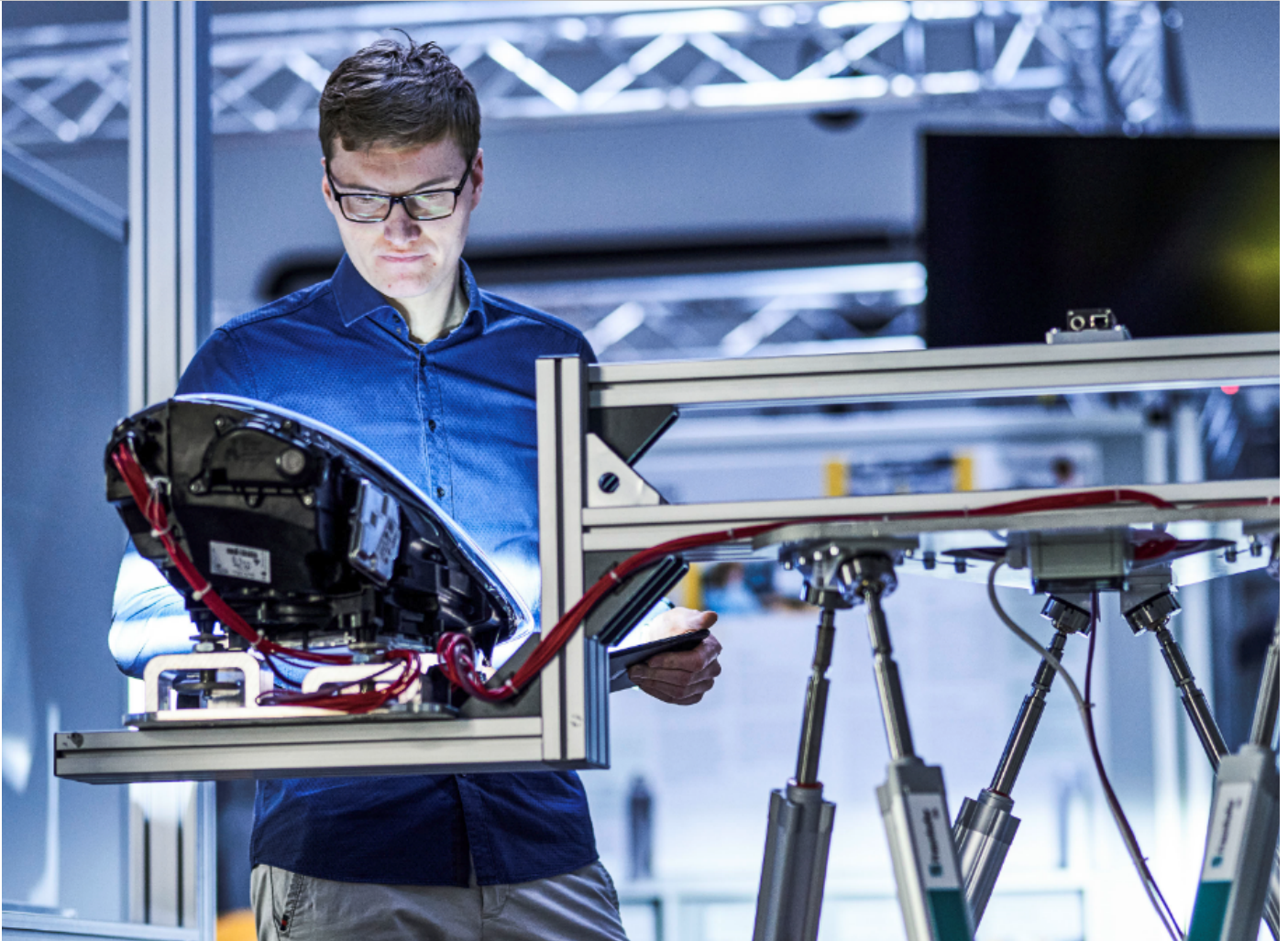


APRIL | 2023

Menschen | Projekte | Events



© Bildquelle: Fraunhofer IEM

## HERAUSFORDERUNG DIGITALISIERTE UND NACHHALTIGE WERTSCHÖPFUNG

### VORWORT

2 Dr.-Ing. Sven Herold

### MENSCHEN

3 Interview  
Dr.-Ing. Holger Neubert

### PROJEKTE

- 4 Werkzeugintegrierte Kraftsensorik
- 5 Optimierung industrieller Prozesse durch AI on the Edge

6 Nalyses  
Grüner Digitaler Zwilling

8 ZIM-Netzwerk AkuPro und der Mittelstand in seiner Doppelrolle als Problemgeber und Ideentreiber

9 Dünnschichtsensorik für die Temperaturmessung in der Kaltmassivumformung

10 Softe Wandlermaterialien für sensorische, aktorische und generatorische Anwendungen

### EVENTS

11 Hannover Messe 2023  
Online Nachwuchs Kolloquium

»Treffen Sie uns direkt vor Ort auf der  
Hannover Messe - Halle 16 Stand A12 -  
und skizzieren Sie gemeinsam mit uns  
zukunftsweisende Ideen und Lösungen.«



Liebe Leser\*innen,

seit einiger Zeit wird an unterschiedlichen Stellen ganz plastisch deutlich, wie Klimaveränderungen und knappe Ressourcen die Lebenswirklichkeit von uns allen beeinflussen. Dies betrifft auch die Technologieentwicklung, der zukünftig begrenzte Ressourcen zur Verfügung stehen. Insbesondere ist die Bundesrepublik Deutschland als Industriestandort, Exportnation und Hochlohnland mit ihrem begrenzten Zugriff auf Ausgangs- oder Ersatzmaterialien, Energie und Fachkräfte auf eine hohe Wertschöpfung industrieller Prozesse angewiesen. Dies kann nur durch Technologieführerschaft in strategisch wichtigen Feldern erreicht werden. Innovative Technologien von morgen müssen dabei nicht nur einzelne Phasen des Produktlebens umfassen, sondern zunehmend umfassende Nachhaltigkeit und Kreislaufprozesse berücksichtigen.

Im vorliegenden Newsletter finden Sie einen Querschnitt ausgewählter Forschungsergebnisse und Aktivitäten der beteiligten Institute im Themenfeld adaptronischer Systeme. Dies sind neben dem entwickelten Fertigungsansatz werkzeugintegrierter Kraftsensoren auch die Optimierung industrieller Prozesse durch AI on the Edge. Mit dem digitalen grünen Zwilling begleiten wir Sie auf dem Weg in eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft und eröffnen Ihnen im weiteren Verlauf des Newsletters Einblicke in die Welt softer Wandlermaterialien für sensorische, aktorische und generatorische Anwendungen. Erfahren Sie mehr über das ZIM-Netzwerk zur akustischen Analyse von Produktsystemen (AkuPro) und erhalten Sie einen Überblick zum Thema Dünnschichtsensorik zur Temperatur- und Verschleißmessung.

