Fragestellungen im Bereich Strukturmechanik. Für die Studierenden des Studiengangs Mechatronik werden hier ebenfalls zwei Labore durchgeführt. Im Mechatroniklabor "schwebende Kugel" lernen die Studierenden theoretische und praktische Aspekte der Regelungstechnik. Dazu gehören die mathematische Beschreibung der Regelstrecke, der Reglerentwurf, die Fertigung der mechanischen und elektronischen Komponenten sowie die abschließende Reglerparametrierung. Im Mechatroniklabor "Piezodämpfung" stehen adaptronische Fragestellungen im Fokus. Hier untersuchen die Studierenden, wie sich durch die Applikation elektrisch beschalteter Piezoelemente Strukturresonanzen gezielt dämpfen lassen. Daneben steht Infrastruktur zur Untersuchungen von Themen aus den Fachvorlesungen zur Verfügung, etwa im Bereich der experimentellen Modalanalyse. Im Rahmen des Tutoriums "Resonante Systeme" werden Schwingungssysteme untersucht, die nahe ihrer Resonanzfrequenz betrieben werden, um große Schwingungs-Amplituden im Betrieb zu erreichen. Neben Nichtlinearitäten spielt dabei die, meist geringe, im System vorhandene Dämpfung eine große Rolle.



Abbildung 2: Laboraufbau "schwebende Kugel" und weitere Demonstratoren

### 4.4.2 Tutorien-Simulationssoftware

#### MATLAB-Tutorium

Das Tutorium wird gemeinsam vom IMES, IMR, IFW und dem IDS angeboten. Ziel ist die Vermittlung grundlegender Kenntnisse in Matlab/Simulink. Das Tutorium wird in Form aktiver Übungen im CIP-Pool der Fakultät durchgeführt und umfasst 5 Termine. Zusätzlich wird jeweils eine weitere Präsenzzeit angeboten, in denen die Studenten unter Betreuung frei üben können. Zur Zeit wird das Tutorium online abgehalten. Das Tutorium umfasst die folgenden Themengebiete:

- Einführung
- Programmierung
- Messdatenverarbeitung
- Mehrkörpersysteme und Schwingungen
- Grundlagen der Regelungstechnik

#### ANSYS-Tutorien (Workbench I und II)

Die beiden angebotenen Tutorien sollen den Einstieg in das Finite-Elemente-Programm Ansys Workbench und Ansys Classic ermöglichen. Dabei soll in kleinen Gruppen aktiv der Umgang mit dem Programm erarbeitet und geübt werden. Zusätzlich werden Aufgaben angeboten, die selbstständig durchgeführt werden können.

Die Tutorien umfassen die folgenden Themengebiete:

- Erlernen des Umgangs mit dem Finite Elemente Programm Ansys
- Selbständige Durchführung einer mechanischen Analyse
- Einführung in die apdl-Programmierung
- Geometrieerstellung
- Statische Analyse
- Modalanalyse
- Harmonische Analyse

## 4.5 Prüfungen

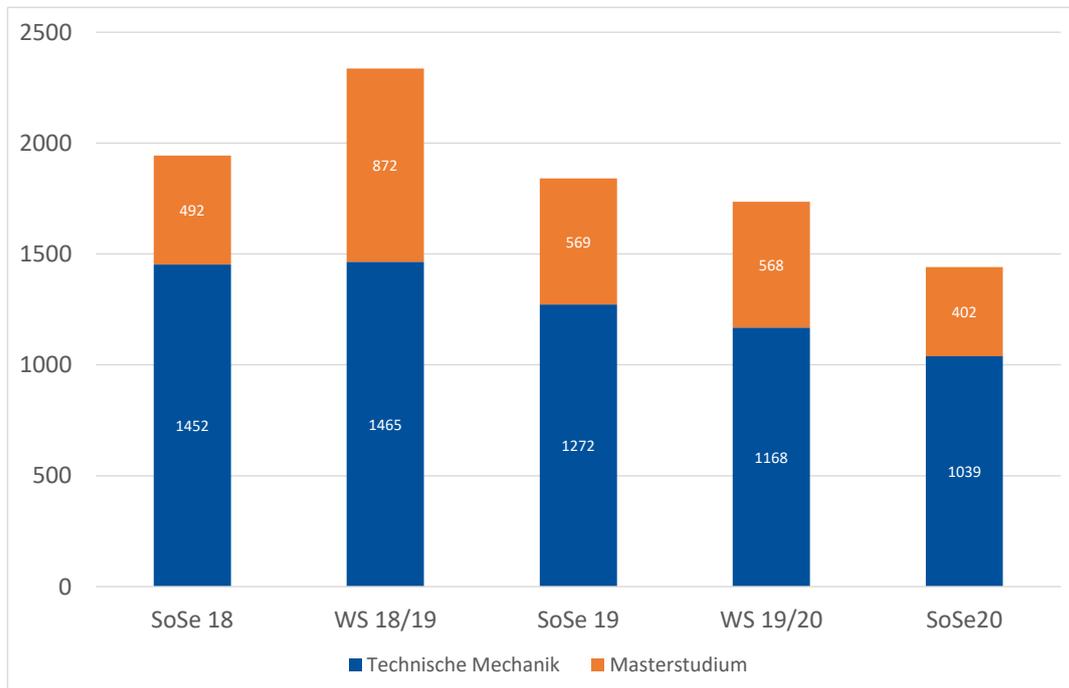
	SoSe 18		WS 18/19		SoSe 19		WS 19/20		SoSe 20	
	schriftlich	mündlich								

