

Jahresbericht 2025

Forschung. Innovation.
Zukunft.

Jahresbericht 2025

Forschung.
Innovation. Zukunft.

www.zema.de

Ze/MA

Liebe Leserinnen und Leser,

das Jahr 2025 war für das ZeMA in vielerlei Hinsicht herausfordernd. Geprägt von dynamischen Veränderungen im wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfeld standen wir vor der Aufgabe, uns neu zu positionieren und gleichzeitig unsere hohe Qualität in Forschung und Transfer zu sichern. Externe Unsicherheiten, ein neues Geschäftsleitungsteam und notwendige strukturelle Anpassungen verlangten uns allen ein hohes Maß an Flexibilität, Engagement und Weitsicht ab.

Umso mehr erfüllt es uns mit Zuversicht und auch ein wenig Stolz, dass wir diese Phase nicht nur erfolgreich bewältigt, sondern aktiv für eine nachhaltige Neuausrichtung genutzt haben. Gemeinsam ist es uns gelungen, strategische Schwerpunkte zu schärfen, neue Kooperationen zu etablieren und innovative Forschungsfelder zu erschließen. Unsere Forschungsgruppen haben mit großem Einsatz daran gearbeitet, bestehende Kompetenzen weiterzuentwickeln und gleichzeitig mutig neue Wege zu gehen.

Die Ergebnisse dieser Anstrengungen sind deutlich sichtbar: in einer klaren Forschungsagenda, in erfolgreichen Projekteinwerbungen sowie in einer wachsenden nationalen und internationalen Vernetzung. Besonders hervorheben möchten wir die hohe Einsatzbereitschaft und Kreativität unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die diesen Transformationsprozess maßgeblich tragen.

Der eingeschlagene Kurs zeigt, dass wir auch in herausfordernden Zeiten handlungsfähig bleiben und Veränderungen als Chance begreifen können. Auf dieser Grundlage blicken wir zuversichtlich in die Zukunft des ZeMA und des Saarlandes und sind überzeugt, dass unser Institut weiterhin einen wichtigen Beitrag zur wissenschaftlichen Exzellenz und gesellschaftlichen Entwicklung leisten wird.

Wir danken allen Partnern, Förderern und Wegbegleitern für ihr Vertrauen und ihre Unterstützung in diesem besonderen Jahr.



Prof. Dr. Susan Pulham
Geschäftsführerin



Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki
Geschäftsführer

Inhalt

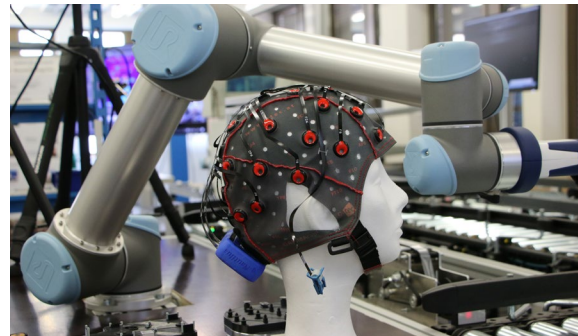
Biomechatronische Systeme	5
Immersive Mixed Reality - Multi-Immerse	9
Fertigungstechnologien	12
DEPART!Saar – (P1) Gesamtsteuerung: Schwerpunkt Technologie	16
Industrial Security	19
GrundschutzPLUS	22
Montagesysteme	26
Readi – Gestärkte Resilienz in produzierenden KMU durch agile, menschenzentrierte digitale Systeme und Systemgestaltung	32
Multimodal Smart Sensing	37
Physikalische Sensorik und Mechatronik	42
Smarte Materialsysteme	48
Smart Implants for Life Enrichment – SmILE	53
Daten zum Jahr	63
Kontakt	66

Biomechatronische Systeme

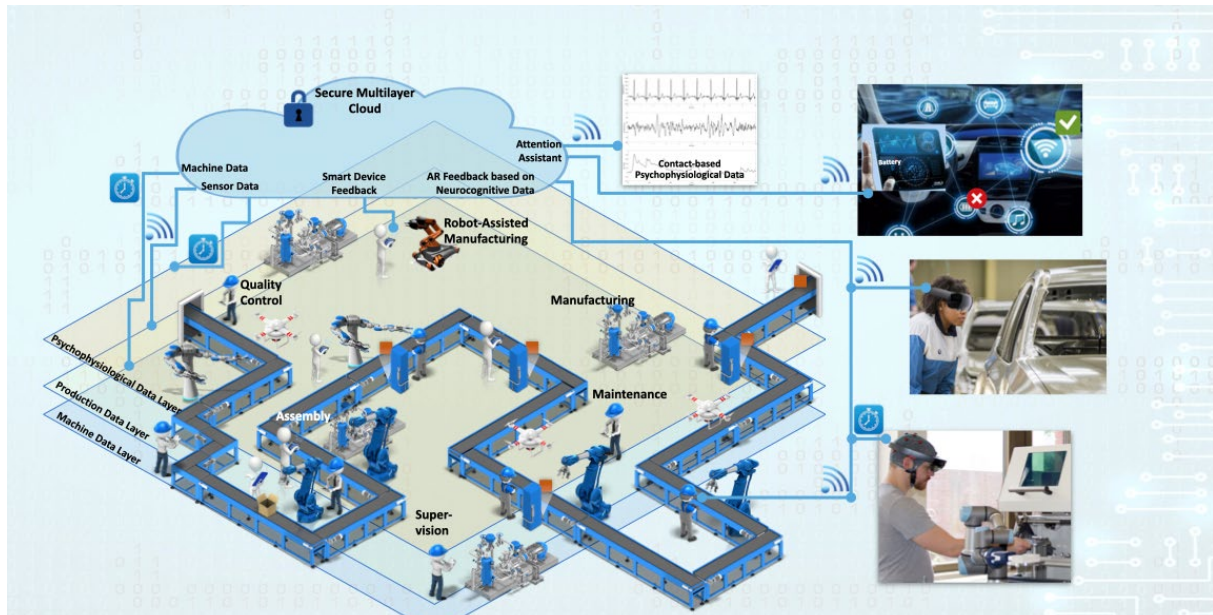
Forschungsbereich Biomechatronische Systeme



Einen interdisziplinären Schwerpunkt am ZeMA bildet der Bereich „Biomechatronische Systeme“, der die Schnittstellen zwischen Biomedizin, Informatik, Mechatronischen Systemen, Intelligenten Materialien und Bereichen wie der Mensch-Maschine/Roboter-Interaktion und sensorischer Immersion abbildet.



Zentrum für digitale Neurotechnologien



Das Zentrum für digitale Neurotechnologien – CDNS Center for Digital Neurotechnologies Saar – bündelt die Neurotechnologie-Kompetenzen im Saarland und stellt damit eine Querschnitt-Technologie für Biomedizin, Mensch-Maschine-Interaktion und sensorische Immersion dar.

Schwerpunkte sind die Neuroergonomische digitale Fabrik, Digitalisierung im OP-Saal und Immersive Mixed Reality. Das CDNS wurde als interinstitutionelles Zentrum der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar), der Universität des Saarlandes (UdS) und des Zentrums für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) gegründet. Inzwischen bietet es ein übergreifendes und kollaboratives Umfeld für Wissenschaftler:innen und Technologen aus verschiedenen Disziplinen aus der ganzen Welt.

