

**Martin Wiedemann, Tobias Melz (Hrsg)**

# **Smarte Strukturen und Systeme**

**TAGUNGSBAND  
DES 4SMARTS-SYMPOSIUMS  
21.–22. JUNI 2017, BRAUNSCHWEIG**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Umschlagabbildung: DLR

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5083-7

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 9596 - 0 • Telefax: 02407 / 9596 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## VORWORT

Im Zentrum der 4SMARTS-Konferenz stehen intelligente, adaptive und aktive – kurz: smarte – Strukturen und Systeme. Diese finden zunehmend Eingang in neue Produkte vieler Branchen, denn sie bieten Mehrwerte wie z. B. die Anpassungsfähigkeit an veränderliche Betriebszustände, eine Funktionserweiterung durch Integration von Sensoren, Aktoren und Generatoren oder eine höhere Schalldämmung bei gleichem Systemgewicht. So mindern smarte Systeme Schwingungen und Lärm, verbessern den Komfort, eröffnen zusätzliche Leichtbaupotenziale, überwachen und steigern die Lebensdauer und Sicherheit mobiler und stationärer maschinenbaulicher Strukturen wie Autos oder Bauwerke.

Wichtiger denn je für den Markterfolg smarterer Strukturen und Systeme sind effiziente und industrieorientierte Kooperationen und funktionierende Ketten von Forschung und Entwicklung über die technische Umsetzung und Produktion hin zur systemtechnischen Nutzung. Aus diesem Grund lautet das Motto der 4SMARTS: „Innovation durch fokussierte Vernetzung von Forschung und Anwendung.“

Die Themenschwerpunkte der 4SMARTS bilden einen Dreiklang aus den Technologiefeldern, der Anwendung und dem Technologietransfer smarterer Strukturen und Systeme. Ausgehend vom Material über die Auslegung von Bauteilen und die Integration von Funktionen bis hin zur Zuverlässigkeit komplexer Systeme werden alle relevanten Technologiefelder adressiert. Neben den klassischen Anwendungsfeldern der aktiven Schwingungs-, Schall- und Gestaltkontrolle, findet auch das Thema Structural Health Monitoring (SHM) Beachtung. Der Technologietransfer beleuchtet sowohl Fragestellungen zur Systemintegration, Validierung und Test als auch Geschäftsmodelle und Wirtschaftlichkeit smarterer Strukturen und Systeme.

Das vorliegende Buch umfasst die Beiträge des Symposiums „4SMARTS“, das im Juni 2017 in Braunschweig stattfand.

Wissenschaftliche Schirmherren der Veranstaltung waren das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF mit seinem Forschungsbereich Adaptronik.

Wir freuen uns, wenn wir Ihnen mit diesem Buch neue Anregungen für die Forschung und den Einsatz smarterer Strukturen und Systeme in Produkten der nächsten Generation geben können.

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

## **BEIRAT**

Prof. Dr.-Ing. Horst Baier  
Technische Universität München

Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel  
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Dr. phil. nat. Ursula Eul  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Karkosch  
ContiTech Vibration Control GmbH

Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering  
Helmut-Schmidt-Universität Universität der Bundeswehr Hamburg

Dr.-Ing. Dirk Mayer  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring  
Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Dipl.-Ing. Dr. Manfred Nader  
LCM Linz Center of Mechatronics GmbH

Dipl.-Ing. Klaus Osterhage  
Adam Opel AG

Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht  
Technische Universität Darmstadt

Dr. rer. nat. Andreas Schönecker  
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke  
Universität des Saarlandes

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius  
Technische Universität Braunschweig