Technische Mechanik 1	237	0	482	0	204	1	461	0	128	0
Technische Mechanik 2	534	3	306	1	470	2	142	0	394	2
Technische Mechanik 3	160	1	451	0	106	4	362	1	116	2
Technische Mechanik 4	521	11	213	12	479	6	198	4	392	5
$\Sigma$	1452	15	1452	13	1259	13	1163	5	1030	9
$\Sigma$	1467		1465		1272		1168		1039	

Maschinendynamik	99	-	399	-	134	-	277	-	136	2
Mehrkörpersysteme	89	-	276	-	102	-	137	-	74	-
Nichtlineare Schwingungen	87	-	27	-	95	-	25	-	48	-
Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik	118	-	23	-	96	-	15	-	54	-
Kraftfahrzeug-Lichttechnik	-	1	-	57	-	13	-	14	-	5
Ultraschalltechnik für ind. Produktion, Medizin und Automobiltechnik	-	11	-	1	-	3	-	0	-	3
Aeroakustik und Aeroelastik der Strömungsmaschinen	10	-	2	-	17	-	0	-	8	-
Fahrzeugreifen	-	4	-	40	-	3	-	34	-	1
Nichtlineare Strukturdynamik	42	-	24	-	90	-	28	-	55	-
Fahrzeugakustik	-	1	-	8	-	0	-	14	-	0
Fahrzeugquerdynamik	-	0	-	12	-	1	-	19	-	8
Identifikation strukturdynamischer Systeme	30	-	3	-	15	-	5	-	8	-
$\Sigma$	475	17	754	118	549	20	487	81	383	19
$\Sigma$	492		872		569		568		402	

$\Sigma$ gesamt	1998		2090		1893		1820		1510	
-----------------	------	--	------	--	------	--	------	--	------	--

## Anzahl der Prüfungen



## 4.6 Exkursionen

- **2020**  
In diesem Jahr konnten coronabedingt leider keine Exkursionen durchgeführt werden.
- **iXtronics**  
Paderborn, 05.07.2019, durchgeführt im Rahmen der Vorlesung Simulation und Numerik von Mehrkörpersystemen
- **DLR**  
Göttingen, 27.06.2019, durchgeführt im Rahmen der Vorlesung Identifikation strukturdynamischer Systeme
- **DLR**  
Göttingen, 29.06.2018, durchgeführt im Rahmen der Vorlesung Identifikation strukturdynamischer Systeme
- **Continental AG**  
Hannover-Stöcken, 14.06.2018, durchgeführt im Rahmen der Vorlesung Fahrzeugreifen
- **L-LAB HELLA KGaA Hueck & Co**  
Lippstadt, 15.01.2018, durchgeführt im Rahmen der Vorlesung KFZ-Lichttechnik

## 5 Anhang

---



11  
102  
1004

Leibniz  
Universität  
Hannover

Institut für Dynamik und Schwingungen



## 5.1 Dissertationen und Habilitationen

Liste der von Prof. Wallaschek in Hannover betreuten Promotionen und Habilitationen

- Stephanie Kahms  
"Thermo-mechanische Modellierung von Flugzeugreifen für transiente Manöver", 2020
- Matthias Hüls  
"Der Einfluss geometrischer Auslegungsparameter auf die Dynamik reibungsgedämpfter Turbinenschaufeln", 2020
- Torben Marhenke  
"Experimentelle und modellbasierte Untersuchung der Reibmechanismen von Reifenprofilklotzproben auf rauen Fahrbahnoberflächen", 2020
- Kai-Alexander Saalbach  
"Regelung von Kavitationsprozessen mittels Self-Sensing Kavitationsdetektion", 2019
- Jan-Henning Willrodt  
"Gerichtete Lichtsignale zur personalisierten Kommunikation automatisierter Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmern", 2019
- Tim Linke  
"Untersuchung der Kraftübertragung lamellierter Reifenprofilklötze auf Schneefahrbahnen", 2019
- Yangyang Long  
"Untersuchungen zu den Mechanismen des Ultraschall-Drahtbondens", 2019
- Michael Burgwitz  
"Simulation dynamischer Kontakte mittels linearem Komplementaritätsproblem und fraktionaler Viskoelastizität", 2019
- Fushi Bai  
"Untersuchung des Einflusses der Ultraschall-Kavitation in kleinen Spalten auf die Oberflächeneigenschaften", 2019
- Sebastian Fricke  
"Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Validierung einer Mischreibungssimulation", 2018
- Marcus Neubauer  
"Mechanische und piezoelektrische Tilger zur Schwingungsminderung", Habilitation, 2018
- Noha Aboulfotoh  
"Theoretical and experimental studies on the effectiveness of broadband piezoelectric energy harvesters under volume constraints", 2018
- Gilda Karbasi  
"Entwicklung eines Schädigungsmodells für den Einsatz in der Steinschlagsimulation", 2018
- David Oliva Uribe  
"Differentiation of Soft Biological Tissues and Phantoms using a Piezoelectric Tactile Sensor for Applications in Brain Tumor Resection", 2017
- Hagen Lind  
"Experimentelle und modellbasierte Untersuchung der Reibmechanismen von Reifenprofilklotzproben auf rauen Fahrbahnoberflächen", 2017