Mit ihrem diesjährigen Motto „Industrial Transformation – Make the Difference!“ sowie dem Leitthema „Digitalisierung & Nachhaltigkeit“ fokussiert die Hannover Messe klar auf die klimaneutrale Zukunft. Auf dem Weg zu einer digitalisierten und nachhaltigen Wertschöpfung kommt unserer Industrie und deren Transformation eine entscheidende Bedeutung zu. Mit unserem Geschäftsbereich Adaptronik werden wir in diesem Jahr für Sie wieder vor Ort am Fraunhofer Gemeinschaftsstand vertreten sein. Besuchen Sie uns in Halle 16 Stand A12. Wir freuen uns darauf - ganz getreu unserem Motto #WeKnowSolutions - mit Ihnen gemeinsam zukunftsweisende Ideen und Lösungen zu entwickeln.

Viel Spaß beim Lesen

Geschäftsbereich Adaptronik

Dr.-Ing. Sven Herold  
Sprecher des Geschäftsbereich Adaptronik

info@adaptronik.fraunhofer.de  
www.adaptronik.fraunhofer.de



# Interview mit Dr.-Ing. Holger Neubert



Holger Neubert received the Diploma degree in electrical engineering and the Doctoral degree from the Technische Universität Dresden, Germany in 1994 and 2000, respectively. As a group leader at the Institute of Electromechanical and Electronic Design at the Technische Universität Dresden, he gathered research experience in the areas of electromechanical actuators, electromagnetic and thermal design, probabilistic modeling and design optimization. In 2014 he became head of the department Smart Materials and Systems at Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS in Dresden.

*Wir waren neugierig und baten Herrn Dr. Neubert zum Interview...*

## Sie leiten die Abteilung „Intelligente Materialien und Systeme“ am Fraunhofer IKTS. Wie bringen Sie Intelligenz in Ihre Systeme?

Das Attribut intelligent als kognitive Leistungsfähigkeit technischen Werkstoffen und Systemen zuzuschreiben ist vielleicht keine ganz glückliche Wahl. Der Begriff hat nun mal seinen Ursprung in der Übertragung des Begriffs smart materials ins Deutsche und meint damit ja eigentlich responsive materials, also Werkstoffe, die bei Änderung von Umgebungsgrößen in definierter Weise ihre Eigenschaften ändern. Die gesamte Breite der Werkstoffe, die diese Definition erfüllen, bearbeiten wir allerdings nicht.

Als Abteilung an einem Forschungsinstitut, das sich der Hochleistungskeramik verschrieben hat, entwickelt wir natürlich besondere funktionskeramische Werkstoffe, allen voran aus der Klasse der Komplex-Perowskite. Neben den responsiven Eigenschaften mag das Intelligente auch darin bestehen, die Eigenschaften anwendungsspezifisch genau zuzuschneiden, also beispielsweise einen Kondensatorwerkstoff für einen bestimmten Bauelementtyp zu optimieren oder elektromechanische, elektrische und akustische Eigenschaften eines Piezokeramik-Polymer-Komposits an ein Schallmedium optimal anzupassen. Das sind nur zwei Beispiele aus einer Fülle von Aufgaben. Gerade Technologiewechsel im großen Maßstab wie der Übergang zu batterieelektrischen Fahrzeugen, der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft oder die Einführung kalorischer Systeme zur Klimatisierung erzeugen eine Vielzahl von ganz konkreten werkstofflichen

Problemstellungen. Diese werden durch zusätzliche Anforderungen wie Umweltverträglichkeit, Verfügbarkeit, Eignung zu stofflichen Kreisläufen, ressourcenschonende Herstellrouten usw. zunehmend komplexer.

Über die Werkstoffentwicklung hinaus beherrschen und betreiben wir die Wertschöpfungskette bis mindestens zur Komponente, in vielen Fällen bis zur kundenspezifischen Systemlösung. Gerade bei keramischen Werkstoffen sind die Herstelltechnologien von immenser Bedeutung für die Bauteileigenschaften. Daneben spielen Methoden der komplexen Charakterisierung und Modellierung der Werkstoffe und Komponenten für uns eine große Rolle.

## Welche Technologien, die in Ihrem Institut derzeit entwickelt werden, sind für die Adaptronik besonders spannend?

Das Fraunhofer IKTS ist an der Entwicklung einer Reihe ganz grundlegender Systemtechnologien beteiligt, in denen keramische Werkstoffe und Komponenten funktionsbestimmend sind, z. B. Festkörperbatterien, Brennstoffzellen, elektrokatalytische Wärmepumpen, Wasserstoffsynthese, und die das Potenzial haben, Innovationen und tiefgreifende Veränderungen in der Breite zu bewirken und damit auch für adaptronische Systeme relevant sind. Aus engerer Sicht meiner Abteilung heraus sind Technologien für robuste, integrierte und kostengünstige Sensorik bedeutsam. Ich würde da die drucktechnische Herstellung von funktionskeramischen Schichten und Kompositen auf beliebig geformten Substraten zuerst nennen (siehe Newsletter-

Beitrag). Sie ermöglicht integrierte mechanische Sensorik, Ultraschallsensorik & Energy-Harvesting-Lösungen.

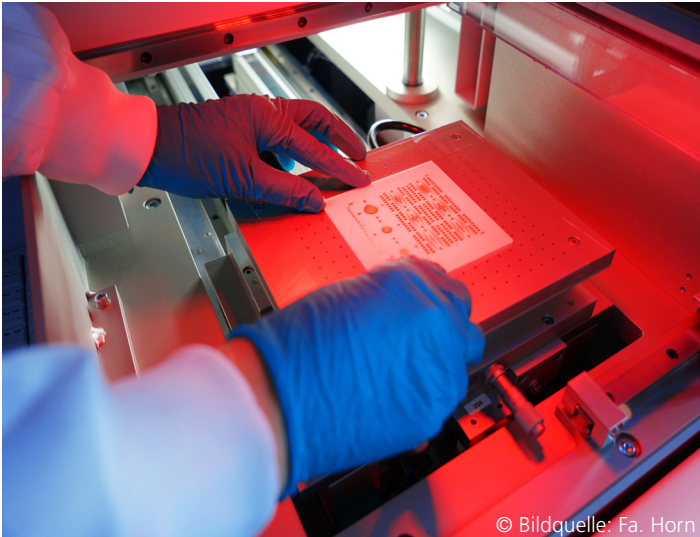
## Wie lautet ihr persönliches Credo, um Dinge nachhaltig zu bewegen?

