

Interregionale Ringvorlesung, Einführung, 14.04. 2020:

S. Bosse, D. Lehmhus et al.

Sensorische Materialien – Schadensdetektion in Hybridmaterialien.



## **Einleitung.** Übersicht.

- Organisatorisches und Hintergründe.
- Einleitung: Werkstoffe, die ihren Zustand kennen.
- Materialintegration: Ansätze.
- Materialintegration: Herausforderungen.
- Anwendungsbeispiel Strukturüberwachung (SHM).
- Hybride Werkstoffe: Thema der Forschergruppe FORHYB.
- Zusammenfassung, Ausblick
- Ankündigungen



#### Organisatorisches und Hintergründe.

## 04-326-WP-01 Interregionale Ringvorlesung: Sensorische Materialien – Schadensdetektion

- Stefan Bosse, Dirk Lehmhus, Forschungsgruppe DFG FOR3022
- ECTS: 3, SWS: 2, Start: 20.4.2020 (Online)
- Weitere Informationen (und Videos): http://edu-9.de/Lehre/sm2k
- Material f
  ür Selbststudium: VL-Video, Wiki/Chat
- Interaktion mit Studierenden:
   Wiki, Chat/Forum, (Video-)Konferenz
- Prüfungsform ohne Präsenz:
   Hausarbeit (Exposé zu einem der Vortragsthemen)



# Organisatorisches und Hintergründe. Forschungsgruppe DFG FOR 3022

Titel: "Ultrasonic Monitoring of Fibre Metal Laminates (FML)

**Using Integrated Sensors**"

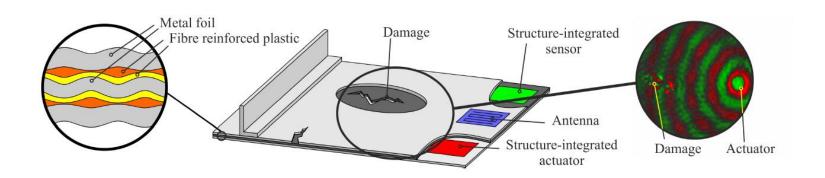
Partner:





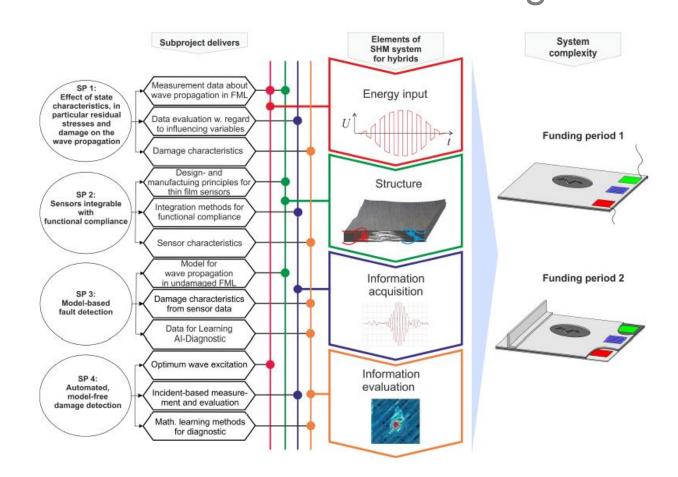








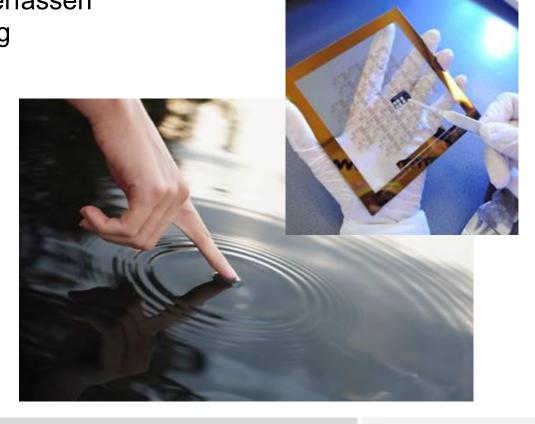
### Organisatorisches und Hintergründe. FOR 3022: Ultrasonic Monitoring of FMLs