- Linus Pohle  
"Schwingungsverhalten verstimmter zyklischer Systeme und deren Optimierung durch bewusste Verstimmung", 2017
- Francois Brouet  
"Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Modenkopplung an Ultraschallwerkzeugen", 2017
- Joscha Roth  
"Untersuchung von elektrodynamischen Mikroskannern zur Darstellung von Lichtsymbolen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung", 2016
- Marius Bonhage  
"Transiente Amplitudenüberhöhung bei verstimmten Turbinenbeschaufelungen", 2016
- Henrik Westermann  
"Entwicklung eines Advisors zur Berechnung von Stabilitätskarten für laterale Schwingungen in Tiefbohrsträngen", 2016
- Andreas Renner  
"Modellierung und Analyse von Wanderwellen in Hohlzylindern beim Ultraschall-Wanderwellentransport von Schüttgütern", 2016
- Olaf Peter Hentschel  
"Experimentelle Identifikation und theoretische Abschätzung von Strukturdämpfungswerten", 2016
- Benjamin Willeke  
"Laserscheinwerfer für adaptive Fahrlichtfunktion im Kfz", 2016
- Jonas Böttcher  
"Experimentelle und modellbasierte Untersuchung des dynamischen Verhaltens pseudoelastischer Formgedächtnislegierungen", 2016
- Daniel Schurzig  
"Development of a Numerically Efficient Model for the Dynamics of Revolute Clearance Joints in Adjustable Stator", 2016
- Wiebold Wurpts  
"Dynamik von Ultraschallschwingern mit Stoßkontakt", 2016
- S. Schwarzendahl  
"Schwingungsdämpfung zyklisch-symmetrischer Strukturen durch beschaltete Piezowandler", 2016
- S. Tatzko  
"Das dynamische Verhalten von alternierend verstimmten Schaufelkränzen mit Reibelementkopplung", 2016
- J. Fischer  
"Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlicht-Systems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nassen Fahrbahnen", 2015
- J. Bräuer  
"Modulare Modellierung und Synthese virtueller Fahrzeuginnengeräusche", 2015
- A. Hohl  
"Modellierung zyklischer Strukturen mit Unsicherheiten und theoretische Betrachtung der Energielokalisierung in verstimmten Schaufelkränzen", 2015

- M. Krack  
"The Concept of Nonlinear Modes Applied to Friction-Damped Systems", 2014
- A. Hohl  
"Modellierung zyklischer Strukturen mit Unsicherheiten und theoretische Betrachtung der Energielokalierung in verstimmten Schaufelkränzen", 2014
- C. Graf  
"Untersuchung geregelter Pneumatikaktoren für eine aktive Fahrerauslagerung zur Minderung von Humanschwingungen", 2014
- J. Laborenz  
"Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz der Wirbelstromdämpfung zur Reduktion von Turbinenschaufelschwingungen", 2014
- M. Hellmann  
"Robuste Auslegung von mobilen Brennstoffzellensystemen", 2014
- P. Grönefeld  
"Experimentelle Untersuchung und modulare Modellierung der Dynamik von PKW-Scheibenwischersystemen", 2013
- C. Funk  
"Heterogene Sensordatenfusion für eine prädiktive Lichtsteuerung", 2013
- M. Huang  
"Model-Based Poling of Piezoelectric Monolithic Ring Elements for Ultrasonic Torsional Transducers", 2013
- H. Honsel  
"Entwicklung eines Fußgängererkennungssystems für das Markierende Licht auf Basis einer Fusion von Nah- und Ferninfrarotkameras", 2013
- X. Han  
"Investigation and Development of Piezoelectric Synchronized Switch Shunt Damping on Inductor Technique", 2013
- S. Lange  
"Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Reifensimulation auf digitale Lastkollektivaussagen", 2012
- S. Ripka  
"Experimental Investigation and Modeling of Tire Tread Block Friction on Ice", 2012
- H. Shadeed  
"Development of a Light-Based Driver Assistance System", 2012
- M. Wangenheim  
"Untersuchungen zur Mischreibung in technischen Reibkontakten", 2012
- J. Twiefel  
"Experimentelle und modellbasierte Untersuchung von Stehwellenantrieben", 2010
- C. Neuber  
"Aktive Schwingungsreduktion durch Magnetführungen", 2010
- R. Christel  
"Aktive Schwingungsminderung an gekoppelten Zylindern in Rollenoffsetdruckmaschinen mittels piezokeramischer Aktoren an den Lagerstellen", 2010

- A. Bürge  
“Modellierung und experimentelle Parameteridentifikation nichtlinearer Reibkontakte bei Turbinenschaufeln”, 2009
- G. Gäbel  
“Wechselwirkungen zwischen Reifen und Fahrbahn: Ursachen, Wirkungen und Erklärungen lokaler Kontaktphänomene”, 2009
- F. Gutzeit  
“Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum dynamischen Rollkontakt von Elastomeren”, 2009
- C. Potthast  
“Numerische und experimentelle Untersuchung eines Ultraschall-Schlagbohrwerkzeugs”, 2009
- F. Schiedeck  
“Entwicklung eines Modells für Formgedächtnisaktoren im geregelten dynamischen Betrieb”, 2009
- M. Neubauer  
“Schwingungsdämpfung mit beschalteten Piezoelementen am Beispiel einer quietschenden Scheibenbremse”, 2008
- L. Bellmann  
“Untersuchungen zu den viskoelastischen Eigenschaften von Bremsbelägen im Parameterbereich des Bremsenquietschens”, 2008
- H. R. Zarei  
“Experimental Investigation of Crash Structures Using Aluminium Alloys”, 2008