Nachhaltig heißt ja, auf Dauer angelegt. Was auf Dauer angelegt sein soll, muss tiefgreifend und gründlich sein. Das steht mehr als nur manchmal im Widerspruch zur Begrenztheit der verfügbaren Ressourcen. Insofern braucht man Geduld und einen roten Faden.

## Wie schätzen sie die Bedeutung der Künstlichen Intelligenz für zukünftige industrielle Prozesse ein?

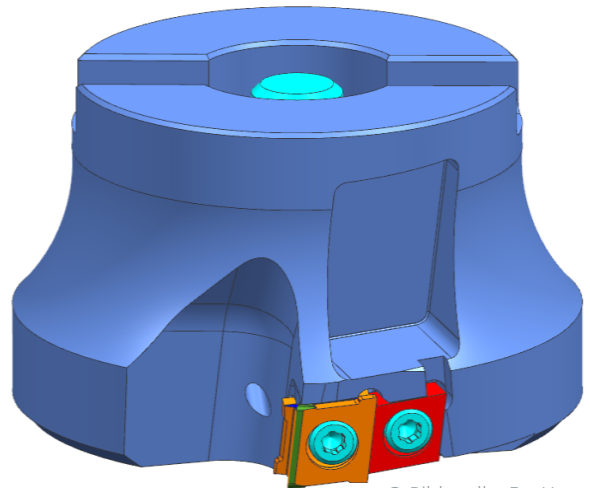
Mir fehlt das Fachwissen, um dies in dieser Allgemeinheit beantworten zu können. In Bezug auf unsere konkrete Forschungsarbeit in der Werkstoff- und Technologieentwicklung erwarte und erhoffe ich, dass die Möglichkeiten wachsen, heterogene Daten sinnvoll, schnell und nahezu vollständig auswerten zu können. Die funktionskeramischen Werkstoffe, mit denen wir uns beschäftigen, werden seit ungefähr 100 Jahren beforscht. Ich möchte nicht wissen, wie viele Experimente in dieser Zeit mehrfach durchgeführt worden sind, wie viele Erkenntnisse wiederholt gewonnen worden sind infolge von Informationsmangel, Geheimnistuerei, Vergessen. Dem abzuhelpen und den Umfang an Information, den ein einzelner oder ein Team in ein Projekt einbeziehen kann, zu vergrößern, das wäre meine Erwartung. Allerdings setzt die Anwendung von AI-Methoden eine entsprechende Datenverfügbarkeit voraus, möglicherweise die größere Aufgabe, diese herzustellen.

# Werkzeugintegrierte Kraftsensorik



© Bildquelle: Fa. Horn

Abb. 1. Ausrichtung einer Probe im Siebdrucker.



© Bildquelle: Fa. Horn

Abb. 2. Stirnfräser mit Wendeschneidplatte (orange) und integrierter Sensorplatte (rot)

In der handwerklichen Herstellung filigraner Teile ist der Mensch erstaunlich gut, obwohl seine motorische Präzision gar nicht herausragend ist. Jedoch sind es seine taktilen Fähigkeiten! Dies erlaubt eine ständige Rückkopplung im handwerklichen Bearbeitungsprozess und erreicht das handwerkliche Geschick. Im Vergleich zum Menschen mangelt es Werkzeugmaschinen an taktiler Ausstattung, ihre Präzision wird durch hochgenaue Antriebe und einen rückwirkungsarmen, hochsteifen Aufbau erreicht. Wäre es nicht großartig, wenn dieser durch taktilen Fähigkeiten ergänzt werden könnte, die in Regelkreisen auf Störgrößen reagieren oder Fehlerfälle detektieren könnten?

Für eine solche taktilen Wahrnehmung in der Maschine sind miniaturisierte Kraftsensoren notwendig, die sich in unmittelbarer Nähe des Werkzeugeingriffs in das Werkstück, also im Werkzeug selbst, platzieren lassen. Aufgrund der dort herrschenden Bedingungen müssen solche Sensoren robust, klein, und wegen der erforderlichen Anzahl auch kostengünstig sein.

## Kostengünstige Fertigung in großer Stückzahl

Mit einem am Fraunhofer IKTS entwickelten Fertigungsansatz können Kraftsensoren komplett über Druckverfahren hergestellt werden. Grundlage hierfür sind piezokeramische Dickschichten, die per Siebdruckverfahren auf planare und tubulare Substrate aufgebracht werden. Die Struktur der sensorischen, Kontaktierungs- und anderer funktioneller Schichten wird dabei bereits durch das Druckbild festgelegt, also die Sieböffnungen, durch die die Paste während des Druckvorgangs gedrückt wird. Eine mechanische Nach-

arbeitung zur Strukturierung ist nicht erforderlich. Der Siebdruck von Dickschichten ist ein hochentwickeltes industrielles Druckverfahren, das durch feine Strukturauflösung und hohe Reproduzierbarkeit gekennzeichnet ist. Aufgrund geringer Initialisierungs- und mittlerer Stückkosten lässt es sich in einem weiten Stückzahlbereich mit angepasstem Automatisierungsgrad effizient anwenden. Entscheidend für die Anwendung siebgedruckter Dickschichten als Kraftsensoren ist jedoch nicht nur die piezokeramische Schicht, sondern der Gesamtaufbau aus Substrat, piezokeramischer Dickschicht, Elektroden, Aufbau- und Verbindungstechnik zur Weiterkontaktierung sowie Signalverarbeitung und -übertragung. Im Hinblick auf die Substratwerkstoffe ist es am Fraunhofer IKTS gelungen, das Dickschichtsystem auf geeigneten Konstruktionswerkstoffen zu prozessieren, die Deformationskörper zur Kraftmessung im Kraftfluss des Werkzeugs bilden können. Daraus sind miniaturisierte Sensorkörper entstanden, die sich in Werkzeugen integrieren lassen. In gemeinsamen Projekten hat das Fraunhofer IWU Lösungen zur Werkzeugintegration, Weiterkontaktierung und drahtloser Signalübertragung vom rotierenden Werkzeug an die Maschine erarbeitet.

## Empfindliche, zeitlich hoch aufgelöste Messung des Werkzeugeingriffs

Die Technologie wurde bisher für Stirn- und Umfangsfräsen und Drehen demonstriert. Die nahe der Wirkstelle sitzende Sensorik nimmt im Unterschied zu fernliegender auch höherfrequente Kraftanteile auf, die Rückschlüsse auf den genauen zeitlichen Verlauf der Spanbildung erlauben. Im Frequenzbereich zeigt sich deutlich der Werkzeugzustand. Damit

sind Werkzeugwechsel abhängig vom tatsächlichen Werkzeugverschleiß möglich anstelle starrer vorgegebener Zyklen. Dies reduziert Stillstandzeiten und Kosten.