#### Vision Sensorische Materialien.

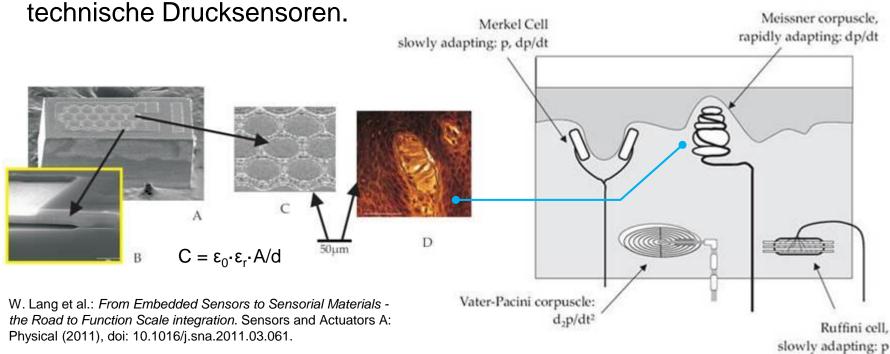
"Sensorische Materialien erfassen Daten über ihre Umgebung und/oder ihren eigenen Zustand. Sie verarbeiten diese Daten lokal und nutzen die gewonnenen Informationen intern oder kommunizieren sie nach außen."





#### Materialien, die fühlen können.

Taktile Wahrnehmung - mehr als nur Sensorik: "Mechanorezeptoren" in der menschlichen Haut und technische Drucksonsoren





#### Sensorische Materialien: Anwendungsfelder.







**Formänderung** 

Lasttragende Strukturen

Taktile Wahrnehmung

Sichere/kooperative Robotik Human-Machine-Interaction neuartige User Interfaces

Autonomes Fliegen (fly-by-feel)

Strukturüberwachung/SHM Zustandsmanagement (MoD, predictive maintenance)

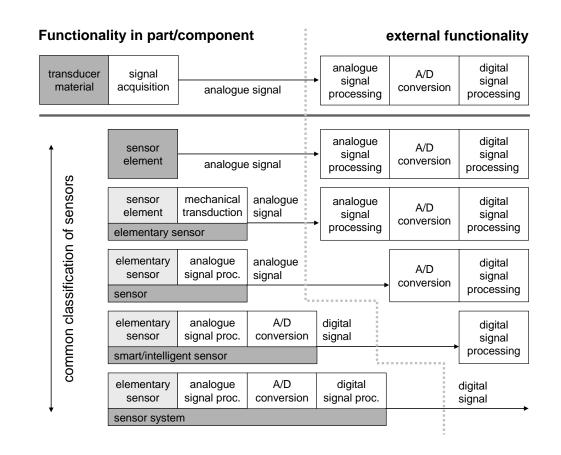
McEvoy. M. A., Correll, N. Materials that combine sensing, actuation, computation and communication. Science 347 (2015) 1261689-1 bis -8.



#### Die Funktionalität ins Material verlagern.

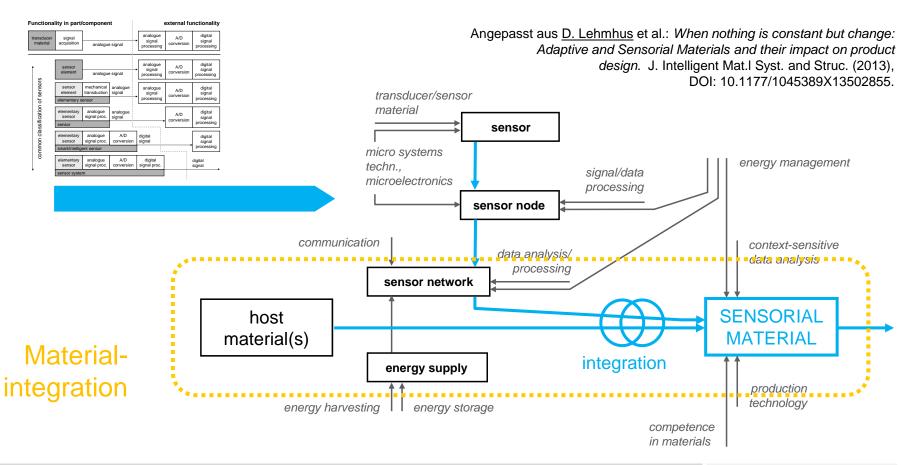
Im Zuge der Entwicklung von einer sensorierten Struktur zur Materialintegration wird die Funktionalität des Sensorsystems Schritt für Schritt von der Außenwelt in das aufnehmende Material verlagert.

Angepasst aus Lee, S. H., 2010, Diploma thesis, Bremen Institute for Mechanical Engineering (BIME), Betreuer: Prof. K. Tracht.