#### Liste der von Prof. Wallaschek in Paderborn betreuten Promotionen und Habilitationen

- K. Meissner  
“Reduzierung der Belastung der Chips beim Ultraschall-Flip-Chip-Bonden durch zweiachsige Anregung”, 2011
- R. Król  
“Eine Reduktionsmethode zur Ableitung elektromechanischer Ersatzmodelle für piezoelektrische Wandler unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)”, 2010
- S. Raphael  
“Characterization of Mesopic Vision for Luminance Photometry”, 2010
- B. Richter  
“Modellbasierter Entwurf resonant betriebener, piezoelektrischer Biegeschwinger in Energy Harvesting Generatoren”, 2010
- M. Mracek  
“Untersuchung des dynamischen Verhaltens gekoppelter piezoelektrischer Ultraschallmotoren mit Stoßkontakt”, 2010
- S. Zhao  
“Investigation of Non-contact Bearing Systems Based on Ultrasonic Levitation”, 2010
- S. Wedmann  
“Lebensdauerüberwachung in mechatronischen Systemen”, 2009

- T. Müller  
“Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme”, 2009
- A. Reeg  
“Entwicklung und Aufbau eines fahrbaren Labors zur Demonstration und Bewertung innovativer Innenlichtkonzepte”, 2009
- M. Brökelmann  
“Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik”, 2009
- N. Neumann  
“Analyse nicht-glatte dynamischer Systeme mit mengenorientierten Methoden am Beispiel eines Ultraschall-Stoßbohrsystems”, 2008
- S. Strauss  
“Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung”, 2007
- S. Völker (Habilitation)  
“Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern”, 2007
- T. Brandt  
“A predictive potential field concept for shared vehicle guidance”, 2007
- M. Hiller  
“Correlation between Parameters of the Tribosystem and Automotive Disc Brake Squeal”, 2006
- R. Kauschke  
“Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern”, 2006
- P. Kuhl  
“Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichts an den vertikalen Straßenverlauf”, 2006
- S. Halfmeier  
“Modellierung und Regelung von Halbtoroidvarioren in leistungsverzweigten Getriebestrukturen”, 2006
- K. Mahmoud  
“Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor”, 2005
- B. Fu  
“Entwurf piezoelektrischer Aktoren mittels Mehrzieloptimierungsverfahren”, 2005
- J. Roslak  
“Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums”, 2005
- S. Henzler  
“Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator”, 2004
- H. Storck  
“Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren”, 2003

- W. Wickord  
“Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den fruehen Phasen des Systementwurfs”, 2003
- W. Littmann  
“Piezoelektrische, resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen”, 2003
- E. Fründ  
“Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen”, 2003
- S. Goldschmidt  
“Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurfuehrungsdynamik von Schienenfahrzeugen”, 2003
- H. Kemmer  
“Investigation of the Friction Behavior of Automotive Brakes through Experiments and Tribological Modeling with Application for the Prediction of Brake Noise Generation”, 2002
- T. Hemsel  
“Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezo-elektrischer Schwingungsantriebe”, 2001
- A. Henke  
“Modellbildung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme”, 2001
- H. Vroomen  
“Zur Anwendung von Plattenschwingungen bei resonanten Sensoren”, 2000
- T. Börnchen  
“Zur Entwicklung dynamischer Komponenten fuer variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht”, 2000
- G. Poetsch  
“Untersuchung und Verbesserung numerischer Verfahren zur Simulation von Stromabnehmer-Kettenwerk-Systemen”, 2000
- M. Kuemmel  
“Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen”, 1999
- J. Krome  
“Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren fuer piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellenmotoren”, 1999
- P. Rehbein  
“Tribologische Untersuchungen von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten fuer den Einsatz in reibkraftschluessigen Antrieben”, 1998
- K. Petri  
“Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen”, 1996

#### Liste der von Prof. Popp in Hannover betreuten Promotionen und Habilitationen

- F. Götting  
“Analyse des Schwingungsverhaltens von verstimmten Beschaufelungen mit Reibelementen”, 2005
- M. Lindner  
“Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung an Profilklotzen und Dichtungen”, 2005