Zusammen mit seinen Firmenmitgliedern

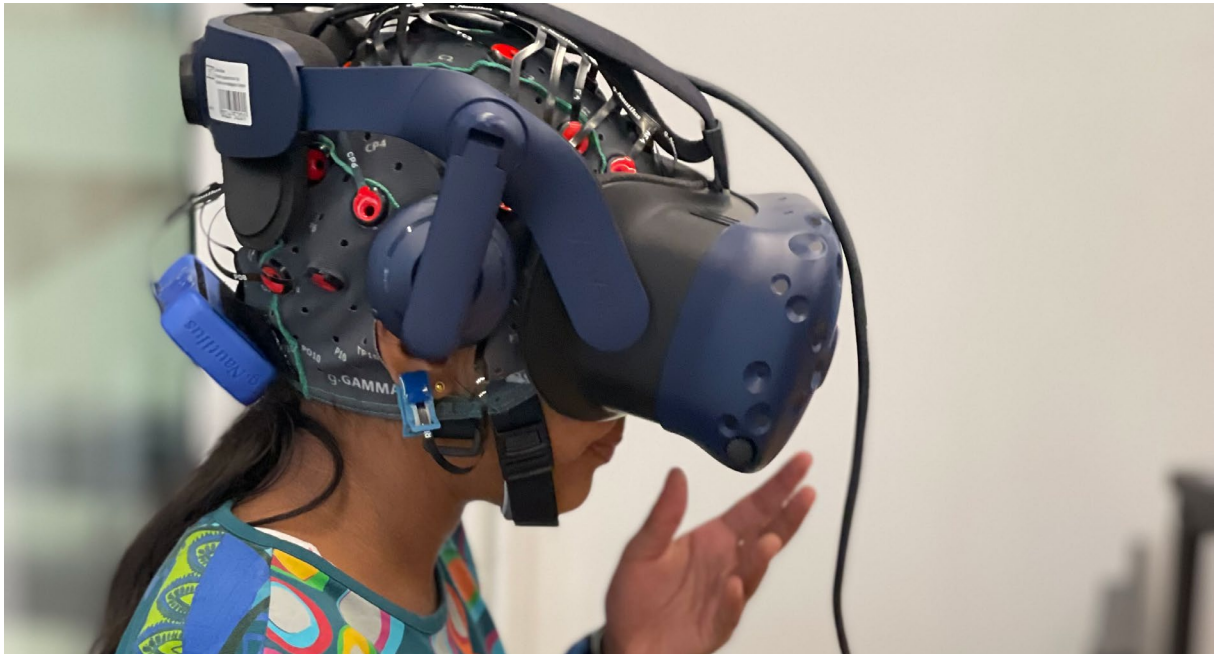
steht das Zentrum für die Verknüpfung und Umsetzung neurotechnologischer Forschung in Industrie und Gesellschaft. Das ZeMA und seine Kooperationspartner verfolgen im CDNS dabei das Ziel, Systeme zur neuroergonomischen, also „hirngerechten“ Interaktion zwischen Mensch und Maschine bzw. Mensch und empathischem Roboter im Industrie-4.0-Umfeld zu entwickeln. Dabei nimmt die Kopplung zwischen Neuro- und Physio-Ergonomie gerade in der hochdigitalisierten Produktion eine hohe Stellung ein. Die Gewinnung von Daten aus Maschinen und Prozessen zusammen mit den psychophysiologischen Daten des Menschen ermöglicht die Optimierung von Arbeitsplatzkonzepten nicht nur in der Produktion, sondern auch im klinischen Arbeitsumfeld.

Kooperationspartner des ZeMA kommen aus der medizinischen Fakultät der UdS (Chirurgie, Neonatologie, Orthopädie,

Kinder- und Jugendpsychiatrie), aus der Informatik der UdS (Human-Computer Interaction and Interactive Technologies Lab), der htw saar und medizinischen Fakultät der UdS (SNNU – Systems Neuroscience & Neurotechnology Unit).

Assoziierte internationale Forschungspartner kommen aus der University

of California San Diego (Department of Neurosciences), der University of Missouri (Cognitive and Clinical Neuroscience Laboratory), der Purdue University (Speech Perception & Cognitive Effort Lab), der University of Miami (Department of Biomedical Engineering), der University of Hawaii (Brain and Behavior Lab).



Immersive Mixed Reality - Multi-Immerse

Immersive Mixed Reality umfasst Technologien, die das Eintauchen in eine virtuelle Umgebung und Interaktionen mit dieser Umgebung ermöglichen. Multimodale Technologien gehen über standardmäßige visuelle Systeme hinaus, indem diese durch akustische und haptische Immersion erweitert werden. Unter Zuhilfenahme und der Weiterentwicklung multimodaler Mixed Reality Technologien zielt das Projekt Multi-Immerse auf eine realistische Emulation menschlicher Nähe durch die multisensorische Optimierung immersiver, virtueller Besuche. Solche Besuche sollen die Therapie schwer erkrankter Kinder und Jugendlicher in den Kinderkliniken des Universitätsklinikums des Saarlandes unterstützen.

Schwer erkrankten Kindern, die aus therapeutischen Gründen keinen Kontakt zu Angehörigen haben dürfen,

soll die Möglichkeit geboten werden, ihre Eltern bzw. Bezugspersonen in virtuellen, realitätsnahen Welten treffen zu können. Realitätsnah umfasst in Multi-Immerse insbesondere ein emotionsgetreues Erlebnis. Durch immersive Technologien mit den Sinnesmodalitäten Sehen, Hören und Fühlen soll trotz Isolation eine gewisse Realitätsnähe hergestellt werden. Konkret bedeutet dies, dass im Ronald McDonald Haus an der Universitätsklinik Homburg ein Raum für Eltern eingerichtet wird, ausgestattet mit VR-Technologie, Body-Scanner, kamerabasierten Messmethoden etc. Im isolierten Klinik-Bereich entsteht der Kontaktraum für Kinder bzw. Jugendliche. Dort wird, unterstützt durch Smarte Materialien und Roboter der menschliche Kontakt emuliert. Personen in beiden Räumen treffen sich in einer virtuellen Realität, in der die menschliche Nähe über die beschriebenen Modali-

täten hergestellt wird.

Besondere Herausforderungen sind dabei die Erstellung eines cyberphysischen Gesamt-Abbilds, insbesondere die sichere und echtzeitfähige Kommunikation zwischen den einzelnen verteilten agierenden Personen und Räumen. Kooperationspartner des ZeMA kommen aus der medizinischen Fakultät der

UdS (SNNU - Systems Neuroscience & Neurotechnology Unit, Neonatologie, Kinder- und Jugendpsychiatrie), aus der Informatik der UdS (Human-Computer Interaction and Interactive Technologies Lab), der htw saar (Embedded Robotics Lab) und dem DFKI.

Laufzeit:

01.10.2022 - 31.03.2026



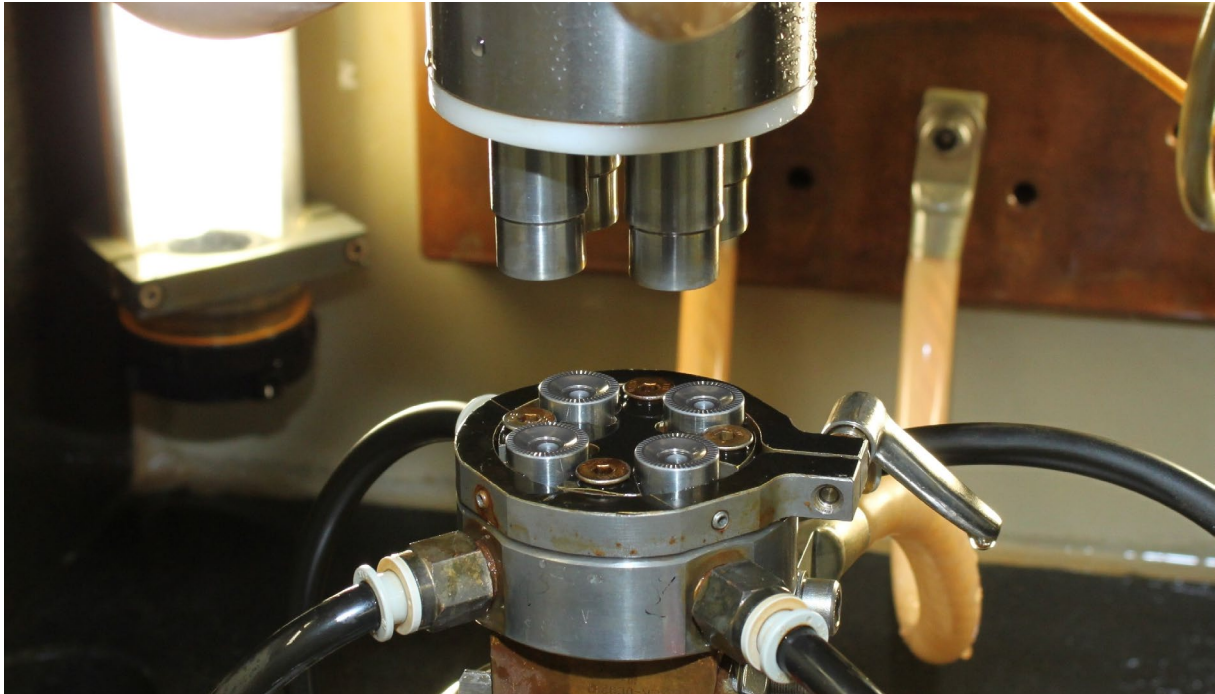
Kontakt:

Prof. Dr. Martina Lehser, Dr. Eric Wagner
+49 681 85787 – 102
martina.lehser@zema.de

- Mai, Adrian; Hillyard, Steven A.; Strauss, Daniel J. (2025): Linear modeling of brain activity during selective attention to continuous speech: the critical role of the N1 effect in event-related potentials to acoustic edges. In: Cognitive Neurodynamics 19, 110. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/s11571-025-10289-z>.
- Strauss, Daniel J.; Corona-Strauss, Farah I.; Mai, Adrian; Hillyard, Steven A.: (2025): Unraveling the effects of selective auditory attention in ERPs: From the brainstem to the cortex. In: NeuroImage 316, 121295. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121295>.
- Mai, Adrian; Hillyard, Steven A.; Strauss, Daniel J.; Corona-Strauss, Farah I. (2025): Selective Listening to Unpredictable Sound Sequences Increases Tonic Muscle Activity in the Human Vestibulocochlear System. In: eNeuro 12 (10), ENEURO.0301-25.2025. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0301-25.2025>.
- Mai, Adrian; Serman, Maja; Best, Sebastian; Jensen, Niels. S.; Foellmer, J.; Schroeder, Andreas; Welsch, Christine; Strauss, Daniel J.; Corona-Strauss, Farah I. (2022): Speech Tracking in Complex Auditory Scenes with Differentiated In- and Out-Field-Of-View Processing in Hearing Aids. In: 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Glasgow, Scotland, United Kingdom, S. 798-801. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1109/EMBC48229.2022.9870826>.
- Chowdhury, Tajbeed A.; Wagner, Eric; Motzki, Paul; Lehser, Martina (2025): Prognosis and predictive modeling of hand movements in industrial tasks using StretchSense glove and digital twin simulations. In: Proceedings Volume 13438, Digital Twins, AI, and NDE for Industry Applications and Energy Systems 2025. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1117/12.3048744>.
- Chowdhury, Tajbeed A.; Wagner, Eric; Motzki, Paul; Lehser, Martina (2025): Enhanced transfer learning algorithm with zero-shot components for dermatological diagnosis using the HAM10000 dataset. In: Proceedings Volume 13292, Photonics in Dermatology and Plastic Surgery 2025. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1117/12.3041764>.
- Naumov, Vladimir; Soleti, Giovanni; Goergen, Yannik; Mandolino, Michele A.; Wagner, Eric; Rizzello, Gianluca; Motzki, Paul (2025): Kinematic Modeling and Self-Sensing of a ShapeMemory Alloy Wire-Driven Continuum Robot. In: IEEE 8th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1109/RoboSoft63089.2025.11020932>.

Fertigungstechnolo- gien

Forschungsbereich Fertigungstechnologien



Der gezielte Einsatz von Fertigungsverfahren ist wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Umsetzung technischer Innovationen. Die Erforschung und Weiterentwicklung von Fertigungsverfahren mit Fokus auf präzisen Geometrien, funktionalen Oberflächen und spezifischen Werkstoffeigenschaften ist zentraler Bestandteil zukunftsorientierter Entwicklungen in allen Technikbereichen.

Der Forschungsbereich Fertigungstechnologien arbeitet an der Entwicklung von Feinbearbeitungsverfahren und Verfahren der additiven Fertigung, sowie an Methoden und Anwendungen der Prozessplanung und Prozessgestaltung.

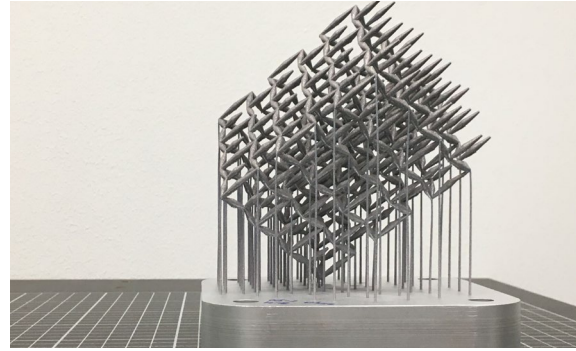
Er beschäftigt sich speziell mit:

- Experimenteller Analyse von Werkzeugen, Werkstücken, Prozessmedien und Materialien
- In-Prozess-Messungen an Maschinen und Anlagen
- Erstellung und Anwendung von Prozessmodellen für Fertigungsverfahren
- Berechnungen zur Auslegung von Fertigungsprozessen und Systemelementen
- Entwicklung und Anwendung von Methoden der Technologieplanung



Abtragende Präzisionsbearbeitungsverfahren

Gepulstes elektrochemisches Abtragen: Im Bereich Fertigungsverfahren und -automatisierung liegt ein besonderer Schwerpunkt der Forschungs- und Industrietätigkeiten auf den abtragenden Fertigungsverfahren. Speziell ist hier ein relativ neues und innovatives Fertigungsverfahren für metallische Bauteile, das gepulste Elektrochemische Abtragen (englisch: Pulse Electrochemical Machining – PECM), hervorzuheben, welches u.a. bereits in der Automobil- und Flugzeugindustrie sowie auch in der Medizintechnik Einzug gehalten hat und intensiv am ZeMA weiterentwickelt wird. Das PECM-Verfahren ermöglicht eine berührungslose Oberflächenbearbeitung und die Einbringung von Raumformen als auch Mikrostrukturen in Werkstücken, wobei die Bearbeitung aller Metalle unabhängig von ihrem Gefügestand ohne Bearbeitungsspannungen sowie ohne einen verfahrensbedingten Werkstoffverschleiß möglich ist. Die PECM-Technik findet daher immer mehr Anwendungen bei der Metallbearbeitung, z. B. bei der Herstellung komplizierter Raumformen oder bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstücke oder bei Werkstücken, die bei der Bearbeitung keiner thermischen Belastung ausgesetzt bzw. nur gering mechanisch beansprucht werden dürfen.



Additive Fertigung

Bei additiven Fertigungsverfahren werden Bauteile schichtweise aus formlosem Material (z.B. Pulver, Draht) aufgebaut. So wird bspw. beim selektiven Laserschmelzen (Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)) metallisches Pulver schichtweise auf eine Bauplattform aufgebracht und mit einem Laser lokal aufgeschmolzen. Durch das Aufschmelzen werden benachbarte Pulverpartikel miteinander verbunden. Außerdem findet eine Anbindung an die darunter liegende Schicht statt. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis ein komplettes dreidimensionales Bauteil entstanden ist. Die Gruppe additive Fertigung legt ihren Schwerpunkt auf den Fertigungsprozess und nachgelagerte Prozessschritte des Selective Laser Melting von Metallen. Mithilfe der Gestaltungsfreiheit (z.B. Gitterstrukturen oder integrierte Kühlkanäle), die diese Fertigungsklasse bietet, können vielfältige Produkte mit zum Teil einzigartigen oder gar maßgeschneiderten Eigenschaften entwickelt werden. Mit anderen Lehrstühlen und Instituten an der Universität des Saarlandes besteht in dem Gebiet außerdem eine intensive Zusammenarbeit.