## Kundenspezifische Lösungen werden angeboten

Die am Fraunhofer IKTS entwickelten piezokeramischen Werkstoffe und Technologien lassen sich auf unterschiedliche Substratmaterialien aufbringen, so auf keramischen und metallischen, und im Design an unterschiedliche Anforderungen anpassen. Außer punktueller Kraftmessung in Werkzeugen ist auch eine von Kraftfeldern in einer Ebene ebenfalls realisierbar. Dies ist beispielsweise in Umformprozessen von Belang. Neben Kraftsensoren lassen sich mit piezokeramischen Dickschichten auch Ultraschallwandler, zum Senden oder Empfangen von Ultraschallsignalen oder für beides, und miniaturisierte Biege-Aktoren realisieren. Dazu stehen am Fraunhofer IKTS nicht nur umfangreiche Kompetenzen in Werkstoffentwicklung und Technologieanpassung, sondern auch zur Verfahrensvalidierung, Wandlerauslegung und Charakterisierung zur Verfügung.

## Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Dr. Holger Neubert

Winterbergstr. 28  
01277 Dresden

(+49) 351 2553-7615  
holger.neubert@ikts.fraunhofer.de  
www.ikts.fraunhofer.de



# Optimierung industrieller Prozesse durch AI on the Edge

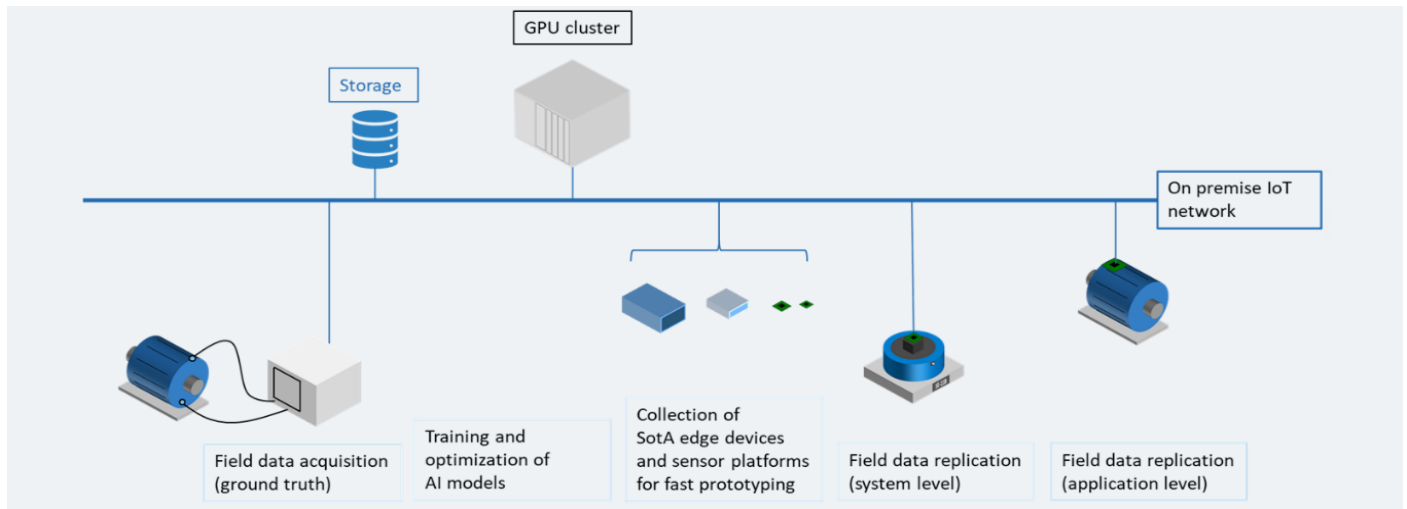


Abb. 1. Durchgängiges Prototyping von Edge AI Lösungen von der Datenerfassung bis zum Test intelligenter Systeme in der Anwendung

Von industriellen Prozessen wird hohe Genauigkeit, Geschwindigkeit und Effizienz beim Einsatz von Material und Energie erwartet. Die Digitalisierung von Anlagen liefert Daten und virtuelle Abbilder, die eine Optimierung von Parametern vor allem auch in komplexen Prozessen ermöglicht.

Je besser dabei die digitalen Systeme in den Prozess integriert sind, desto schneller kann dieser angepasst werden, um Qualitätsprobleme nicht nur frühzeitig zu erkennen, sondern auch direkt in den Prozess einzugreifen, um die Fertigung entsprechend anzupassen.

Ein Beispiel hierfür aus dem Projekt KISS, KI basierte Fertigungstechnologie für das autonome Laserschweißen komplexer Schiffstrukturen (<https://www.bmwk.de/MAFO/projekte/03SX568-KISS/projekt-detail.html>) stellt ein roboterbasierter Laserschweißprozess dar, bei dem integrierte Sensoren sowohl die Lage der zu verbindenden Werkstücke erfassen, als auch die Qualität der Schweißnaht. Mittels Methoden der künstlichen Intelligenz werden die Prozessparameter optimiert und direkt an die Steuerung des Lasers und des Roboters zurückgegeben.

Je geringer hierbei der Zeitverzug (Latenz) zwischen sensorischer Erfassung und Rückkopplung der Parameteranpassung, desto höher ist die mögliche Prozessgeschwindigkeit. Daher müssen auch die digitale Infrastruktur und Implementierung der Algorithmen mit bedacht werden: Für industrielle Fertigungsprozesse ist die Nutzung einer Cloud-basierten KI im Allgemeinen nicht schnell genug. Daher muss die Datenanalyse möglichst nah am Prozess und entsprechend an der Kante (Edge) des Datennetzes stattfinden; dies kann auf dem Prozessrechner oder durch eine Erweiterung desselben realisiert werden, je nach Bandbreite der erfassten Daten ist aber auch eine

Analyse direkt an der Messstelle mit einer intelligenten Sensorik sinnvoll.

Allerdings ist die Ausgangslage in der Praxis sehr vielfältig: Während manche Unternehmen bereits eine voll digitalisierte Fertigung umgesetzt haben und Prozessschritte komplett in Simulationen abbilden können, werden andernorts noch Prozesse allein auf Basis der Erfahrung von Expertenwissen des Fertigungspersonals optimiert.

Gefragt ist also eine individuelle Herangehensweise an das jeweilige Problem aus der industriellen Produktion, welche die jeweilige Situation im Unternehmen erfasst und möglichst schnell zu einem Konzept für eine wirtschaftlich sinnvolle Umsetzung kommt. Am Fraunhofer IIS/EAS wurden hierfür Werkzeuge und Workflows realisiert, die ein Prototyping der kompletten Digitalisierungslösung, vom Sensor bis zum Mehrwert aus der Datenanalyse, ermöglichen.