- A. Michaelsen  
"Konzeption und Regelung eines treppengängigen Rollstuhls", 2005
- L. Panning  
"Auslegung von Reibelementen zur Schwingungsdämpfung von Turbinenschaufeln", 2005
- J.-U. Bruns  
"Detektion und Identifikation von Nichtlinearitäten in mechanischen Schwingungssystemen", 2004
- M. Rottmann  
"Zum Stabilitätsverhalten von Einzelprofilen und Rohrbündeln bei turbulenter Anströmung", 2004
- M. Ruskowski  
"Aufbau und Regelung aktiver Magnetführungen", 2004
- C. Scholz  
"Fahrzeugautarkes Ortungssystem für Lokomotiven auf der Basis schlupfbehafteter Wegmessung", 2003
- H. Kruse  
"Modellgestützte Untersuchung der Gleisdynamik und des Verhaltens von Eisenbahnschotter", 2002
- H. Reckmann  
"Aktive Schwingungsreduktion an einem elastischen Fahrweg unter bewegter Masse", 2002
- I. Hachmann  
"Modellgestützte Detektion von Rissen in Turborotoren", 2001
- W. Sextro (Habilitation)  
"Dynamical Contact Problems with Friction: Models, Methods, Experiments and Applications", 2001
- S. Kapitzke  
"Bestimmung fahrdynamischer Daten auf Schienenfahrzeugen anhand des Verlaufes von Zugfahrten", 2001
- M. Kröger  
"Methodische Auslegung und Erprobung von Fahrzeug-Crashstrukturen", 2001
- M. Oestreich  
"Untersuchung von Schwingern mit nichtglatten Kennlinien", 1998
- O. Romberg  
"Zum Turbulenzeinfluß auf das Schwingungsverhalten querangeströmter Rohrbündel", 1998
- T. Frischgesell  
"Modellierung und Regelung eines elastischen Fahrweges", 1997
- N. Hinrichs  
"Reibungsschwingungen mit Selbst- und Fremderregung: Experiment, Modellierung und Berechnung", 1997
- W. Sextro  
"Schwingungsverhalten von Schaufelkränzen mit Reibelementen bei Frequenzverstimmung", 1997
- K.-D. Tieste  
"Mehrgrößenregelung und Parameteridentifikation einer Linear-Magnetführung", 1997
- T. Treyde  
"Modellierung des Kontaktes zwischen den Deckplatten von Turbinenschaufeln", 1995

- M. Jahnke  
“Ein Beitrag zur Untersuchung elastischer Mehrkörpersysteme unter Nutzung von Finite-Elemente-Software”, 1994
- R. Austermann  
“Zum Schwingungsverhalten querangeströmter Rohrbündel bei Anregung vom Galloping-Typ”, 1993
- B. Balmer  
“Erhöhung der Dämpfung von Turbinen durch Reibelemente”, 1993
- H. Lindner  
“Untersuchungen zum Turbulenzeinfluß auf die Galloping-Schwingungen rechteckiger prismatischer Körper”, 1993
- H. Liu  
“Zum statischen und dynamischen Verhalten einer Zylinderschale mit kreisförmigem Ausschnitt bei Innendruck”, 1993
- A. Ducci  
“Identifikation strömungselbsterregter Schwingungssysteme”, 1992
- P. W. Blohm  
“Untersuchung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens von Strukturen mit lokalen Fügestellen”, 1991
- U. Fingberg  
“Ein Modell für das Kurvenquietschen von Schienenfahrzeugen”, 1990
- D. Hartmann  
“Rißformidentifikation an Rotoren mit Hilfe der Gleichstrom-Potentialmethode”, 1990
- K. Klamt  
“Zur optimalen Schwingungsdämpfung durch trockene Reibung in lokalen und ausgedehnten Fügestellen”, 1990
- P. Stelter  
“Nichtlineare Schwingungen reibungserregter Strukturen”, 1990
- E. de Mesquita Neto  
“Zur dynamischen Wechselwirkung von Fundamenten auf viskoelastischem Halbraum”, 1989
- M. Andjelic  
“Stabilitätsverhalten querangeströmter Rohrbündel mit versetzter Dreiecksverteilung”, 1988
- L. Czerny  
“Analyse instationärer Zufallsschwingungen”, 1987
- N. Petersmann  
“Substrukturtechnik und Kondensation bei der Schwingungsanalyse”, 1985
- E. Schneider  
“Schwingungsverhalten und Schallabstrahlung von Schienenrädern”, 1985
- H. Wißbrock  
“Untersuchungen zur Fugendämpfung zusammengesetzter Bauteile”, 1985
- H. Windrich  
“Zur Untersuchung stochastisch parameter- und fremderregter linearer Systeme”, 1984