Fertigungsprozessentwicklung

Der direkte Zugriff auf drei etablierte abtragende Fertigungsverfahren (gepulstes elektrochemisches Abtragen, photonische Technologien, funkenerosives Abtragen) ermöglicht uns, ein umfangreiches Portfolio im Rahmen der Fertigungsprozessentwicklung darzustellen.

Die Verfügbarkeit und der direkte Zugriff auf die Anlagentechnik der drei etabliertesten, abtragenden Fertigungsverfahren

- gepulstes Elektrochemisches Abtragen
- Photonische Technologien (Remote-Laserschweißen)
- Funkenerosives Abtragen

ermöglicht uns, in Kooperation mit unseren Projektpartnern und Lehrstühlen, sowohl an der Universität des Saarlandes als auch der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, ein umfangreiches Portfolio im Rahmen der Fertigungsprozessentwicklung darzustellen.

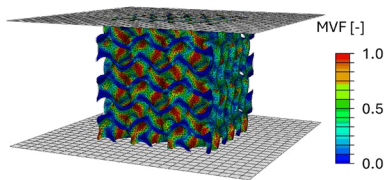


Abbildung 1: Simulation einer Gyroidstruktur unter kompressiver Belastung. Darstellung der in Martensit umgewandelten Bereiche.

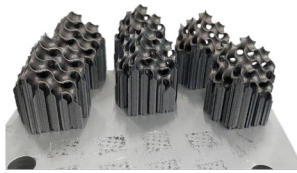


Abbildung 2: Additiv gefertigte Gyroidstrukturen aus AlSi10Mg.

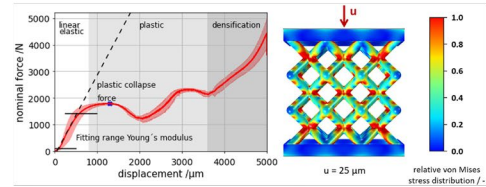


Abbildung 3: Kraft-Verschiebungsdiagramm der mit schallunterstützung gefertigten Gitterstrukturen (links) mit simulativer Visualisierung der primär deformierenden Bereichen (rechts). [Kollmannsperger et al.]

DEPART!Saar – (P1) Gesamtsteuerung: Schwerpunkt Technologie

Ziel von DEPART!Saar ist der Transfer der wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen im Gebiet der Elastokalorik in die regionale Industrie sowie die Steigerung der Effektivität, Effizienz und Geschwindigkeit dieser Transferprozesse, um den notwendigen Strukturwandel in der Region anzuregen. Hierzu werden derzeit in insgesamt sieben Werkstattprojekten innovative Transferformate entwickelt und anhand der Elastokalorik-Technologie, einer innovativen Technologie zum Heizen und Kühlen, evaluiert. Aufgabe der vier Verbundpartner des Lenkungsbereichsprojekts P1 – „Gesamtsteuerung“, UdS, ZeMA, htw saar und MILS GmbH ist es diese Aktivitäten zu koordinieren. Dabei übernimmt das ZeMA den Koordinations-Schwerpunkte Technologie, sodass vor allem die Sicherstellung der technologischen Aktua-

lität neuer Projektideen, die Entwicklung neuer Geschäftsfelder und das Monitoring im Fokus liegen.

Innerhalb von DEPART!Saar entstanden auf diesem Weg mehrere technologische Werkstattprojekte, die inhaltlich in Kooperation mit dem ZeMA-Technologiebereich Smarte Materialsysteme bearbeitet und strategisch durch die P1-Aktivitäten begleitet werden.

Folgende technologischen Inhalte werden innerhalb von DEPART!Saar fokussiert:

- Lebensdauersteigerung von NiTi-Bauteilen für elastokalorische Anwendungen durch additive Fertigung, Entwicklung eines Prototyps zur schallunterstützten additiven Fertigung, Nachbearbeitung additiv gefertigter NiTi-Bauteile sowie einer Nachhaltig-

Projekt des Jahres

keitsbilanzierung der Prozessketten.
Projektpartner: ZeMA, Uds

- Entwicklung eines funktionalen Elastokalorik-Demonstrators für die Zielapplikation Batterie- bzw. Werkzeugmaschinenkühlung, um die Machbarkeit der elastokalorischen Kühltechnologie im Rahmen eines Proof-of-Concepts zu belegen. Projektpartner: ZeMA, HYDAC COOLING GmbH

- Zirkuläre Wertschöpfung elastokalorischer Systeme durch Entwicklung neuer Lösungen für Austauschdesigns, automatisierte Demontageverfahren, Materialklemmen. Projektpartner: ZeMA, Inguls GmbH

Laufzeit:

01.03.2024 – 28.02.2027



Kontakt:

Alexander Frank
+49 681 302 – 4636
alexander.frank@zema.de

Frank, Alexander, et al. „Experimental Investigation of the Electrochemical Dissolution Behaviour of Nitinol Shape Memory Alloys by PECM.“ Proceedings INSECT 2025: 10.51382/978-3-96100-259-7.

Fries, Michael, et al. „A Simulative Evaluation of Triply Periodic Minimal Surface Structures in the Context of Elastocaloric Applications.“ Advanced Engineering Materials (2025): 2500661.

Zeiner, Matthias, et al. „Investigation of the ideal pH range for PECM machining and microstructuring of nickel 201.“ Proceedings INSECT 2025: 10.51382/978-3-96100-259-7.

Industrial Security

Forschungsbereich Industrial Security



Die Digitalisierung im Bereich von Industrieanlagen erfordert zukünftig auf die Produktion zugeschnittene Security-Lösungen zum Schutz der Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit der

Anlagen. Die Schwerpunkte liegen im Security Management und Security für die digitale Produktion.



Security Management

Ziel ist die Entwicklung von ganzheitlichen Konzepten zum möglichst einfachen Aufbau eines Informationssicherheitsprozesses im Unternehmen. Grundlage liefern bestehende anerkannte Standards und Normen im Kontext (Industrial) Security, wie z.B. BSI IT-Grundschutz, IEC 62443 und ISO 27001. Ein Fokus liegt auf der Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen zur Erhöhung des IT-Sicherheitsniveaus der KMU.



Security für die digitale Produktion

Die Schwerpunkte in diesem Bereich liegen in der Entwicklung von Lösungen zum Schutz von Produktionsanlagen. Dies betrifft sowohl Bestandanlagen (Stand der Technik oder älter) als auch zukünftige Industrie 4.0 Umgebungen. Der Fokus liegt auf automatisierten Analyseverfahren zur Bewertung der Anlagen aus Security Sicht.



GrundschutzPLUS

Problemstellung/Ausgangssituation:

Studien zeigen, dass KMU im Vergleich zu größeren Unternehmen bei der Umsetzung organisatorischer, technischer und personeller IT-Sicherheitsmaßnahmen deutlich zurückliegen. Dies kann jedoch nicht mit einer geringen Zahl an Angriffen gerechtfertigt werden, rund 70% aller KMU waren in den letzten zwei Jahren von Datendiebstahl, Industriespionage oder Sabotage betroffen. Neue Geschäftsmodelle und ein hoher Automatisierungsgrad auf Seiten der Angreifer machen auch kleine Unternehmen als Ziel interessant. Eine nicht ausreichend geschützte IT führt zu Schäden durch Datendiebstahl oder den Ausfall wichtiger IT-Systeme. Aus Sicht der KMU sind die größten Hemmnisse für mehr IT-Sicherheit fehlende Personalressourcen und Expertise sowie hoher Zeit- und Kostenaufwand. Existierende Standards, Normen und Arbeitshilfen sind oft zu komplex.

Zielsetzung:

Ziel ist die Weiterentwicklung der GrundschutzPLUS Aktivator-Plattform, sodass diese nach Abschluss des Projektvorhabens in Beratungsangeboten eingesetzt werden kann. Insbesondere bei KMU gibt es dringenden Handlungsbedarf, der sich mit den weiteren geplanten gesetzlichen und regulatorischen Anforderungen (z.B. NIS2 Richtlinie, Cyber Resilience Act) noch weiter verstärken wird. Im Vorhaben soll ein Freemium-Geschäftsmodell entwickelt werden, bei dem eine gewisse Grundfunktionalität kostenlos genutzt werden kann. Der komplette Funktionsumfang der Plattform wird kostenpflichtig angeboten. Ferner ist es ein Ziel des Vorhabens, dass Unternehmen die Plattform eigenständig einsetzen können, um das IT-Sicherheitsniveau ihres Unternehmens zu stärken.