Dipl.-Ing. Friedrich von Dungern  
Invent GmbH

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

# GLIEDERUNG

## Kapitel 1 – Structural Health Monitoring

|   |     |
|---|-----|
| <b>Ein interdisziplinärer Ansatz zur intelligenten FVK Welle</b><br><i>(Andreas Preisler, Kai-Uwe Schröder)</i>   | 15  |
| <b>Schadenslokalisierung mit Lambwellen in komplexen Faserverbundstrukturen</b><br><i>(Florian Raddatz, Peter Wierach, Michael Sinapius)</i>  | 27  |
| <b>Direkte Messung des elektrischen Widerstands zur Schadensdetektion in anisotropen CFK Laminaten / Direct measurement of the electrical resistance for damage detection in anisotropic CFRP laminates</b><br><i>(Susanne Hörrmann, Martin Schagerl, Max Cichocki, Christoph Kralovec)</i> | 39  |
| <b>Zustandserfassung von strukturellen Klebverbindungen mittels faseroptischen Sensoren</b><br><i>(Martin Ganß, Johannes Barnickel, Michael Kuhne, Heiko Beinertsdorf, Jörg Hildebrand, Jean Pierre Bergmann, Carsten Könke)</i>  | 51  |
| <b>Integrierte Strukturüberwachung sicherheitsrelevanter Fahrzeugkomponenten aus kohlefaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen</b><br><i>(Kilian Tschöke, Tobias Gaul, Friedrich von Dungern, Lars Schubert)</i>   | 63  |
| <b>Impact damage detection and localization in adhesively bonded fiber reinforced structures using silver nanoparticle based ink</b><br><i>(Till Augustin, Julian Karsten, Bodo Fiedler)</i>  | 73  |
| <b>Dünnbesetzte Lösungstechniken für Last- und Schadensüberwachungssysteme</b><br><i>(Claus-Peter Fritzen, Daniel Ginsberg)</i>   | 83  |
| <b>Entwicklung eines SHM-Systems für Gründungsstrukturen von Offshore Windenergieanlagen – Großversuche zum Monitoring von globaler Struktur und Grout-Fuge</b><br><i>(Herbert Friedmann, Moritz Häckell, Peter Kraemer)</i>  | 95  |
| <b>Anwendung einer Mustererkennung auf transiente Körperschallsignale</b><br><i>(Johann Harmstorf, Rolf Klemm, Karl-Ludwig Krieger)</i>   | 105 |

## **Kapitel 2 – Neue Materialien und Strukturen**

- Realisierung von smarten Strukturen mit sensorischer Funktion durch Integration elektromagnetischer Resonatoren in hybride Materialien**  
*(Toni D. Großmann, Melinda Hartwig, Christina Symmank, Anja Schmidt, Martin Schüller, Steffen Kurth, Uwe Götze, Reinhard R. Baumann, Thomas Otto)* 119
- Selbstabdichtendes Beschichtungssystem als Korrosionsschutzschicht für metallische Substrate**  
*(Christina Eloo, Katrin Braesch)* 131
- Sensorische Dünnschichtsysteme für die Produktion**  
*(Saskia Biehl, Nancy Paetsch, Eike Meyer-Kornblum)* 139
- Integrierte piezokapazitive Dünnschichtsensoren für mechanisch hochbelastete Bauteile**  
*(Eike Meyer-Kornblum, Saskia Biehl, Nancy Paetsch)* 147

## **Kapitel 3 – Aktive Gestaltkontrolle**

- Konzipierung, Auslegung und Vermessung einer formveränderlichen Hinterkante für ein Windenergie rotorblatt**  
*(Martin Pohl, Johannes Riemenschneider)* 155
- Aktive Steuerung der Folienkrümmung in aerodynamischen Folienlagern mittels Flächenaktuatoren**  
*(Hossein Sadri, Henning Schlums, Pirim Kruse, Michael Sinapius)* 167
- Materialintegriertes Protagonist-Antagonist-System auf Basis von Faser-verbundwerkstoffen & Formgedächtnislegierungen – Aktorik ohne Gelenke und Kupplungen**  
*(Sebastian Nissle, Nicolà Hammann, Moritz Hübler, Martin Gurka)* 179

## Kapitel 4 – Neue Aktorik / Sensorik

- Herausforderungen und Lösungsansätze für hochdynamische Aktuatoren auf Basis magnetischer Formgedächtnislegierungen**  
*(Christian Titsch, Irina Molodtsova, Simon Kimme, Welf-Guntram Drossel)* 189
- Optimierung und Untersuchung des Schichtverbunds von dünnsschichtigen DE- Stapelwandlern**  
*(Helge Bochmann, Jürgen Maas)* 201
- Anforderungen an Formgedächtnisaktoren und Untersuchung der dynamischen Eigenschaften dieser für den Einsatz in einem akkubetriebenen System**  
*(Sebastian Horn, Sven Matthiesen)* 213
- Validierung des Marktpotentials von Aktoren auf Basis von Formgedächtnislegierungen in den Anwendungsfeldern Automobil-, Automatisierungs- und Schließgerätetechnik**  
*(Alexander Czechowicz, Peter Dültgen, Sven Langbein)* 225
- Sprayable sensitive coatings utilizing the piezoresistive effect of Graphene Nano Platelets network and their application in field of smart structures**  
*(Volkan Yokaribas, Daniel S. Schneider, Jasper Ruhkopf, Stefan Wagner, Max C. Lemme, Claus-Peter Fritzen)* 235
- A fiber-optic sensor for measuring quasi-static and unsteady pressure on wind energy converters**  
*(Markus J. Schmid, Bernd A. Kuhnle, Sascha U. Kienitz, Christian F. Napierala, Christoph Scheit, Andree Altmikus, Mathias S. Müller, Alexander W. Koch)* 247
- Entwicklung, Aufbau und Validation eines durch einen dielektrischen Elastomer-Membran Aktor angetriebenen elektrischen Schützes**  
*(Philipp Linnebach, Filomena Simone, Stefan Seelecke)* 257
- Development of an SMA based Smart Positioning Actuator**  
*(Marius Brill, Philipp Loew, Paul Motzki, Stefan Seelecke)* 269
- Funktionsintegrierte Sensorik zur kontaktlosen Medienerfassung in automobilen Flüssigkeitsbehältern**  
*(Jakob Happel, Jakob Döring, Karl-Ludwig Krieger, Jonas Deitschun, Dirk Godlinski)* 279