## 5.2 IDS Schriftenreihe

1. **Experimentelle und modellbasierte Untersuchung der Reibmechanismen von Reifenprofilklotzproben auf rauen Fahrbahnoberflächen**  
Torben Marhenke 173 S., 65 Abb., ISBN: 978-3-95900-488-6, Band 02/2020
2. **Regelung von Kavitationsprozessen mittels Self-Sensing Kavitationsdetektion**  
Kai-Alexander Saalbach 132 S., 62 Abb., ISBN 978-3-95900-455-8, Band 01/2020
3. **Untersuchung der Kraftübertragung lamellierter Reifenprofilklötze auf Schneefahrbahnen**  
Tim Linke 148 S., 65 Abb., ISBN 978-3-95900-348-3, Band 06/2019
4. **Gerichtete Lichtsignale zur personalisierten Kommunikation automatisierter Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmern**  
Jan-Henning Willrodt 192 S., 57 Abb., ISBN 978-3-95900-347-6, Band 05/2019
5. **Untersuchung des Einflusses der Ultraschall-Kavitation in kleinen Spalten auf die Oberflächeneigenschaften**  
Fushi Bai 120 S., 71 Abb., ISBN 978-3-95900-329-2, Band 04/2019
6. **Untersuchungen zu den Mechanismen des Ultraschall-Drahtbondens**  
Yangyang Long 136 S., 89 Abb., ISBN 978-3-95900-327-8, Band 3/2019
7. **Simulation dynamischer Kontakte mittels linearem Komplementaritätsproblem und fraktionaler Viskoelastizität**  
Michael Burgwitz 104 S., 55 Abb., ISBN 978-3-95900-308-7 Band 02/2019
8. **Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Validierung einer Mischreibungssimulation**  
Sebastian Fricke 155 S., 90 Abb., ISBN 978-3-95900-246-2, Band 01/2019
9. **Mechanische und piezoelektrische Tilger zur Schwingungsminderung - Habilitation**  
Marcus Neubauer 312 S., 125 Abb., ISBN 978-3-95900-244-8, Band 02/2018
10. **Theoretical and experimental studies on the effectiveness of broadband piezoelectric energy harvesters under volume constraints**  
Noha Aboulfotoh 144 S., 88 Abb., ISBN 978-3-95900-219-6, Band 01/2018
11. **Differentiation of Soft Biological Tissues and Phantoms using a Piezoelectric Tactile Sensor for Applications in Brain Tumor Resection**  
David Oliva Uribe 144 S., 42 Abb., ISBN 978-3-95900-151-9, Band 06/2017
12. **Experimentelle und modellbasierte Untersuchung der Reibmechanismen von Reifenprofilklotzproben auf rauen Fahrbahnoberflächen**  
Hagen Lind 112 S., 64 Abb., ISBN 978-3-95900-143-4, Band 05/2017
13. **Transiente Amplitudenüberhöhung bei verstimmtten Turbinenbeschaufelungen**  
Marius Bonhage 126 S., 61 Abb., ISBN 978-3-95900-138-0, Band 04/2017
14. **Theoretische und experimentelle Untersuchung der parasitären Modenkopplung an Ultraschallwerkzeugen**  
François Brouet 192 S., 99 Abb., ISBN 978-3-95900-135-9, Band 03/2017
15. **Schwingungsverhalten verstimmtter zyklischer Systeme und deren Optimierung durch bewusste Verstimmung**  
Linus Pohle 116 S., 39 Abb., ISBN 978-3-95900-132-8, Band 02/2017
16. **Modellierung und Analyse von Wanderwellen in Hohlzylindern beim Ultraschall-Wanderwellen transport von Schüttgütern**  
Andreas Renner 196 S., 101 Abb., ISBN 978-3-95900-120-5, Band 01/2017

17. **Untersuchung von elektrodynamischen Mikroskannern zur Darstellung von Lichtsymbolen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung**  
Joscha Roth 142 S., 49 Abb., ISBN 978-3-95900-117-5, Band 09/2016
18. **Laserscheinwerfer für adaptive Fahrlichtfunktionen im Kfz**  
Benjamin Willeke 253 S., 91 Abb., ISBN 978-3-95900-112-0, Band 08/2016
19. **Entwicklung eines Advisors zur Berechnung von Stabilitätskarten für laterale Schwingungen in Tiefbohrsträngen**  
Henrik Westermann 162 S., 47 Abb., ISBN 978-3-95900-111-3, Band 07/2016
20. **Experimentelle Identifikation und theoretische Abschätzung von Strukturdämpfungswerten**  
Olaf Peter Hentschel 162 S., 71 Abb., ISBN 978-3-95900-107-6, Band 06/2016
21. **Das dynamische Verhalten von alternierend verstimmtten Schaufelkränzen mit Reibelementkopplung**  
Sebastian Tatzko 144 S., 71 Abb., ISBN 978-3-95900-097-0, Band 05/2016
22. **Experimentelle und modellbasierte Untersuchung des dynamischen Verhaltens pseudoelastischer Formgedächtnislegierungen**  
Jonas Böttcher 160 S., 84 Abb., ISBN 978-3-95900-090-1, Band 04/2016
23. **Development of a Numerically Efficient Model for the Dynamics of Revolute Clearance Joints in Adjustable Stator Cascades**  
Daniel Schurzig 144 S., 71 Abb., ISBN 978-3-95900-082-6, Band 03/2016
24. **Dynamik von Ultraschallschwingern mit Stoßkontakt**  
Wiebold Wurpts 124 S., 51 Abb., ISBN 978-3-95900-080-2, Band 02/2016
25. **Schwingungsdämpfung zyklisch-symmetrischer Strukturen durch beschaltete Piezowandler**  
Sebastian Marc Schwarzendahl 158 S., 49 Abb., ISBN 978-3-95900-078-9, Band 01/2016
26. **Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlichtsystems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nassen Fahrbahnen**  
Jorne Fischer 190 S., 97 Abb., ISBN 978-3-95900-034-5, Band 03/2015
27. **Modulare Modellierung und Synthese virtueller Fahrzeuginnengeräusche**  
Jörg Bräuer 154 S., 49 Abb., ISBN 978-3-95900-013-0, Band 02/2015
28. **Modellierung zyklischer Strukturen mit Unsicherheiten und theoretische Betrachtung der Energielokalisierung in verstimmtten Schaufelkränzen**  
Andreas Hohl 187 S., 88 Abb., ISBN 978-3-95900-009-3, Band 01/2015
29. **The Concept of Nonlinear Modes Applied to Friction-Damped Systems**  
Malte Krack 144 S., 42 Abb., ISBN 978-3-944586-95-3, Band 05/2014
30. **Untersuchung geregelter Pneumatikaktoren für eine aktive Fahrerhauslagerung zur Minimierung von Humanschwingungen**  
Christian Graf 167 S., ISBN 978-3-944586-85-4, Band 04/2014
31. **Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz der Wirbelstromdämpfung zur Reduktion von Turbinenschaufelschwingungen**  
Jacob Laborenz 175 S., 40 Abb., ISBN 978-3-944586-79-3, Band 03/2014
32. **Robuste Auslegung von mobilen Brennstoffzellensystemen**  
Mark Hellmann 148 S., 76 Abb., ISBN 978-3-944586-73-1, Band 02/2014