#### Die Funktionalität ins Material verlagern.





Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law

Cyber-Physical Systems (CPS) 1,000,000,000 Itanium 2 with 9MB cache More than Moore: Diversification Core 2 Duo \_a\_more-than-moore/ Atom More Moore: HV Sensors Analog/RF **Passives Biochips** Miniaturization power Actuators Combining SoC and Sip: Higher value systems Interacting with people and environment 130 nm Non-digital content 90 nm system-in-package Quelle: http://electroiq.com/blog/2011/01/itrs-2010\_ Baseline 65 nm CMOS: Information CPU. 45 nm processing Memory. Logic 32 nm Digital content system-on-chip 22 nm (SoC) 2011 **Beyond CMOS** 

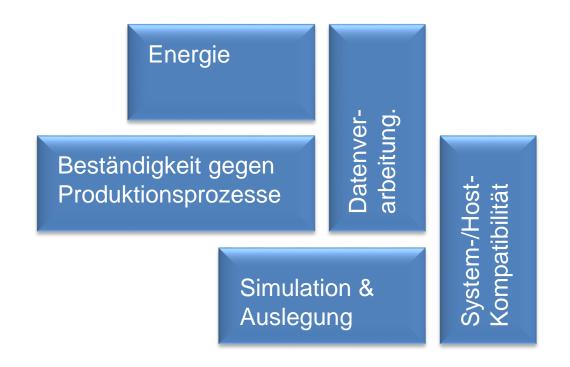


#### Forderungen an materialintegrierte Systeme.

- Integrierbarkeit ohne Schädigung des eingebetteten Systems.
- Keine negative Beeinflussung der primären Funktion des aufnehmenden Systems.
- Zuverlässigkeit: Datenaufnahme, -verarbeitung und -interpretation.
- Zuverlässigkeit und Langzeit-Stabilität des Gesamtsystems.
- Fehler- und Schadenstoleranz.
- Autonomie und Wartungsfreiheit, u. a. in bez. Energieversorgung.
- Konkurrenzfähige Kosten, auch für große Serien.

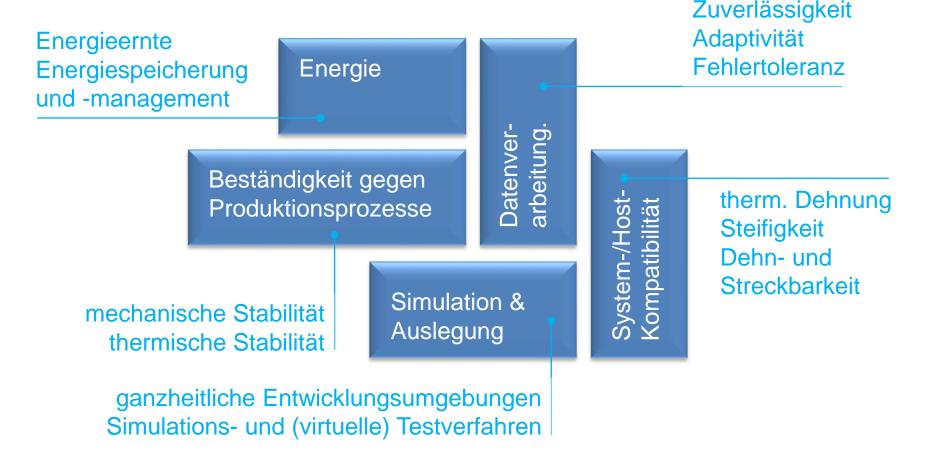


#### Zentrale Forschungsfelder.





# Einleitung. Zentrale Forschungsfelder.

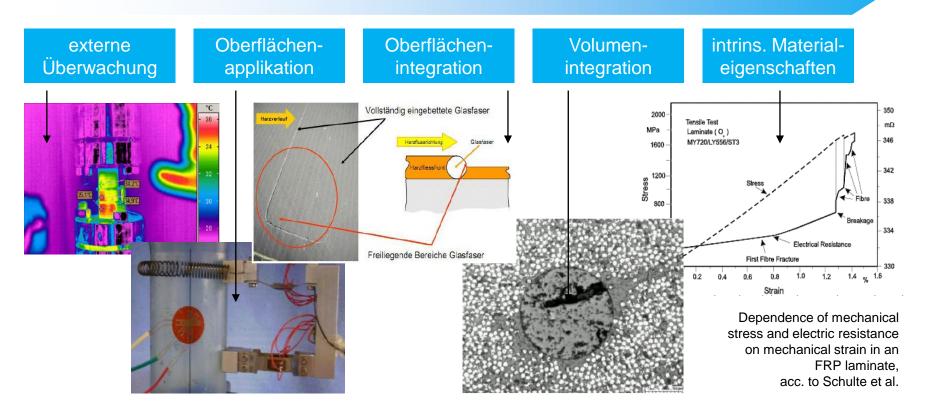




#### Materialintegration: Ansätze.

Integrationsgrad.

#### Integrationsgrad





#### Materialintegration: Ansätze.

Integrationsgrad: Volumenintegration.