Mit Hilfe problemorientiert anpassbarer Messtechnik ist es möglich, Anlagen je nach Bedarf mit hochgenauer Sensorik zu instrumentieren und autonom Daten über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen. Eine eigene IoT-Plattform sorgt für dabei für das Umsetzen der Daten auf eigene Server, so dass nahtlos eine Datenanalyse und erforderlichenfalls das Training von Methoden der Künstlichen Intelligenz anschließen kann (<https://www.cit.fraunhofer.de/de/zentren/iiot/skalisens.html>). So kann sehr schnell ermittelt werden, welche Daten bzw. Sensoren und Analysemethoden wirklich einen Mehrwert für die Prozessoptimierung ermöglichen.

Darüber hinaus ist auch möglich im Labor des IIS/EAS im Anwendungs- und Testzentrum KI (<https://www.eas.iis.fraunhofer.de/innovationsthemen/kuenstliche-intelligenz/anwendungszentrum-ki.html>) kom-

plette Edge AI Systeme umzusetzen. Zur schnellen Erprobung lassen sich verschiedene Rechenplattformen, vom smarten Sensor bis zu verschiedenen SPS-Systemen in die Dateninfrastruktur einbinden, um eine passfähige Lösung für das konkrete Problem zu finden.

Derzeit wird eine Testumgebung für Sensorsysteme aufgebaut, um bereits im Labor aus den initialen Referenzmessungen eine praxiserprobte, wirtschaftlich sinnvolle und industriell einsetzbare Sensorlösung abzuleiten, um den Aufwand für Feldversuche in der realen Produktionsumgebung zu verringern und das Entwicklungsrisiko für Komponentenhersteller und Endanwender zu minimieren.

Zukünftig wird dann das in Praxisprojekten erworbene Verständnis, wie Daten, Modelle und Sensorik zur Optimierung industrieller Prozesse beitragen, mit der Ausstattung des Anwendungs- und Testzentrums zu einem Leistungsangebot gebündelt, das Industrieunternehmen von einem „Readiness check“ bis zum schnellen Durchlauf einer Machbarkeitsstudie zur Validierung des Nutzens und einem Konzept für die Verfestigung einen herstellereutralen Transfer von hochperformanten Digitalisierungslösungen beinhaltet.

**Fraunhofer IIS**  
Institutsteil Entwicklung Adaptiver  
Systeme EAS

Dr. Dirk Mayer

Münchner Straße 16  
01187 Dresden

(+49) 351 45691-0  
dirk.mayer@eas.iis.fraunhofer.de  
www.iis.fraunhofer.de

# NALYSES

## Grüner Digitaler Zwilling



Abb. 1. Zirkuläre Transformation - Mit dem digitalen grünen Zwilling auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft

Mit dem digitalen Produktzwilling zum kreislauffähigen und nachhaltigen Scheinwerfer

Wie können Scheinwerfer im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft gestaltet werden? Dieser Frage geht das Fraunhofer IEM im neuen Forschungsprojekt NALYSES nach. Gemeinsam mit Hella, BMW und weiteren Partnern aus Industrie und Wissenschaft betrachtet es dazu den gesamten Produktlebenszyklus von der Designphase über Produktion und Transport bis hin zur Nutzungsphase sowie verschiedene End-of-Life- und Kreislaufstrategien. Das Projekt wird bis 2025 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

### Nachhaltiges Design für eine Kreislaufwirtschaft

Zirkuläre Strategiekonfigurationen sind das Herzstück der Kreislaufwirtschaft: Anstatt sich auf eine bestimmte Strategie festzulegen, lädt das Konzept der Kreislaufwirtschaft dazu ein, eine breite Palette von Kreislaufstrategien zu kombinieren. Zirkuläre Systeme sind daher häufig eine kombinierte Umsetzung sogenannter R-Strategien wie Remanufacturing oder Recycling. Zirkuläre Transformationen führen zu Systemkonfigurationen mit erhöhter Komplexität. Die dynamische Komplexität bzw. das kontraintuitive Verhalten komplexer Systeme ergibt sich aus den vielfältigen Wirkungszusammenhängen zwischen Systemelementen, Akkumulationsprozessen sowie Verzögerungen und Nichtlinearitäten im Systemverhalten. Das bedeutet auch, dass die Schaffung von Synergien und das Management von Kompromissen oder „trade-offs“ zwischen Strategien im Mittel-

punkt des Kreislaufwirtschaftsdenkens stehen. So steht etwa die Strukturintegration von Sensorik und Aktorik dem Recycling entgegen, eröffnet aber durch die Erfassung realer Betriebsdaten neue Potenziale zur Nachhaltigkeitsoptimierung. Und diese sollte idealerweise bereits im Produktentwicklungsprozess geschehen, da 80% der Umweltkosten in dieser Phase festgelegt werden.

Die Gestaltung kreislauffähiger Produkte hängt somit von der Gestaltung ganzer kreislauffähiger Systeme ab, die von komplexen Wertschöpfungsketten und Netzwerken mit zahlreichen Akteuren abhängen. Ein ganzheitlicher Designansatz, der sich auf die Kreislaufwirtschaft konzentriert, berücksichtigt nicht nur das physische Design des Produkts, sondern auch die Interaktion mit der Infrastruktur (z. B. Einrichtungen, die Wartungs- und Recyclingaktivitäten ermöglichen), den Wertschöpfungs- und Lieferketten sowie den Akteuren und Technologien, die für das Funktionieren eines zirkulären Produktsystems erforderlich sind.

Dreh- und Angelpunkt des NALYSES-Projekts ist daher ein digitaler Produkt- und Prozesszwilling, der Digitale Grüne Zwilling, den das Fraunhofer IEM am Beispiel eines Scheinwerfers entwickelt. Der digitale Zwilling ermöglicht es, dessen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck mittels Life Cycle Inventory Assessment in kürzester Zeit zu ermitteln. Gekoppelt in einem hybriden Simulationsmodell mit weiteren Submodellen und realen Betriebsdaten können beispielsweise der Einfluss verschiedener R-Strategien und die Auswirkungen der Werkstoffauswahl bereits in der Designphase bewertet werden.

### Digitalisierung von Produktionsprozessen und Lieferketten

Das Spektrum der von den Simulations- und LCI-Systemmodellen verarbeiteten Daten reicht vom Material- und Energiebedarf in der Produktionsphase bis hin zu realen Betriebsdaten aus der Sensorik des Fahrzeugs und des Scheinwerfers selbst. Mit dieser Datenbasis können Informationen und Erkenntnisse aus jeder Stufe der Lieferkette und aus jeder Lebensphase in den Designprozess einfließen. Dies umfasst sowohl die Gewinnung von Neumaterial, alle EOL- und Recyclingprozesse, die endgültige Entsorgung und den Transport als auch die Nutzungsphase. Diese Daten bilden ein dynamisches Life Cycle Inventory Vordergrundmodell, das mit der ecoinvent-Datenbank über das Python-LCA-Framework Brightway2 mit den Hintergrundprozessen kombiniert wird, um das gesamte Cradle-to-Grave-System der betrachteten Lieferkette abzudecken.