Konzept:

Nach der Festlegung des Handlungsbe-

darf ist das erste Ziel die Ableitung von IT-Security-Informationen und Handlungsempfehlungen aus bekannten Standards (z.B. IT-Grundschutz-Kompendium, IEC 62443). Neben den bereits in der Plattform betrachteten Standards, werden zusätzliche Informationen, z.B. Security-Anforderungen und Maßnahmen aus der DIN SPEC 27076 für Kleinstunternehmen analysiert und integriert.

Ein weiterer wichtiger Baustein ist die Entwicklung eines Geschäftsmodells für die Bereitstellung der Plattform für Kunden. Dazu wird analysiert, welche Anforderungen, insbesondere Security-Anforderungen, an die Weiterentwicklung der Plattform bzw. die weitere Implementierung gestellt werden. Ziel ist dabei, eine sichere Anwendung für den Kunden zu entwickeln. Als Datenbasis für die Plattform wird im Rahmen des Projektes eine Graphdatenbank entwickelt, die schnelle Abfragen und Wartungen der Inhalte ermöglicht. Auf diese Weise sollen aktualisierte und zusätzliche Informationen einfach eingebunden werden können. Abschließend erfolgen Tests der Plattform, unter anderem in Veranstaltungen, wobei zusätzliches Feedback der Stakeholder eingeholt wird.

Verwertung:

Für das saarländische Unternehmen K4 DIGITAL GmbH aus dem IKT-Bereich trägt

die entwickelte Plattform zu einer Verstärkung der bisher am Markt angebotenen Services im IT-Security-Sektor bei. Insbesondere die Bereitstellung von Security-Dienstleistungen an kleine und mittlere Unternehmen scheitert oftmals an den mangelnden Ressourcen der KMU. Die entwickelte Plattform stellt eine ressourcenschonende Unterstützungsmöglichkeit für KMU dar und ermöglicht der K4 DIGITAL GmbH die Ausweitung der bereits am Markt angebotenen Dienstleistungen. Die wirtschaftliche Nutzbarkeit liegt dabei im Hintergrund des Vorhabens. Der Fokus liegt auf der Unterstützungsmöglichkeit der KMU zur Erhöhung des eigenen IT-Sicherheitsniveaus und der Verbreitung der Plattform.

Durch das beteiligte Forschungsinstitut ZeMA, das am ZeMA ansässige Mittelstand-Digital Zentrum Saarbrücken und den European Digital Innovation Hub Saarland (EDIH) kann der Fokus auf den Themenbereich Informationssicherheit produktionsnaher KMU deutlich verstärkt werden.

Laufzeit:

01.01.2024 – 31.12.2025



Kontakt:

Christian Siegwart
+49 681 85787 – 540
christian.siegwart@zema.de

- Frey, Florian; Frey, Georg (2025): Darstellung von Netzwerkkommunikation in Produktionsanlagen mit Augmented Reality. In: *atp* 67 (6-7), S. 54–61. DOI: 10.17560/atp.v67i6-7.2788.
- Mehmood, T., Rashid, T. U., Usman, M., Ali, M., Minhas, D. M., & Frey, G. (2025). Adapting Energy Conservation Building Code-2023 for the Diverse Climates of Pakistan: A Path to Affordable Energy Efficiency and Sustainable Living. *Buildings*, 15(17), 3053.
- Minhas, D. M., Usman, M., Raja, I. B., Wakeel, A., Ali, M., & Frey, G. (2025). Virtual energy replication framework for predicting residential PV power, heat pump load, and thermal comfort using weather forecast data. *Energies*, 18(18), 5036.
- Rasool, M. B., Shah, U. M., Imran, M., Minhas, D. M., & Frey, G. (2025). Invisible eyes: Real-time activity detection through encrypted Wi-Fi traffic without machine learning. *Internet of Things*, 31, 101602.
- Shah, U. M., Minhas, D. M., Kifayat, K., Shah, K. A., & Frey, G. (2025). Threat Modeling and Attacks on Digital Twins of Vehicles: A Systematic Literature Review.
- Siegwart, C.; Krammel, M.; Scherhag, F.; Frey, G. (2025): Security Lieferantenmanagement zur Absicherung der Lieferkette. In: *Automation 2025*, VDI-Berichte 2457, S. 629–643.

Montagesysteme

Forschungsbereich Montagesysteme



Montagesystemplanung und Digitalisierung

Die Gruppe „Montagesystemplanung und Digitalisierung“ erforscht datengetriebene, menschenzentrierte Lösungen zur Planung und Optimierung adaptiver Montagesysteme und transferiert diese gezielt und praxisnah – insbesondere in kleine und mittlere Unternehmen (KMU).



Digitale Fabrik und Automatisierungssysteme

Die Gruppe „Digitale Fabrik und Automatisierungssysteme“ entwickelt und erforscht praxisnahe Lösungen für die Planung, Inbetriebnahme und den Betrieb von wandlungsfähigen (teil-) automatisierten Montagesystemen. Der Einsatz digitaler Werkzeuge steht dabei im Fokus.



Automobilmontage und Produktion alternativer Antriebstechnologien

Die Gruppe „Automobilmontage und Produktion alternativer Antriebstechnologien“ hat ihren Schwerpunkt in der Entwicklung neuartiger Produktionsprozesse und Betriebsmittel für die automobilen Endmontage als auch für hochautomatisierte Fahrzeuge und Wasserstofftechnologien.



Industrierobotik und Mensch-Roboter-Kooperation

Die Gruppe „Industrierobotik und Mensch-Roboter-Kooperation“ erforscht den anwendungsbezogenen Einsatz sensibler und kognitiver Roboter, die sehen, fühlen und sicher mit Menschen kooperieren. Ziel ist die Anwendung in dynamischen Produktionsumgebungen.



Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung automatisierter Fahrzeuge in der Produktionslinie

Bedingt durch die Entwicklung des Autonomen Fahrens verändert sich das Automobil vom klassischen Fahrzeug hin zum voll vernetzten cyberphysischen Multisensorsystem. Weiterhin halten neue Antriebstechnologien Einzug.

Diese Entwicklungen erfordern neue Produktions- und Inbetriebnahmeprozesse zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der automatisierten Systeme. Der Themenbereich adressiert diese Herausforderungen. Daher steht die Entwicklung von innovativen Prozessen und Betriebsmitteln zur Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge im Fokus. Auf Basis einer übergreifenden Produkt- und Prozessanalyse werden bestehende Produktionsprozesse optimiert und neue Lösungskonzepte entwickelt.

Ziel ist die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen über den gesamten Produktlebenszyklus. Basierend auf einer korrekten Erfassung und Erkennung der Umgebung soll das Fahrzeug bereits in der Produktion in einen sicheren und fahrfähigen Zustand versetzt werden. Hierdurch soll die klassische Parallelstruktur des aktuellen End-of-Line Bereiches durch die Verlagerung einzelner Prozesse in die Fließmontagelinie eliminiert werden.



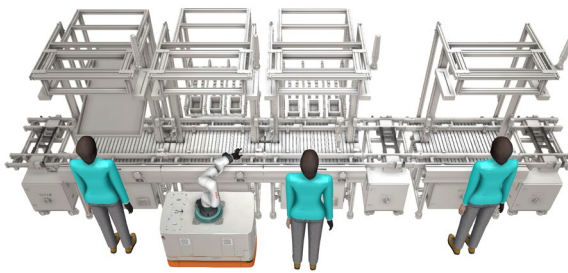
Produktionssysteme für Wasserstofftechnologien

Der Themenbereich fokussiert die Entwicklung von Prozessen und Technologien zur wirtschaftlichen Serienproduktion von Wassertechnologien. Das adressierte Spektrum umfasst dabei die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette von der Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse, über den Transport, die Speicherung und die Wasserstoffaufbereitung bis zur Rückverstromung mittels Brennstoffzelle.