# Volumenintegration FRP laminate.



## Materialintegration: Herausforderungen. ... auf Seiten von Material und Produktion ...

- Mechanische Stabilität gegenüber fertigungs- und betriebsbedingten Belastungen
- Thermische Stabilität gegenüber fertigungs- und betriebsbedingten Belastungen
- Verträglichkeit mit der Matrix
  - Mechanische Anpassung angepasste Steifigkeit, Festigkeit etc., Flexibilität, Dehnbarkeit, Grenzschicht, Wirkung als innere Kerbe, ...
  - Thermische Anpassung angepasste Wärmeausdehnungskoeffizienten, Aufrechterhaltung der Funktionalität unter thermischer Last ...
  - Chemische und sonstige Verträglichkeit Reaktion auf Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit, besondere chemische Bedingungen im Einsatz etc.
- Andere/kombinierte Effekte
   fertigungsbedingte Eigenspannungen, überlagerte thermische Spannungen im Betrieb, ...

Zentrale Herausforderung

von Materialien/Strukturen

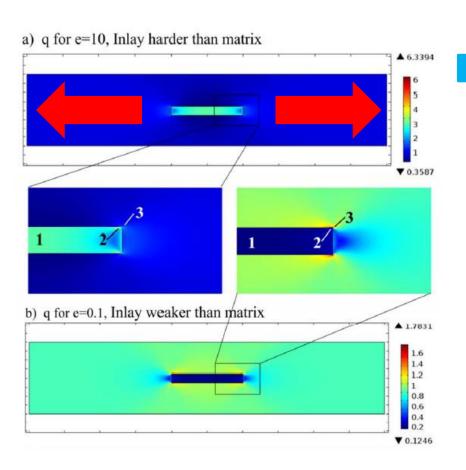
während der Fertigung

mit eingebetteten

Sensorsystemen

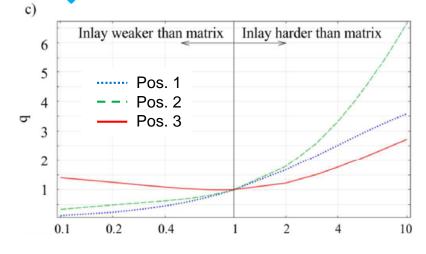


# Materialintegration: Herausforderungen. Beispiel mechanische Kompatibilität.



#### Spannung um Inlays:

- ebener Spannungszustand, Zugsp.
- Matrix:inlay Steifigkeitsverh. variiert
- lokale v. Mises-Spannung bewertet



W. Lang et al.: Integration without disruption: The basic challenge of sensor integration. IEEE Sensors Journal (2013)



# Materialintegration: Herausforderungen. Datenverarbeitung: Erkenne Dich selbst.

Quelle: https://www.youtube.com/watch?v=ehno85yl-sA

Starfish self-modelling robot:

Ein Projekt der Cornell University, Computational Synthesis Laboratory, Ithaca, NY 14853



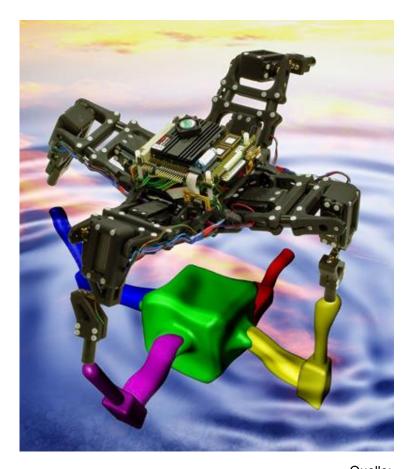


#### Materialintegration: Herausforderungen.

## Datenverarbeitung: Erkenne Dich selbst.

- Typische Datenauswerteverfahren (deterministisch, modellfrei) sind an definierte Systemzustände gekoppelt.
- Was passiert bei Zustandsänderungen, etwa durch Schädigung?
- Schlußfolgerung: Das System muss selbstanalysefähig sein - im Sinne der Überprüfung des Zustandes des Sensorsystems, aber vor allem ...

bezüglich Systemidentifikation der überwachten Struktur.



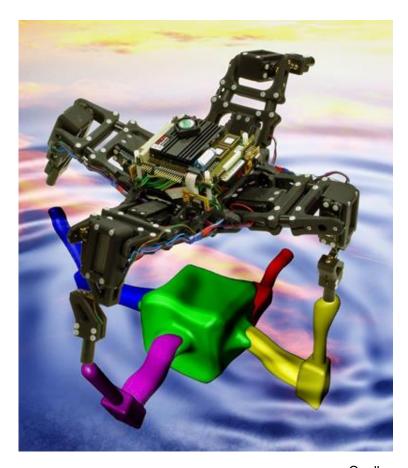
Quelle: http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/file s//news/Science5802/Technovelgy.htm



#### Materialintegration: Herausforderungen.

## Erkenne Dich selbst - aber wie?

- Nutzung bestimmter, klar definierter Betriebszustände, Vergleich der Sensordaten-Muster im veränderten Zustand mit dem Ausgangszustand.
- Nutzung des "Hintergrunds", d.h. Auswertung von im normalen Betrieb als Störung ausgefilterten Daten.
- Integration aktorischer Komponenten in das System - aktiver Selbsttest der überwachten Struktur durch das integrierte Sensor-Aktor-System.