## **Kapitel 5 – Funktionsintegration**

### **Fehlermeldesystem beim digitalen Textildruck**

*(Hyunji Park, Fabian Schreiber, Kyung Shin, Michael Min,  
Yves-Simon Gloy, Thomas Gries)*

293

### **Zur Entwicklung von gedruckten, faserverbundintegrierten Sensoren**

*(Daniel von Bernstorff, Bodo Fiedler)*

305

### **Integration von minimalinvasiven Sensoren in Faserkunststoffverbunde zur Herstellungsprozesskontrolle und Zustandsüberwachung**

*(Michael Koerdt, Martina Hübner, Maryam Kahali Moghaddam,  
Walter Lang, Axel Siegfried Herrmann)*

315

## **Kapitel 6 – Aktive Schwingungs- und Schallbeeinflussung**

### **Lärmreduktion in Flugzeugen mit aktiven Linings**

*(Malte Misol, Thomas Haase, Stephan Algermissen, Veatriki Papantoni,  
Hans Peter Monner)*

329

### **Piezoelektrische Inertialmassenaktoren zur aktiven Schwingungsreduktion von Zahneingriffsschwingungen im Kilohertzbereich**

*(Philipp Zech, Daniel F. Plöger, Roman Kraus, Stephan Rinderknecht)*

341

### **Eine adaptive Primärfeder als Teil des Einzelradlaufwerks des Next Generation Trains**

*(Ralf Keimer)*

353

## **Kapitel 7 – Modellierung, Simulation und Optimierung smarter Strukturen und Systeme**

- Virtuelle Funktionstests direkt auf CT-Scans**  
*(Christof Reinhart, Johannes Fieres, Stefan Rieth-Hoerst)* 365
- Optimales Design von piezoelektrisch aktuierten Gesamtsystemen**  
*(Daniel Reischl, Manfred Nader, Ralf Kobler, Günther Weidenholzer, Johannes Wenninger, Alexander Reininger)* 369
- An approach for the design of a mechanical Hardware-in-the-Loop interface**  
*(Jonathan Millitzer, Christopher Ranisch, Christoph Tamm, Riccardo Bartolozzi, Tobias Melz)* 379
- Adaptive hydrodynamische Lager**  
*(Maximilian Neitmann, Holger Ittenson, Naser Al Natsheh, Michael Sinapius, Dirk Bartel)* 391

## **Kapitel 8 – Technologietransfer**

- Integrierte Geschäftsmodell- und Technologieentwicklung für smarte Systeme und Strukturen**  
*(Uwe Götze, Christina Symmank, Anja Schmidt, Toni D. Großmann, Martin Schüller, Steffen Kurth, Thomas Otto)* 401
- Mechatronisches Therapie- und Reha-Assistenzsystem**  
*(Hans-Christian Möhring, Falco Edner, Alexander Neu)* 415
- Adaptives tribologisches System**  
*(Naser Al Natsheh, Maximilian Neitmann, Kai Temmen, Michael Sinapius)* 427
- Industrial IoT: Potentiale für die dezentrale Schwingungsdiagnose**  
*(Jannes Kloepfer, Michael Koch, Torsten Bartel, Andreas Friedmann)* 435
- Werkzeugintegrierte Sensorik zur Prozessüberwachung in der Zerspanung**  
*(André Bucht, Martin Ettrichrätz, Sylvia Gebhardt, Mandy Höhn)* 449
- Autorenverzeichnis** 462