Die entwickelten Produktionssysteme sollen dabei skalierbar und wandlungsfähig sein, da sich die Wasserstoffwirtschaft noch im markthochlauf befindet und damit häufige Produktänderungen und -weiterentwicklungen zu berücksichtigen sind.

Zusätzlich wird die Realisierung von skalierbaren Ausbaustufen wie einer manuellen, teilautomatisierten und vollautomatischen Montage fokussiert. Weiterhin ist der Ausbau des aufgebauten Netzwerkes, als auch der Wissenstransfer, auch überregional, ein Ziel.

Langfristig soll ein Reallabor mit realen Produktionssystemen in einer produktionsnahen Testumgebung geschaffen werden. Auf Grundlage der Kompetenzentwicklung sollen so kritische Fragestellungen praxisnah adressiert werden.



Ganzheitlicher Digitaler Zwilling in der Produktion

Um den aktuellen Herausforderungen von Kunden, Politik und Umwelt gerecht zu werden, müssen sich Entwicklungs- und Produktionsprozesse anpassen und stetig flexibler und wandlungsfähiger werden. Ein vielversprechender Ansatz hierzu ist die Virtualisierung der Produkte, Prozesse und Betriebsmittel in Form von digitalen Abbildern. Diese ermöglichen eine parallele simulative Analyse, und Optimierung der Produktionssysteme mit deren Prozessen. Diese Abbilder werden als Digitale Zwillinge (engl. „Digital Twin“) bezeichnet und sind virtuelle Modelle eines Produktes/einer Produktionsanlage. Digitale Zwillinge können in drei Gruppen gegliedert werden:

- Product Twin: Digitales Abbild eines physischen Produkts
- Production Twin: Digitales Abbild eines physischen Produktionssystems
- Performance Twin: Digitales Abbild zur Datennutzung für die Optimierung von Produkt und Produktionssystem

Derzeit wird am ZeMA an einem Digitalen Zwilling geforscht, der geeignet ist die Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel abzubilden. Dazu werden insbesondere Aspekte, der einfachen Modellierung und Kompatibilität mit bestehenden Ansätzen wie z.B. der Verwaltungsschalen berücksichtigt.



Fähigkeitsbasierte Produktion und KI-Agenten

Die steigende Marktvolatilität erfordert einen Wandel von statischen Abläufen hin zu einer dynamischen, fähigkeitsbasierten Orchestrierung der Produktion. Zentrales Element ist die Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS). Als digitale Repräsentanz definiert sie Betriebsmittel über deren technische Fähigkeiten, statt über starre Programmierung. Diese Abstraktion entkoppelt die Produktionslogik von der Hardware und steigert die Rekonfigurationsgeschwindigkeit erheblich.

Um diese Komplexität beherrschbar zu machen, wurde am ZeMA ein industrienahe Demonstrator entwickelt. Dieser validiert die praktische Umsetzung wandlungsfähiger Systeme und bereitet die Integration agentenbasierter Steuerungen in bestehende Automatisierungslandschaften vor.

Ein Kernaspekt ist der Einsatz KI-basierter Agenten innerhalb der AAS. Diese übernehmen das automatisierte Matching zwischen Produktanforderungen und verfügbaren Ressourcen. Für Anwender reduziert dies den Engineering-Aufwand massiv: Umrüstungen oder Variantenwechsel erfolgen nicht mehr durch Neuprogrammierung, sondern durch adaptive Rekonfiguration auf Basis der hinterlegten Fähigkeitsbeschreibungen.



Mess- und Datenplanung zur Digitalisierung von Prozessen

Eine hochwertige Datenbasis ist entscheidend und unerlässlich für die Digitalisierung sowie den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion. Die Mess- und Datenplanung spielt daher eine zentrale Rolle. Sie bestimmt, welche Daten erfasst werden sollen und welchem Zweck sie dienen, um den Aufwand der Datenaufbereitung zu minimieren und eine optimale Datenbasis zu schaffen.

Ein in Zusammenarbeit mit der Universität des Saarlands entwickelter Leitfaden unterstützt bei der Datenplanung und -auswertung. Dies gewährleistet eine hohe Datenqualität und ermöglicht eine transparente und digitalisierte Montage. Die kombinierten Produkt- und Prozessdaten mit Expertenwissen führen zu einem effektiven Wissensmanagement und sind die Grundlage für menschenzentrierte Assistenzsysteme, die die kognitive Belastung der Mitarbeitenden verringern.

Montageassistenzsysteme zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung nutzen Sensoren zur Prozessprüfung und integrieren KI. Dadurch wird die Qualität gesteigert und Montagefehler reduziert. Besonders in Bereichen mit hohen Flexibilitätsanforderungen sind diese Systeme von großem Nutzen.

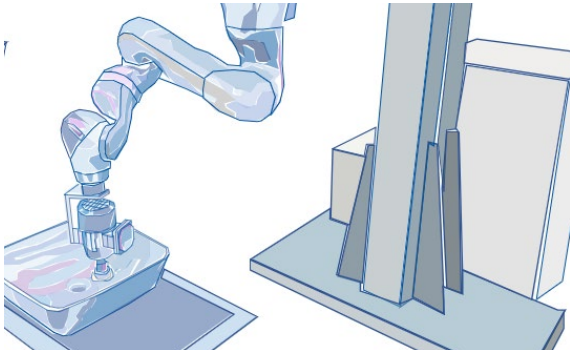


Montagegerechte Produktgestaltung als Automatisierungsgrundlage

Die Forschungsgruppe entwickelt effiziente und vernetzte Montagesysteme, wobei das prozessorientierte Toleranzmanagement (TM) ein Schwerpunktthema dabei ist. Durch den gezielten Einsatz von Methoden werden Komplexität beherrscht und technologische Verbesserungen in der Montage erreicht. Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden ganzheitlich analysiert, um Montageprozesse zu entwickeln oder bestehende zu optimieren.

Das TM spielt eine zentrale Rolle bei der Analyse von Toleranzen und der Identifikation kritischer Fügeprozesse. Dies ermöglicht die Reduzierung von Variantenvielfalt und eine gezielte Prozessoptimierung. Die Erkenntnisse fließen in die Planung innovativer Montagesysteme ein, die von manuellen bis hin zu vollautomatisierten Prozessen reichen.

Die Methoden des TM sind praxisnah und werden in realen Anwendungsfällen getestet, um ihre Anwendbarkeit zu gewährleisten. Zudem wird TM mit dem Qualitätsmanagement (QM) verknüpft, um theoretische Ansätze und praktische Methoden zu kombinieren. Diese Ansätze können auch als Grundlage für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz genutzt werden, was eine umfassende Optimierung der Montagesysteme ermöglicht.



Sensitive Robotik

Industrieroboter übernehmen traditionell grobe und repetitive Aufgaben, wie das Aufnehmen und Absetzen robuster Bauteile. Heute sind jedoch Roboter auf dem Markt erhältlich, die bereits mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet sind. Insbesondere integrierte Kraft-Momenten-Sensoren (F-T-Sensoren) ermöglichen es, aufgebrachte Kräfte und Momente im Prozess zu berücksichtigen und sensitive Aufgaben wie die Handhabung zerbrechlicher Bauteile zu bewältigen. Die Robotik-Gruppe befasst sich daher mit der Entwicklung und Erforschung sensibler Applikationen für das industrielle Umfeld. Beispielsweise können Roboter Bahnen auf Freiformoberflächen abfahren, ohne einen Crash zu verursachen oder das Bauteil zu beschädigen. Solche Applikationen eignen sich beispielsweise für Schleifaufgaben auf keramischen Bauteilen. Eine weitere Aufgabe sind Fügeprozesse mit sehr geringen Toleranzen, bei denen bspw. Zylinder in dafür vorgesehene Bohrungen eingeführt werden. Dabei wird der Widerstand bei Verkantung sensitiv erfasst und der Roboter regelt F-T-sensitiv gegen. Durch diese Forschungsarbeit wird der Einsatzbereich industrieller Roboter weiter erweitert.