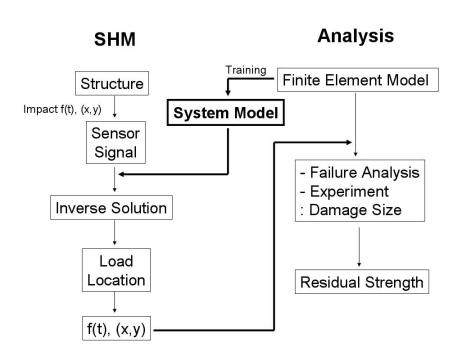
Quelle: http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/file s//news/Science5802/Technovelgy.htm



#### Materialintegration: Herausforderungen.

#### ... auf Seiten der Datenverarbeitung ...

- Flexibilität der Selbstrepräsentation, Möglichkeit der Anpassung als Reaktion auf Veränderungen
- Echtzeit-Datenverarbeitung für die Online-Bewertung
- Zuverlässigkeit auf Informationsebene (Vertrauen in die Ergebnisse)
- Zuverlässigkeit auf Systemebene unterBedingungen des Ausfalls von Sensoren und/oder Kommunikationspfaden



Logische Struktur eines zur Überwachung eines Raumfahrzeuges vorgeschlagenen SHM-Systems.

Chang et al., Design of SHM-Embedded Structures for Space Operation Vehicles, 2006





## Anwendungsbeispiel: SHM. SHM in der Luftfahrt: Blackbird, Silver Eagle.

Structural Health Monitoring für Luftfahrtstrukturen genießt aktuell besonderes Interesse wegen des Übergangs von Al-basierten zu CFK-Strukturen, vgl. etwa Boeing 787/Airbus A 350.

Problem: Möglichkeit versteckter Impact-Schäden in

CFK-Strukturen.

Konsequenz: Definition des "barely visible impact damage",

Einführung von Anforderungen des Inhalts,

dass auch mit BVID die Struktur das 1,5fache

der höchsten Auslegungslast ertragen können

muss.

Folge: Gewichtserhöhung !!!



#### Anwendungsbeispiel: SHM.

#### SHM: Abstufung der Funktionalität.

Level 0 - Lasterkennung	"Someone stepped on me."	
Level 1 - Schadenserkennung	"Something is wrong."	Stand d.
Level 2 - Schadenslokalisierung	"Something is wrong here."	Technik
Level 3 - Schadensausmaß	"This much is wrong."	
Level 4 – Lebensdauerprognose	"Things will go fatally wrong soon."	
Level 5 - Selbstanalyse	"Just treat me thus, and I will survive."	
Level 6 - Selbstheilung	"Soon everything will be fine again."	

<u>D. Lehmhus</u> et al.: When nothing is constant but change: Adaptive and Sensorial Materials and their impact on product design. Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2013), DOI: 10.1177/1045389X13502855.



# Anwendungsbeispiel: SHM. SHM: Barrieren für die Einführung.

- Mangel an Regeln/Normen f
  ür Konstruktion
- allgemeiner weiterer Entwicklungsbedarf, Transfer vom Labor zu komplexen realen Strukturen
- Einfluss eingebetteter Systeme auf das Materialverhalten
- Unterscheidung zwischen Schäden am Sensor und echten Strukturschäden
- Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit der Systeme, Reparierbarkeit
- Erkennung von und Umgang mit fehlerbehafteten Sensordaten, verbleibende Zuverlässigkeit und Robustheit
- Herunterskalierung komplexer Datenverarbeitungssysteme auf die für die Einbettung erforderliche (geringe) Größe



# Anwendungsbeispiel: SHM. SHM: Barrieren für die Einführung.

- Mangel an Regeln/Normen f
  ür Konstruktion
- allgemeiner weiterer komplexen realen S
- Einfluss eingebettete
- Unterscheidung zwis
- Langzeitstabilität un
- Erkennung von und verbleibende Zuverlag
- Herunterskalierung I Einbettung erforderli