Der Open-Source-Code von Brightway2 bietet ein hohes Maß an Flexibilität und ermöglicht das Hinzufügen neuer Funktionalitäten, die weit über das Life Cycle Assessment hinausgehen. So kann der LCA-Ansatz u.a. um Kosten- und Verhaltensmodelle erweitert werden, um den ökologischen Blickwinkel mit ökonomischen und technischen Realitätsausschnitten zu ergänzen und mögliche Synergien und Trade-offs antizipieren zu können. Schließlich muss ein nachhaltiger Produktentwicklungsprozess auch die ökonomische und technische Quantifizierung von Prozess-, Transport-, Infrastruktur-, Wartungs- und Designänderungen umfassen.





Abb. 2. Seit vielen Jahren arbeiten Hella und das Fraunhofer IEM daran, die Entwicklung von Scheinwerfern effizienter zu gestalten. Im Projekt NALYSES fokussieren sie nun die Aspekte Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Darüber hinaus werden die Hintergrundprozesse der LCI-Datenbank um Szenario-Daten erweitert, um sicherzustellen, dass die Modellierung zukünftiger Lieferketten auch den sich ändernden Energiemix widerspiegelt. Die innovative Verbindung von Life Cycle Assessment und System Dynamics ermöglicht ein schlankes, aber leistungsstarkes Werkzeug zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses und zum Management von Kompromissen zwischen Kosten und potenziellen Umweltauswirkungen in einem zunehmend komplexen regulatorischen Umfeld.

Die Automobilindustrie ressourcenschonender und emissionsärmer gestalten

Die Ergebnisse des Projekts sollen in die Entwicklung zukünftiger Scheinwerfergenerationen einfließen, aber auch für andere Anwendungs- und Produktbereiche nutzbar gemacht werden.

Im Kern soll daher anhand von Scheinwerfern erforscht werden, wie Produkte und Rohstoffe im Sinne einer

Kreislaufwirtschaft möglichst lange genutzt werden können. Relevant ist das Projekt vor allem aber auch deswegen, weil die Erkenntnisse sowie der Digitale Grüne Zwilling weit über den Scheinwerfer als Produkt hinausreichen. So sollen die Ansätze aus dem Projekt auch auf Fahrzeugkomponenten aus dem Elektronikbereich und nicht zuletzt auch auf andere Branchen übertragen werden, wie beispielsweise auf die Fertigung von Haushaltsgeräten.

#### Das Projekt NALYSES:

NALYSES steht für „Nachhaltigkeitsoptimiertes Life Cycle Assessment“. Das Fraunhofer IEM ist mit seiner Erfahrung in den Bereichen digitale Transformation und Systemmodellierung federführend bei der Entwicklung des digitalen Produkt- und Prozesszwilling. Hella unterstützt das Forschungsprojekt vor allem mit seiner Kompetenz in der automobilen Lichttechnik. BMW definiert die Gesamtsystemanforderungen der Automobilhersteller, während Covestro, Geba und die Hochschule Hamm-Lippstadt ihre

Expertise im Bereich nachhaltiger Materialien einbringen. Das Heinz-Nixdorf-Institut der Universität Paderborn steuert seine Erfahrungen im Bereich der Lichtsimulation bei. Miele beteiligt sich an dem Forschungsprojekt, um die Erkenntnisse auch auf andere Branchen zu übertragen.

#### Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM

Dr.-Ing. Christian Henke

Zukunftsmeile 1  
33102 Paderborn

(+49) 5251 5465 -126  
christian.henke@iem.fraunhofer.de  
www.iem.fraunhofer.de

# ZIM-Netzwerk AkuPro und der Mittelstand in seiner Doppelrolle als Problemgeber und Ideentreiber



**AkuPro**  
Akustische Analysen in  
Produktionssystemen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

*Im Labor getestet: Dass die Überwachung von Schweißprozessen auf Basis von Geräuschemission und KI-Modellen funktioniert, wurde im Projekt »AKoS - Akustische Kontrolle von Schweißnähten bei sicherheitskritischen Bauteilen im Rahmen der Qualitätssicherung« unter Beweis gestellt*

Lösungen zur akustischen Überwachung von Produktionssystemen erschaffen, Krisen gemeinsam bewältigen, Synergien nutzen.

Nachhaltigkeit spielt in Unternehmen gerade in Zeiten multipler Krisen eine immer wichtigere Rolle. Dabei kann Nachhaltigkeit aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden. Eine hiervon ist die Ressourceneffizienz in der Fertigung. Lösungsansätze mit Künstlicher Intelligenz bieten das Potenzial sowohl die Produktivität, die Sicherheit und Qualität in industriellen Fertigungsprozessen deutlich zu steigern. Der ressourcenschonende Umgang rückt auch in der industriellen Produktion immer mehr in den Fokus. Zudem stehen produzierende Unternehmen unter enormem Zugzwang. Globaler Wettbewerb, Kostendruck, einzuhaltende Lieferzeiten, Fachkräftemangel und hohe Anforderungen an die Produktqualität bei immer größerem Durchsatz erfordern neue Herangehensweisen.

Das ZIM-Netzwerk „Akustische Analysen in Produktionssystemen“ (kurz AkuPro) hat sich die gänzliche Vermeidung von Prüfschrott, Ausschuss oder zu früh ausgetauschte Maschinenbauteile aufgrund fehlender Überwachungsmöglichkeiten zum Ziel gesetzt.

Hierbei liegt der Fokus vor allem auf akustischen Informationen. Luftschall, der bei industriellen Produktionsprozessen entsteht, soll genutzt und durch eine automatisierte Datenauswertung mittels KI interpretiert werden. Ziel des Netzwerkes ist es somit, Prozesse oder Maschinenbauteile durch den Einsatz akustischer Sensoren zu überwachen und damit die Qualitätssicherheit industrieller Produktionsprozesse zu gewährleisten. Ressourcenaufwendige, zerstörende Prüfungen können dadurch vermieden werden, Fachkräfte entlastet und Maschinenstillstände sowie damit verbundene Produktionsausfälle durch vorrausschauende Wartung verhindert werden.

Das vom BMWK geförderte Innovationsnetzwerk besteht derzeit aus sieben kleinen und mittelständischen Unternehmen und einem assoziierten Partner. Zusammen mit dem Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau und dem Fraunhofer

IDMT konnten strategische Synergieeffekte spezifischer Anwendungsfälle eruiert werden. In gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekten sollen künftig konkrete Lösungen zur akustischen Überwachung von Produktionssystemen entwickelt werden.

Insbesondere mittelständische Unternehmen profitieren im ZIM-Programm von attraktiven Fördermöglichkeiten. Für nähere Informationen zum Netzwerk und den Kooperationsmöglichkeiten wenden Sie sich gern an Kati Breitbarth vom Fraunhofer IDMT.

**Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT**

Kati Breitbarth

Ehrenbergstraße 31  
98693 Ilmenau

(+49) 3677 467 361  
kati.breitbarth@idmt.fraunhofer.de  
www.idmt.fraunhofer.de



# Dünnschichtsensorik für die Temperaturmessung in der Kaltmassivumformung



Umformstempel mit Dünnschichtsensorik zur Temperatur- und Verschleißmessung

Die Herstellung von hochwertigen kaltgeschmiedeten Bauteilen unter Berücksichtigung der Anforderungen an Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit erfordert eine hohe Prozesssicherheit und lange Werkzeugstandzeiten. Hierfür bietet die Digitalisierung neue Möglichkeiten das Prozessverständnis durch Inline-Datenerfassung zu erhöhen. Die Messung von Prozessparametern und die Detektion von Werkzeugverschleiß in der Nähe von hochbelasteten Umformzonen stellt aktuell noch eine große Herausforderung dar. Integrierte und verschleißfeste Dünnschichtsensoren sind hier ein innovativer Ansatz eine in situ Datenerfassung zu realisieren. Dazu wird am Fraunhofer IST ein sensorisches Dünnschichtsystem entwickelt, das direkt in der Umformzone am Fließbund des Werkzeugs die Temperaturverteilung und den Verschleiß messen soll.

## Der Sensorische Umformstempel

Als Lösung wurde ein Umformstempel für die Anwendung im Napf-Rückwärts-Fließpressen in der Kaltmassivumformung entwickelt. Im Bereich des Fließbundes sind in der hochbelasteten Umformzone entlang des Stempelschaftes drei Temperatursensoren strukturiert sowie eine umlaufende Struktur zur Verschleißdetektion. Das Schichtsystem mit einer Gesamtdicke von ca. 10 µm basiert auf einer elektrischen Isolationsschicht aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, die mittels PVD (physical vapor deposition) Beschichtung in einer Di-

cke von ca. 5 µm appliziert wird. Für die Sensorschicht wurde eine 200 nm dicke Metallschicht aus Chrom gewählt. Durch die Integration von mäanderförmigen Sensorstrukturen wird die orts aufgelöste Messung der Temperatur ermöglicht, die durch eine Kombination von Fotolithographie und nasschemischen Ätzverfahren hergestellt werden. Die elektrischen Leiterbahnen befinden sich am Stempel und werden in den unbelasteten Bereich geführt, um dort Leitungen zur Kontaktierung anzubringen. Über der strukturierten Sensorschicht wird eine weitere Schicht zur elektrischen Isolation und zum Verschleißschutz aufgebracht.

Die Ergebnisse des Projekts werden genutzt, um die erstmalig in der Umformzone ermittelten Messdaten mit der Simulation abzugleichen und Prozessoptimierungen abzuleiten. Darüber hinaus wird die erarbeitete Lösung zur Temperatur- und Verschleißmessung in weiteren anwendungsnahen Laborversuchen getestet. Dabei wird auch die entwickelte Messelektronik zur drahtlosen Datenübertragung untersucht. Perspektivisch soll so ein Messsystem mit integrierter Auswerteelektronik für die kombinierte Erfassung von Temperatur und Verschleiß entstehen.

## Digitalisierung und Überwachung von Produktionsprozessen

Der ersten Messergebnisse des entwickelten Sensorsystems mit integrierter Messelektronik zeigten in anwendungsnahen

Laborversuchen sehr gute Ergebnisse im Abgleich mit den Simulationsdaten und dem erwarteten Temperaturprofil. Das entwickelte sensorische Dünnschichtsystem eröffnet weitere Anwendungsfelder im Bereich der Sensorik für tribologisch hochbelastete Werkzeuge. Multisensorische Dünnschichtsysteme bieten zudem weitreichende Möglichkeiten für die in situ Überwachung in cyber-physischen Produktionssystemen.

## Das Projekt

Die beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen des Industrieforschungsprogramms (IGF-Nr. 21520 N) erzielt, an dem das Fraunhofer IST gemeinsam mit dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart und der Hahn-Schickard-Forschungsgesellschaft arbeitet. Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V.) gefördert.

### Fraunhofer-Institut für Schicht- & Oberflächentechnik IST

Anna Schott, M.Sc.

Bienroder Weg 54e  
38108 Braunschweig

(+49) 351 2155-674  
anna.schott@ist.fraunhofer.de  
www.ist.fraunhofer.de



# Softe Wandlermaterialien für sensorische, aktorische und generatorische Anwendungen

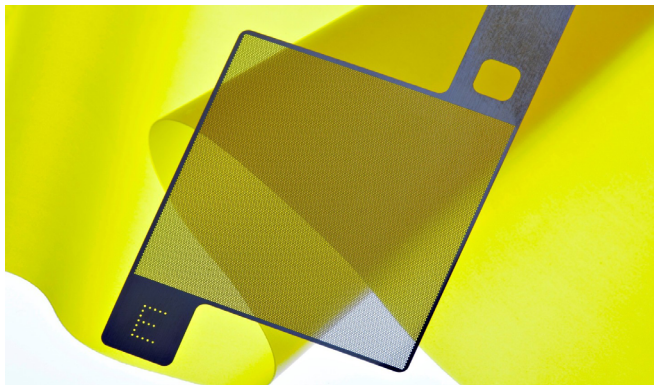


Abb. 1. Mikrostrukturierte Metallelektrode und weiche Elastomerfolie



Abb. 2. Typen von Piezoelekturen. Links: Irradiation cross-linked Polypropylen (IXPP). Rechts: Parallel-Tunnel FEP

Trends und Technologien wie Industrie 4.0, Internet der Dinge (IoT) oder vorausschauende Instandhaltung bestimmen seit einigen Jahren die Entwicklungen im Maschinen- und Anlagenbau. Für smarte Systeme, die selbstanpassend und energieautark auf veränderliche Betriebsumgebungen reagieren, ergeben sich darüber hinaus weitere Anwendungsmöglichkeiten in anderen Branchen, beispielsweise im Automobilbau, der Luft- und Raumfahrt oder der Medizintechnik. Für die Realisierung solcher intelligenten Systeme steigt der Bedarf an günstiger Sensorik mit guter Integrationsfähigkeit.

## Softe Wandlerwerkstoffe

zeichnen sich zum einen durch die Fähigkeit elektrische in mechanische Energie umzuwandeln und zum anderen durch ihre geringe Dichte, ihre hohe Flexibilität und ihrem großen Deformationsvermögen aus. Sie können dabei nicht nur aktorisch, sondern auch sensorisch und generatorisch genutzt werden. Als bidirektionale Wandlerysteme ermöglichen sie die Realisierung verschiedenartiger aktiver und adaptiver Systeme. Im Vergleich zu Festkörperwandler, wie z. B. piezokeramische Wandler, werden bedarfsgerechte Geometrien und Anwendungen an bisher unzugänglichen Orten ermöglicht.