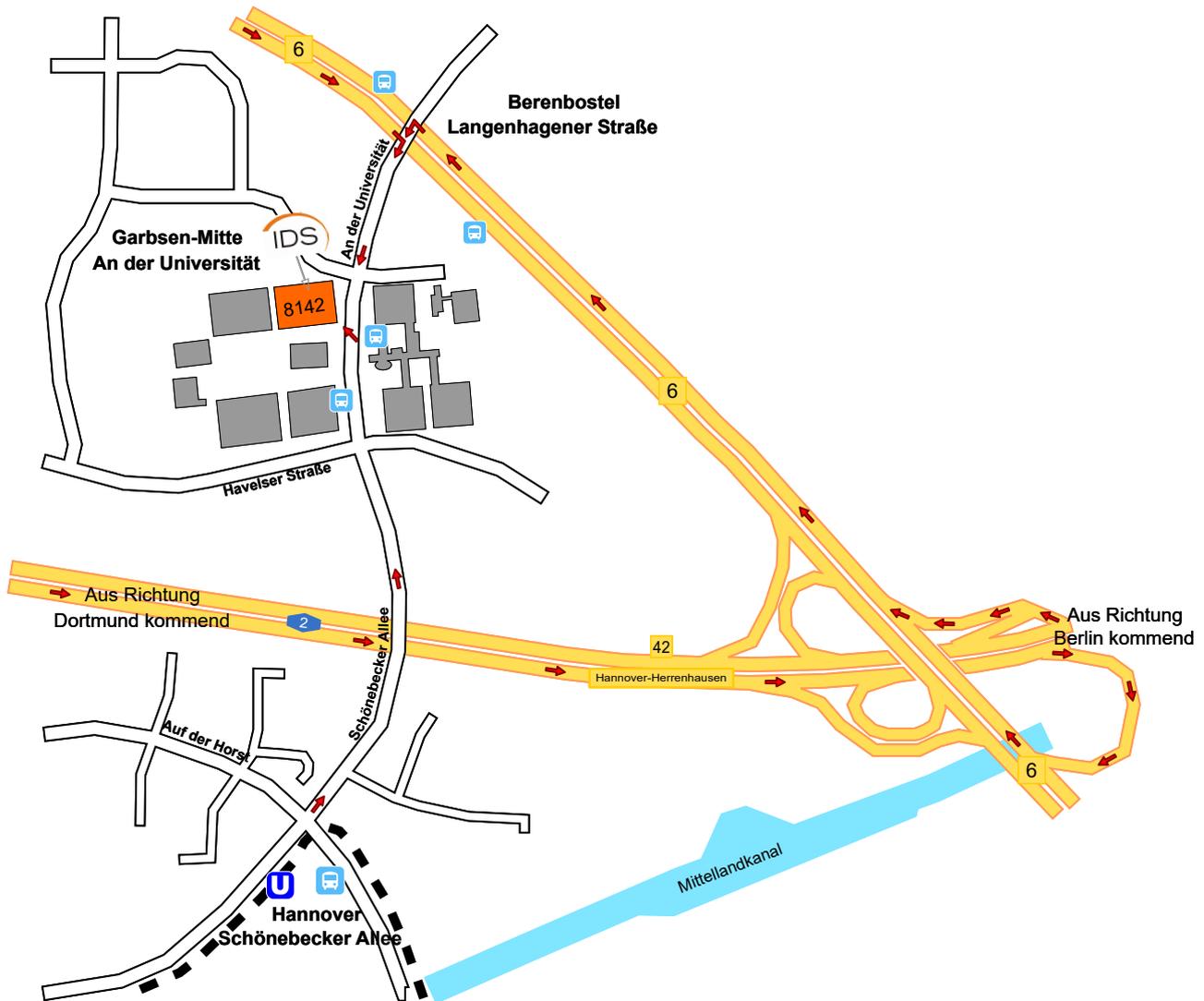
33. **Experimentelle Untersuchung und modulare Modellierung der Dynamik von PKW-Scheibenwischersystemen**  
Philipp Grönefeld 121 S., 63 Abb., ISBN 978-3-944586-42-7, Band 01/2014
34. **Model-Based Poling of Piezoelectric Monolithic Ring Elements for Ultrasonic Torsional Transducers**  
Minghui Huang 108 S., 73 Abb., ISBN 978-3-944586-24-3, Band 06/2013
35. **Proceedings of 10th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications and 8th Energy Harvesting Workshop**  
Jörg Wallaschek, Jens Twiefel, Linus Pohle (Hrsg.), 239 S., ISBN 978-3-944586-10-6, Band 05/2013
36. **Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Reifensimulation auf digitale Lastkollektivaussagen**  
Steven Lange 96 S., 60 Abb., 978-3-943104-98-1, Band 04/2013
37. **Entwicklung eines Fußgängererkennungssystems für das Markierende Licht auf Basis einer Fusion von Nah- und Ferninfrarotkameras**  
Hendrik Honsel 197 S., 85 Abb., 978-3-943104-96-7, Band 03/2013
38. **Investigation and Development of Piezoelectric Synchronized Switch Shunt Damping on Inductor Technique**  
Xu Han 132 S., 68 Abb., 978-3-943104-89-9, Band 02/2013
39. **Experimental Investigation and Modeling of Tire Tread Block Friction on Ice**  
Stefan Ripka 121 S., 73 Abb., 978-3-943104-85-1, Band 01/2013
40. **Untersuchungen zu Reibmechanismen an Pneumatikdichtungen**  
Matthias Wangenheim 140 S., 79 Abb., ISBN 978-3-943104-63-9, Band 01/2012
41. **Modellbasierte Untersuchung von Stehwellenantrieben**  
Jens Twiefel 175 S., 96 Abb., ISBN 978-3-941416-83-3, Band 05/2010
42. **Investigation of Non-contact Bearing Systems Based on Ultrasonic Levitation**  
Su Zhao 113 S., Bericht in Englisch, ISBN 978-3-941416-70-3, Band 04/2010
43. **Aktive Schwingungsreduktion durch Magnetführungen**  
Cord-Christian Neuber 117 S., 90 Abb., ISBN 978-3-941416-54-3, Band 03/2010
44. **Aktive Schwingungsminderung an gekoppelten Zylindern in Rollenoffsetdruckmaschinen mittels piezokeramischer Aktoren an den Lagerstellen**  
Ralf Christel 182 S., ISBN 978-3-941416-45-1, Band 02/2010
45. **Modellierung und experimentelle Parameteridentifikation nichtlinearer Reibkontakte bei Turbinenschaufeln**  
Annika Bürge 96 S., 56 Abb., ISBN 978-3-941416-41-3, Band 01/2010
46. **Beobachtung und Modellierung lokaler Phänomene im Reifen-Fahrbahn-Kontakt**  
Gunnar Simon Gäbel 147 S., 85 Abb., gebunden, ISBN 978-3-941416-29-1, Band 05/2009
47. **Numerische und experimentelle Untersuchung eines Ultraschall-Schlagbohrwerkzeugs**  
Christian Potthast 207 S., 152 Abb., gebunden, ISBN 978-3-941416-28-4, 04/2009
48. **Entwicklung eines Modells für Formgedächtnisaktoren im geregelten dynamischen Betrieb**  
Florian Schiedeck, 130 S., 112 Abb., gebunden, ISBN ISBN 978-3-941416-23-9, Band 03/2009
49. **Schwingungsdämpfung mit beschalteten Piezowandlern und Anwendung zur Unterdrückung von Bremsenquietschen**  
Marcus Neubauer 197 S., 116 Abb., gebunden, ISBN 978-3-941416-13-0, Band 02/2009