19. September 2013, SAE International:

Aerospace Recommended Practice (ARP) 6414

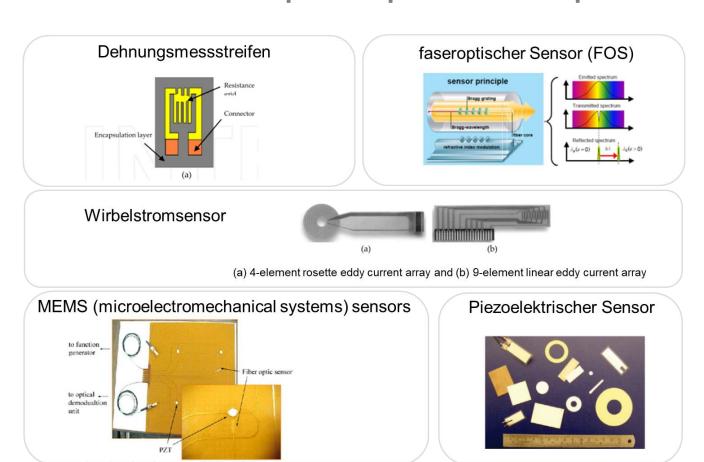
### Guidelines for Implementation of Structural Health Monitoring on Fixed Wing Aircraft.

"This document is applicable to civil aerospace airframe structural applications where stakeholders are seeking guidance on the definition, development and certification of Structural Health Monitoring (SHM) technologies for aircraft health management applications. For the purpose of this document, SHM is defined as "the process of acquiring and analyzing data from on-board sensors to evaluate the health of a structure." The suite of on-board sensors could include any presently installed aircraft sensors as well as new sensors to be defined in the future."



#### Anwendungsbeispiel: SHM.

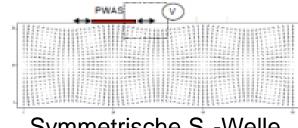
### Sensor- und Messprinzipien: Beispiele.



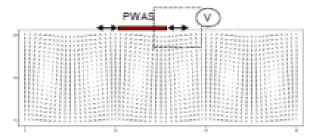


### Anwendungsbeispiel: SHM. Sensor- und Messprinzipien: Beispiele.

- Lamb-Wellen geführte Wellen zwischen parallelen Plattenoberflächen
- symmetrische und antisymmetrische Moden unterscheidbar
- Anregung u.a. durch piezoelektrische Sensor-Aktor-Module (PWAS, piezoelectric wafer active sensor)
- Schadensdetektion über Erfassung von Wechselwirkungen der Wellen mit Materialfehlern (z. B. Moden-Änderung)



Symmetrische S<sub>0</sub>-Welle



Antisymmetrische A<sub>0</sub>-Welle

Quelle: Giurgiutiu 2010

Aktives Verfahren realisierbar, Selbsttest der Strukturen.



### Anwendungsbeispiel: SHM.

### Sensor- und Messprinzipien: Beispiele.

 Lamb-Wellen - geführte Wellen zwischen parallelen Plattenoberflächen



symmetrische und antisymmetrische

Für CFK vergleichsweise breit untersuchtes Verfahren, aufgrund des Schichtaufbaus der Materialien erhöhte Komplexität bei Hybridwerkstoffen wie FMLs.

electric water active sensor)

 Schadensdetektion durch Wechselwirkung der Wellen mit Fehlern im Material (z. B. Moden-Änderung)



Aktives Verfahren realisierbar, Selbsttest der Strukturen.



# Hybridwerkstoffe und SHM: Potenziale. FMLs als Beispiel für Hybridwerkstoffe.

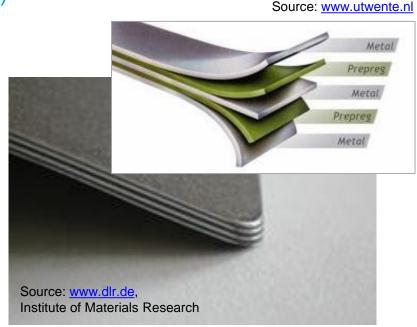
**Definition:** Hybridwerkstoffe sind Werkstoffe, in denen auf Materialebene (Größenskala typischerweise ca. eine Größenordnung unter

der minimaler Strukturabmessungen) unterschiedliche Werkstoffklassen

miteinander verbunden sind.

Typisches Beispiel für einen Hybridwerkstoff sind Faser-Metall-Laminate (FML):

Schichtverbunde, die aus einer wechselnden Folge metallischer und Faserverbundwerkstoff-Schichten bestehen (vgl. GLARE).



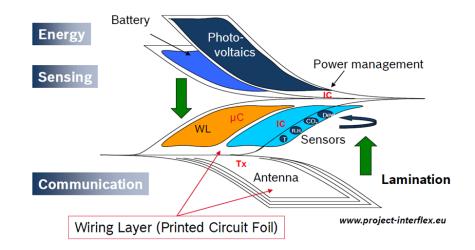


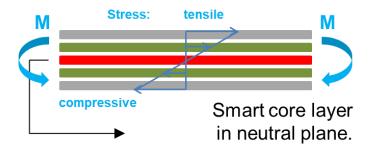
# Hybridwerkstoffe und SHM: Potenziale. FMLs und Sensorintegration.