Kognitive Robotik

Bisher setzt die roboterbasierte Prozessautomatisierung eine detaillierte Programmierung mit präzise vordefinierten Abläufen voraus. Roboter können nur die Aufgaben ausführen, für die sie explizit programmiert wurden. Fortschrittliche KI-Systeme versetzen Roboter zunehmend in die Lage, Entscheidungen situativ zu treffen, ohne dass ein menschliches Eingreifen erforderlich ist. Die Forschungsgruppe Industrierobotik und Mensch-Roboter-Kooperation untersucht die kognitiven Fähigkeiten von Robotern, um ihren Handlungsspielraum zu erweitern und ihre Flexibilität zu erhöhen. Ein zentraler Ansatz dabei ist der Einsatz von Foundation Models, die es Robotern ermöglichen, größere Autonomie zu erlangen und Zwischenziele selbstständig zu erreichen. Ergänzend dazu können Mitarbeitende ihre Absichten in natürlicher Sprache formulieren, die in roboterlesbare Anweisungen übersetzt werden. Weitere Entwicklungen konzentrieren sich darauf, die Intentionen der Mitarbeitenden zu erfassen und Roboter entsprechend anzusteuern. Diese Fortschritte ermöglichen einen flexiblen und dynamischen Robotereinsatz in der Industrie und verbessern die Mensch-Roboter-Kooperation.



Readi – Gestärkte Resilienz in produzierenden KMU durch agile, menschenzentrierte digitale Systeme und Systemgestaltung

Problemstellung:

Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) stehen heute vor der Herausforderung, in einem zunehmend dynamischen Marktumfeld handlungsfähig zu bleiben. Krisen, volatile Lieferketten und sich schnell ändernde Kundenanforderungen erfordern eine hohe Wandlungsfähigkeit und Resilienz. Oft scheitert dies jedoch an mangelnder Transparenz in den internen Abläufen: Analoge Dokumentationsprozesse, physische Laufzettel und dezentrale Informationsinseln führen zu Zeitverlusten, Fehlern und einer erschwerten Kommunikation – sowohl intern als auch gegenüber dem Kunden. Besonders in der Einzel- und Kleinserienfertigung fehlt oft die

notwendige digitale Echtzeit-Einsicht in den Auftragsstatus, um flexibel auf Störungen reagieren zu können.

Zielsetzung:

Das Projekt Readi verfolgt das Ziel, die Resilienz und Wandlungsfähigkeit von KMU durch die Entwicklung und Einführung innovativer, soziotechnischer Systemlösungen zu steigern. Im Mittelpunkt steht ein menschenzentrierter Ansatz: Digitale Werkzeuge sollen so gestaltet werden, dass sie die Mitarbeitenden entlasten, die Transparenz erhöhen und gleichzeitig einen direkten wirtschaftlichen Mehrwert schaffen. Durch die intelligente Verknüpfung von Mensch, Organisation und Technik sollen

Unternehmen befähigt werden, auf einer qualitativ höheren Stufe agil zu agieren und ihre Kundenbindung durch verlässliche Daten zu stärken.

Vorgehen:

Der methodische Kern des Projekts liegt in der engen Einbindung der Stakeholder über den gesamten Entwicklungsprozess. Von der Anforderungsdefinition über die Grobkonzeption bis hin zum iterativen Testing und Schulungsmaßnahmen wurden die Mitarbeitenden der Partnerunternehmen aktiv beteiligt. Das ZeMA begleitete diesen Prozess wissenschaftlich und technisch, wobei der Fokus auf der Übertragbarkeit der Lösungen lag. So wurde beispielsweise ein für ein Unternehmen entwickeltes Grundgerüst einer Software erfolgreich für die spezifischen Anforderungen eines weiteren Partners adaptiert, um Entwicklungszeiten zu minimieren und Standardisierungspotenziale aufzuzeigen.

Ergebnis/Projektstand:

Zum Projektabschluss im Dezember 2025 konnten wegweisende Anwendungsfälle erfolgreich validiert werden, die zeigen, wie digitale Transparenz die Resilienz stärkt:

- Stahl- und Apparatebau (Anwendungsfall Leffer): Hier wurde die Rückmeldung des Produktionsfortschritts von physischen Dokumenten

auf ein softwarebasiertes System umgestellt. Durch die zentralisierte Informationsverfügbarkeit wurden Laufwege der Mitarbeitenden drastisch reduziert und zeitliche Aufwände minimiert. Die digitale Dokumentation erlaubt es nun, den Auftragszustand (z. B. bei komplexen Druckbehältern in Losgröße 1) jederzeit für Kunden und Prüfungsgesellschaften transparent zu visualisieren, was die Prozesssicherheit und Kundenbindung erheblich steigert.

- Produktion von Wiederholteilen (Anwendungsfall Ellenberger): Basierend auf den Erkenntnissen aus dem ersten Use Case wurde eine Lösung zur Visualisierung des Auftragsfortschritts bei Kundenaufträgen mit variierenden Stückzahlen implementiert. Damit kann der aktuelle Fertigstellungsgrad nun in Echtzeit abgerufen werden. Dies entlastet die interne Kommunikation und erhöht die Auslastungstransparenz. Die hohe Akzeptanz bei den Mitarbeitenden bestätigt den gewählten partizipativen Gestaltungsansatz.

Laufzeit:

01.01.2023 – 31.12.2025



Kontakt:

Max Eichenwald
+49 681 85787 – 555
max.eichenwald@zema.de

- Adler, Fabian; Flierl, Sebastian; Müller, Rainer (2025): Development of a methodology for the semi-automated determination of optimized workplace design in manual assembly. In: Universität Siegen (Hg.): 10th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV).
- Eichenwald, Max; Müller, Rainer (2025): Optimizing Offer Management: Reuse Strategies for Efficient Production System Planning. In: Universität Siegen (Hg.): 10th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV).
- Haas, Paul Hubert; Kelm, Benedikt; Margies, Lennard; Müller, Rainer (2025a): Development of a Software Framework for the Recommender System-based Human-centered Adaptation of Manual Work Stat. In: 19th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 19th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). Ischia, 16.07.2025-18.07.2025.
- Haas, Paul Hubert; Kelm, Benedikt; Margies, Lennard; Müller, Rainer (2025b): Entwicklung eines nutzendenspezifisch kompetenzbasierten Recommender-Systems zur menschenzentrierten Adaption von Montagesystemparametern. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaften e.V. (Hg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit. 71. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. Aachen, 25.03.2025-27.03.2025, S. 54-59.
- Kelm, Benedikt; Haas, Paul Hubert; Jochum, Simon; Margies, Lennard; Müller, Rainer (2025a): Enhancing Assembly Instruction Generation for Cognitive Assistance Systems with Large Language Models. In: Procedia CIRP (134), S. 7-12. DOI: 10.1016/j.procir.2025.03.010.
- Kelm, Benedikt; Haas, Paul Hubert; Margies, Lennard; Müller, Rainer (2025b): Evaluierung eines Kompetenzstufenmodells zur Nutzeradaptivität Kognitiver Assistenzsysteme in der manuellen Montage. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaften e.V. (Hg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit. 71. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. Aachen, 25.03.2025-27.03.2025, S. 87-92.
- Kuhn, Dominik; Pfister, Jannis; Jenner, Matthias; Eichenwald, Max; Müller, Rainer (2025): KI in der Kommissionierung. Optimierte Auftragszuweisung mittels Reinforcement Learning. In: Martin Eigner und Jan Aurich (Hg.): KI in Engineering und Produktion. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2025 (120): De Gruyter, 274-179.
- Marx, Stefan; Bashir, Attique; Müller, Rainer (2025): Towards Universal Detection and Localization of Mating Parts in Robotics. In: Proceedings of the 22nd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 22nd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Marbella, Spain, 20.10.2025 - 22.10.2025: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 235-242.