50. **Untersuchungen zu den viskoelastischen Eigenschaften von Bremsbelägen im Parameterbereich des Bremsenquietschens**

Lutz Bellmann 150 S., 74 Abb., gebunden, ISBN 978-3-941416-12-3, Band 01/2009

Die aufgeführten Publikationen sind erhältlich unter: <http://www.tewiss-verlag.de/>

## 6 Anfahrt



- **Anreise mit dem PKW:**  
Aus Richtung Berlin/Dortmund auf der A2: Nutzen Sie die Ausfahrt 'Hannover Herrenhausen' in Richtung Garbsen. Folgen Sie der B6 bis zur Kreuzung Bremer Straße/ An der Universität. Dort biegen Sie in die Straße 'An der Universität' ein. Aus Richtung Hannover/Nienburg auf der B6: Fahren Sie auf der B6 in Richtung Garbsen/ Nienburg bis zur Kreuzung Bremer Straße/ An der Universität. Dort biegen Sie in die Straße 'An der Universität' ein.
- **Anreise mit der Bahn:**  
Vom HBF Hannover zu Fuß in Richtung 'Kröpcke'. Von der Bahnstation 'Kröpcke' nutzen Sie die Linie 4 Richtung Garbsen und Fahren bis zur Haltestelle 'Schönebecker Allee'. Von dort verkehrt ein Bus mit der Nummer 404, der Sie direkt an den Campus Maschinenbau Garbsen und somit an das IDS bringt, oder weiter zu Fuß gemäß Lageplan (ca. 10 Minuten).

# 7 Impressum

---

## Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek  
Institut für Dynamik und Schwingungen  
An der Universität 1  
30823 Garbsen  
Germany

## Redaktion

Daria Otto, M. Sc.

## Layout

Dipl.-Ing. A. Renner, Dipl.-Ing. I. Gorelik, Daria Otto, M. Sc.



# Institut für Dynamik und Schwingungen Leibniz Universität Hannover



Institut für Dynamik und Schwingungen  
Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek

An der Universität 1  
30823 Garbsen  
Germany

[www.ids.uni-hannover.de](http://www.ids.uni-hannover.de)

☎ +49(0)511/762-4161

FAX +49(0)511/762-4164