Aufgrund des schichtweisen Aufbaus bieten FMLs gute Voraussetzungen für die Integration materialintegrierter intelligenter Systeme.

Dies gilt insbesondere in der Kombination mit Technologien zur flächigen Integration intelligenter sensorischer Systeme, wie etwa

System-in-Foil-Technologien.







### Zusammenfassung, Ausblick. Zusammenfassung

- Materialintegration ist kein Allheilmittel Herausforderungen (und Forschungsbedarf) bestehen u. a. bezüglich Integrationsprozessen, Langlebigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit auf Komponentenund Datenverarbeitungsebene.
- Ansätze zur mechanischen Verträglichkeit eingebetteter Sensorikund Elektronikkomponenten sind teils noch unbefriedigend.
- Besondere Anforderungen an die Datenauswertung besteht u. a. bez. Echtzeitfähigkeit und Adaption an veränderte Systemzustände.
- Die Realisierung materialintegrierter Systeme in Hybridmaterialien wie Faser-Metall-Laminaten bietet besondere Chancen, aber auch besondere Herausforderungen: Die Forschergruppe geht diese an.



#### Die Konferenz zum Thema: SysInt 2020

5<sup>th</sup> Int. Conference on System-integrated Intelligence

11.-13. November 2020, Atlantic-Hotel Universum, Bremen



Grundlagentechnologien von Informatik und KI bis MEMS und Materialwissenschaften, für Anwendungen in Strukturüberwachung, Fertigungstechnik, Logistik und Industrie 4.0, Robotik, Internet of Things/IoT und Umgebungsintelligenz ...

Proceedings in **Procedia Technology** direkt im Anschluss an die Veranstaltung, zusätzlich Sonderhefte wissenschaftlicher Zeitschriften geplant.

Bleiben Sie auf dem Laufenden:

www.sysint-conference.org



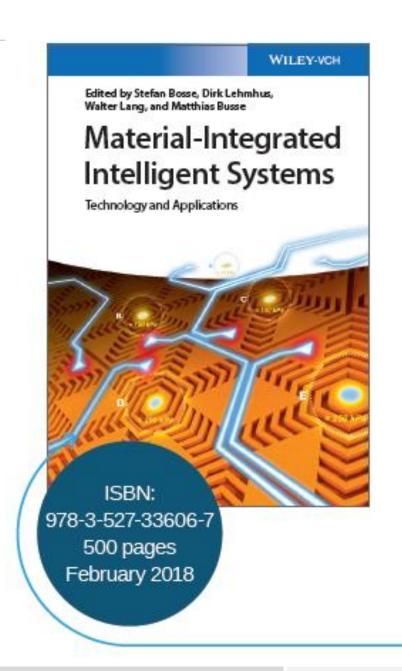
#### **Buch zum Thema**

### Material-Integrated Intelligent Systems

Herausgeber S. Bosse, D. Lehmhus, W. Lang, M. Busse

Überblick über Technologie und Anwendungspotenziale materialintegrierter intelligenter Systeme, zusammengestellt von einem internationalen Autorenteam.

Erschienen im Frühjahr 2018 im Wiley-VCH-Verlag.