## Gestaltbare Kraftsensorik mittels dielektrischer Elastomere

Während viele Kraftsensoren auf komplexen Verformungskörpern basieren, deren Dehnung mit dem resistiven Messprinzip (Dehnungsmessstreifen) erfasst wird, nutzt die am Fraunhofer LBF entwickelte DELTA-C®-Sensorik ein kapazitives Messprinzip an dünnen Elastomerfolien. Der besondere Clou liegt in der patentierten Mikrostrukturierung der Metallelektroden, die eine hohe Sensitivität und Linearität der Sensorik ermöglicht. Die dünnen Elektroden (siehe Abbildung 1) weisen ein hexagonales Lochmuster im Submillimetermaßstab auf,

das im Ätzverfahren hergestellt wird. Sie sind von Elastomerfolien aus Naturkautschuk getrennt, die als elastisches Dielektrikum dienen. Integriert in gefräste Aluminiumgehäuse ergeben sich durch diesen Schichtverbund robuste, stark überlastfähige Kraftsensoren. Diese weisen eine maximale Hysterese von nur 2,7 % des Messbereichs auf. Über das Design der Elektroden und des Gehäuses können sowohl der Messbereich als auch die Sensitivität leicht skaliert werden. Inhärente Hystereseeffekte des Materials können auf Auswertungsseite mit KI-Algorithmen weiter reduziert werden, was besonders effizient ist, da die Elektronik verglichen mit der Hardware günstig ist.

## Energy Harvesting mittels Piezoelekturen

Piezoelekturen (auch Ferroelekture genannt), sind polymerbasierte Materialien, die sich insbesondere durch ihre hohe mechanische Flexibilität (E-Modul von weniger als 1 MPa), geringe Dichte (ca. 400 kg / m<sup>3</sup>) und hohe kombinierte Wandlerkonstanten (Piezoelektrische g- und d-Konstante) auszeichnen. Die Ladungskoeffizienten d liegen in der gleichen Größenordnung wie bei Piezokeramiken und die Spannungskoeffizienten g sind i. d. R. deutlich höher. Dies führt zu Vorteilen für die Energieernte gegenüber anderen piezoelektrischen Werkstoffen. Typische Ferroelekturen basieren auf Materialien wie beispielsweise geschäumtem Polypropylen, PTFE oder FEP.

Eine typische Anwendung ist die Sensorik und seit dem vergangenen Jahrzehnt auch das Energy-Harvesting. Das Fraunhofer LBF kann auf eigene Vorarbeiten mit Piezoelekturen aufbauen: Im Projekt ElektreTil wurden unterschiedliche Piezoelekturen als Energy-Harvester untersucht, um durch die Funktionsintegration in Kleidungsstücken die Bewegungsenergie des Körpers in elektrische Energie umzuwandeln. Im Rahmen des Projekts konnte die Funktion von Piezoelekturen als Energy-Harvester durch die Versorgung ei-

nes LC-Displays durch Armbewegungen nachgewiesen werden. Im gemeinsamen mit dem assoziierten Fachgebiet SAM der TU Darmstadt bearbeiteten Projekt EnerVib wurden Piezoelekturen für Energy-Harvesting in vibrierenden Flugzeugstrukturen untersucht. Ziel war die Überwindung der Notwendigkeit von Kabeln in Flugzeugkomponenten. Konzepte mit PEF mit Mechanismen aus Stahl und Kohlefaser wurden numerisch simuliert und experimentell validiert. Im ruhigen Flug konnte eine Leistung im Bereich von mehreren  $\mu\text{W}$  mit weniger als einem Gramm Energy-Harvester Masse im Flugzeugflügel berechnet werden. Durch Clustering-Ansätze konnte die Leistung in den mW-Bereich gesteigert werden.

Softer Wandlermaterialien sind insbesondere interessant für Hersteller im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus, da sie die Erfassung von statischen und dynamischen Kräften zur Zustandsüberwachung ermöglicht und die Integration von Kraftsensorik an bisher unzugänglichen Stellen realisierbar macht. Außerdem erlaubt die Technologie autarke Sensorik durch leichte und effiziente Energy-Harvesting Systeme. Das Fraunhofer LBF besitzt in Zusammenarbeit mit seinen Partnern Kompetenzen im Bereich der Systemauslegung, -simulation und Prototypenfertigung von Sensor- und Energy-Harvesting Systemen mit dielektrischen Elastomeren oder Piezoelekterfolien.

## Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Hendrik Holzmann, M.Sc.

Bartningstraße 47  
64289 Darmstadt

(+49) 6151 705-501  
hendrik.holzmann@lbf.fraunhofer.de  
<https://www.lbf.fraunhofer.de>



17 – 21 APRIL 2023

# FRAUNHOFER AUF DER HANNOVER MESSE

## HALLE 16 STAND A12

#HM23 [hannovermesse.com](https://hannovermesse.com)

 **Fraunhofer**

**HOME OF INDUSTRIAL PIONEERS**

 **HANNOVER MESSE**

## ONLINE NACHWUCHS KOLLOQUIUM



- Drehscheibe für aktuellen Austausch von Wissenschaft & Technologie
- Vernetzung von Wirtschaft und Forschung



**B.Sc. André Saltymakov**  
Mit Formgedächtnislegierung  
zu neuen Ansätzen  
adaptiver Triebwerksgondeln



**B.Sc. Florian Forsthuber**  
Physics-driven data generation  
for strain-based damage  
detection on the example of an  
aerospace sandwich structure



**B.Sc. Lina Kramer**  
Neue Geschäftsmodelle  
durch kollaborative  
Zustandsüberwachung

## Wann?

**27. April 2023**  
**17:00 - 19:00 Uhr**  
**MS-Teams**

Exklusives Kolloquium für Mitglieder des Kompetenznetz



# Das Leistungsspektrum des Geschäftsbereichs Adaptronik



## Impressum

### HERAUSGEBER:

Fraunhofer-Gesellschaft  
Geschäftsbereich Adaptronik  
Postfach 10 05 61  
64205 Darmstadt  
Tel.: +49 6151 - 705 236  
Fax: +49 6151 - 705 214

info@adaptronik.fraunhofer.de  
www.adaptronik.fraunhofer.de

### SPRECHER:

Dr.-Ing. Sven Herold

### GESCHÄFTSSTELLE:

Dr.-Ing. Christoph Tamm

### REDAKTION, GRAFIK & DESIGN

B.A. Lena-Mareen Helmer  
Elvis Loos



**Fraunhofer**  
Fraunhofer-Gesellschaft