#### Literatur

#### Ausgewählte Veröffentlichungen, ZWE ISIS.

- W. Lang et al.: Integration without disruption: The basic challenge of sensor integration. IEEE Sensors Journal (2013), submitted.
- <u>S. Bosse</u>: Distributed Agent-based Computing in Material-Embedded Sensor Network Systems with the Agent-on-Chip Architecture. IEEE Sensors Journal (2013), submitted.
- <u>D. Lehmhus</u>, J. Brugger, P. Muralt, S. Pane, O. Ergenmann, M.-A. Dubois, N. Gupta, M. Busse: *When nothing is constant but change: Adaptive and Sensorial Materials and their impact on product design.* J. Int. Mat. Sys. Struc. 24 (2013), DOI: 10.1177/1045389X13502855.
- T. Behrmann, C. Budelmann, <u>S. Bosse</u>, <u>D. Lehmhus</u>: *Tool chain for harvesting, simulation and management of energy in Sensorial Materials*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 24 (2013), DOI: 10.1177/1045389X13488248.
  - S. Kibben et al.: Bend sensor based on fibre optics and concept for a compact evaluation unit. Prod. Eng. 7 (2013) 15-22.
- R. Kun et al.: Structural and thermoelectric characterization of Ba substituted LaCoO3 perovskite-type materials obtained by polymerized gel combustion method. Journal of Alloys and Compounds 579 (2013) 147-155.
- <u>S. Bosse</u>, F. Pantke, F. Kirchner: *Distributed computing in sensor networks using multi-agent systems and code morphing*. In: Artificial Intelligence and Soft Computing. Lecture Notes in Computer Science 7268/2012 (2012) 415-423.
- E. Pál et al.: Composition-dependent sintering behaviour of chemically synthesised CuNi nanoparticles and their application in aerosol printing for preparation of conductive microstructures. Colloid and Polymer Science 290 (2012) 941-952.
- M. Koerdt, F. Vollertsen: Fabrication of an integrated optical Mach-Zehnder Interferometer based on refractive index modification of polymethylmethacrylate by krypton fluoride excimer laser radiation. Applied Surface Science 257 (2011) 5237-5240.
- W. Lang, D. Lehmhus, S. van der Zwaag, R. Dorey: Sensorial materials—A vision about where progress in sensor integration may lead to. Sensors and Actuators A 171 (2011) 1-2.
- W. Lang, D. Lehmhus, F. Jakobs, E. Tolstosheeva, H. Sturm, A. Ibragimov, A. Kesel, D. Lehmhus, U. Dicke: *From Embedded Sensors to Sensorial Materials the Road to Function Scale integration*. Sensors and Actuators A 171 (2011) 3-11.
  - K. Schubert et al.: On attenuation and measurement of Lamb waves in viscoelastic composites. Comp. Struc. 94 (2011) 177–185.
- H. Sturm, E. Brauns, K. Froehner, <u>W. Lang</u> and R. Buchner: *Thermoelectric flow sensors on flexible substrates and their integration process.* Proc. IEEE Sensors (2010), pp. 575–579.



#### Literatur

#### In der Präsentation zitierte Quellen.

- R. E. Newnham, D. P. Skinner, L. E. Cross: Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. Mat. Res. Bull. 13 (1978) 525-536.
- W.-G. Drossel, S. Hensel, M. Nestler, L. Lachmann, A. Schubert, M. Müller, B. Müller: *Experimental and numerical study on shaping of aluminum sheets with integrated piezoceramic fibers*. Journal of Materials Processing Technology (2013), accepted manuscript, dx.doi.org/doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.08.011.
- P. Wierach, M. Kubicka, T. Mahrholz, A. Kühn, and M. Sinapius: *Composites modified with Terfenol-D particles for stress detection*. Euromat 2013, Sept. 8th-13th, 2013, Sevilla, Spain.
- Vanden Bulcke et al.: *Process Technology for the Fabrication of a Chip-in-Wire Style Packaging*. Proc. Electronic Comp. and Techn. Conf. 06/2008, DOI:10.1109/ECTC.2008.4549986.
- J.-M. Park, P.-G. Kim, J.-H. Jang, Z. Wang, J.-W. Kim, W.-I. Lee, J.-G. Park, K. L. DeVries: Self-sensing and dispersive evaluation of single carbon fiber/carbon nanotube (CNT)-epoxy composites using electro-micromechanical technique and nondestructive acoustic emission. Composites Part B: Engineering 39 (2008) 1170-1182.
- K.-H. Wu et al.: *Development and application of magnetic magnesium for data storage in gentelligent products*. J. of Magnetism and Magn. Mat. 322 (2010) 1134-1136.
- D.-Y. Song, N. Takeda, A. Kitano: *Correlation between mechanical damage behavior and electrical resistance change in CFRP composites as a health monitoring sensor*. Materials Science and Engineering: A 456 (2007) 286-291.
- B.-A. Behrens, K. Voges-Schwieger, A. Bouguecha, R. Krimm, J. Jocker, J. Schrödter: *An innovative material-inherent load sensor based on martensite formation*. Steel Research International 81 (2012) .
- B.-A. Behrens, K. Weilandt: *Mathematical Description of a'-Martensite Formation and its Application for the Detection of Damage in Sheet Meta*l. Materials Science & Technology 3 (2009) 1485-1496.
- W.-G. Drossel, S. Hensel, B. Kranz, M. Nestler, A. Goeschel: *Sheet metal forming of piezoceramic–metal-laminar structures—Simulation and experimental analysis*. CIRP Annals Manfacturing Technology 58 (2009) 279-282.
- W. Hufenbach, M. Gude, T. Heber: *Embedding versus adhesive bonding of adapted piezoceramic modules for function-integrative thermoplastic composite structures*. Composites Science and Technology 71 (2011) 1132-1137.



#### Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit ...

Wo Sie uns finden:

Dr.-Ing. Dirk Lehmhus

Tel. +49 (0)421 2246 7215

Fax +49 (0)421 2246 300

Email dirk.lehmhus@ifam.fraunhofer.de

Postal Address Wiener Straße 12

28359 Bremen

Germany