- Molter, Jan; Ibrahim, Abbass; Eichenwald, Max; Muller, Rainer (2025): Implementing Digital Twins in SMEs: A Step-by-Step Methodology for Digital Production Twins. In: Procedia CIRP Volume 136, S. 79–84. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.016>.
- Pfister, Jannis; Jenner, Matthias; Adler, Fabian; Müller, Rainer (2025): Wissensmanagement – Überblick und Einordnung im Kontext der Produktion. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaften e.V. (Hg.): Arbeit 5.0: Menschzentrierte Innovationen für die Zukunft der Arbeit, Bd. 71. 71. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. Aachen, 25.03.2025–27.03.2025, S. 726–732.
- Rekik, Khansa; Silva, Grimaldo; Bashir, Attique; Müller, Rainer (2025): Multimodal Interaction for Human-Robot Collaboration in Assembly: An LLM-Enhanced Approach. In: 2025 IEEE 21st International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Los Angeles, CA, USA, 17.08.2025 - 21.08.2025: IEEE, S. 1207–1212.
- Schneider, Marco; Künstler, Maximilian; Bashir, Attique; Müller, Rainer (2025): Inertia Parameters of a Robot End Effector - Determination and Influence Analysis. In: Procedia CIRP 134, S. 957–962. DOI: 10.1016/j.procir.2025.02.257.
- Zimmer, Sarah; Haas, Paul Hubert; Margies, Lennard; Müller, Rainer (2025a): An Approach for the Development of an Adaptable and Human-Centered Rework System. In: Procedia CIRP 136, S. 177–182. DOI: 10.1016/j.procir.2025.08.032.
- Zimmer, Sarah; Margies, Lennard; Müller, Rainer (2025b): A Systematic Approach to Efficient Rework Management in Industrial Assembly. In: 19th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 19th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). Ischia, 16.07.2025–18.07.2025.

Multimodal Smart Sensing

Forschungsbereich Multimodal Smart Sensing



Wir beschäftigen uns mit der Analyse von Sensor- und Maschinensignalen mittels maschinellem Lernen, dabei decken wir von Daten Planung über Training, - bis hin zur Integration alles ab und sind für sie idealer Partner für industrielles ML.



Robustes und interpretierbares ML im industriellen Umfeld

Das Multimodal Smart Sensing beschäftigt sich mit dem Einsatz maschineller Lernmethoden (ML) zur vorausschauenden Wartung von Anlagen und Maschinen. In realen Anwendungen lernen die ML Methoden allerdings nicht nur die zu erkennenden Verschleißsymptome, sondern auch den typischen Betriebsmodus der jeweiligen Maschine. Wird der Betriebsmodus aber verändert, führt das zur Unzuverlässigkeit der Verschleißerkennung. Genau hier setzen wir an und forschen an Robustheit und Übertragbarkeit von ML. Ein weiterer Nachteil von ML ist die fehlende Interpretierbarkeit von Vorhersagen. Das Problem besteht darin, dass die meisten ML Algorithmen Dinge wie verbliebene Lebensdauer einer Maschine zwar sehr genau erkennen können, für Menschen aber nicht erkennbar ist, woran das diese den Verschleiß erkennt. Um dieses Problem zu lösen, nutzen wir eine Kombination aus klassischem ML ohne neuronale Netze. Dieser Ansatz ermöglicht es uns sowohl die wichtigsten Verschleißsymptome einer Maschine aufzuzeigen, als auch jede individuelle Vorhersage der verbliebenen Lebensdauer auf verständliche Effekte in der Maschine zurückzuführen.



Datenplanung und Sensornähe Integration von ML Methoden

Insgesamt bietet die Gruppe eine Vollumfängliche Beratung zum Einsatz von maschinellem Lernen im industriellen Umfeld. Wir können bei einer Beratung zur richtigen Sensorik mit Möglichkeiten einfach Testdaten aufzuzeichnen anfangen, und bei der Versuchsplanung zur Aufzeichnung von Trainingsdaten beraten. Wir können automatisiert eine ganze Reihe von Algorithmen auf den aufgezeichneten Daten Testen. Diese Algorithmen beinhalten sowohl Klassifikation und Regression als auch Anomalie-Detektion. Die dabei entstehenden Lernmodelle lassen sich physikalisch interpretieren und auf die gelernten Verschleißsymptome zurückführen. Des Weiteren wird an Methoden gearbeitet, um die entwickelten ML Algorithmen auf Ressourcen limitierter Hardware/ Smarten Sensoren effizient zu implementieren. Dies erfordert eine effiziente und ressourcenschonende Implementierung der Algorithmen bezüglich Energie, Laufzeit und Speicherbedarf, was den Kreis von Data Engineering hin zur Smarten Sensorik schließt.



Kontakt:

Prof. Andreas Schütze
+49 681 302 – 4663
andreas.schuetze@zema.de

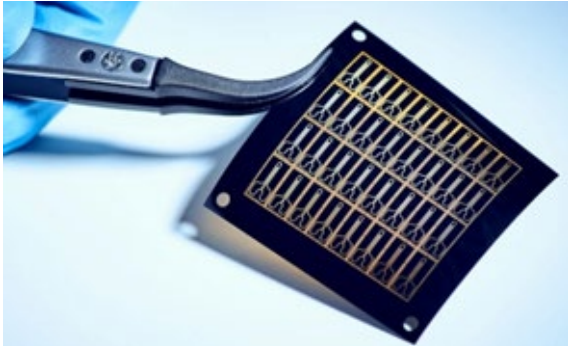
- P. Goodarzi, A. Schütze, Practical Test-Time Domain Adaptation for Industrial Condition Monitoring by Leveraging Normal-Class Data, MDPI Sensors, special issue „Condition Monitoring in Manufacturing with Advanced Sensors“ 25(24), 7614.
- J. Schauer, P. Goodarzi, J. Morsch, A. Schütze, A Performance Study of Deep Neural Network Representations of Interpretable ML on Edge Devices with AI Accelerators, Sensors 2025, 25(18), 5681.
- J. Schauer, P. Goodarzi, A. Schütze, T. Schneider, Efficient hardware implementation of interpretable machine learning based on deep neural network representations for sensor data processing, J. Sens. Syst., 14, 169–185.
- P. Goodarzi, A. Schütze, T. Schneider, Domain shifts in industrial condition monitoring: a comparative analysis of automated machine learning models, JSSS, 14, 119–132, 2025.
- P. Goodarzi, J. Schauer, A. Schütze Efficient Distribution-Aware Ensemble Learning for Multi-Sensor Systems, I2MTC 2025 - IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Chemnitz, Germany, May 19-22, 2025.
- C. Schnur, P. Goodarzi, Y. Robin, J. Schauer, A. Schütz, A Machine Learning Dataset of Artificial Inner Ring Damage on Cylindrical Roller Bearings Measured Under Varying Cross-Influences - data descriptor, Data 2025, 10(5), 77.
- C. Schnur, P. Goodarzi, Y. Robin, T. Schneider, J. Schauer, H. El Moutaouakil, J. Morsch, A.A. Ahmad, Y. Zhang, A. Schütze, A Machine Learning Dataset of Artificial Inner Ring Damages on Cylindrical Roller Bearings Measured Under Varying Cross-Influences, dataset published on Zenodo, April 15, 2025.
- P. Goodarzi, J. Schauer, A. Schütze Robust, Distribution-Aware Ensemble Learning for Multi-Sensor Systems, Sensors 2025, 25(3), 831.
- A. Schütze, P. Goodarzi, Tutorial: Machine Learning for Industrial Measurement - how to?, SMSI2025, Sensor and Measurement Science International, Tutorial T4, 6 - 8 May 2025, Nuremberg, Germany, 2025.
- C. Schnur, Methodisches Vorgehen zur Realisierung von maschinellen Lernprojekten im Mittelstand, Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, 2025, DOI: 10.22028/D291-45080, 2025, auch Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8440-9996-6 (print), 978-3-8191-0071-0 (eBook), 2025.
- S. Klein, Kombination von überwachten und teilüberwachten Methoden des maschinellen Lernens für eine adaptive und robuste Zustandsüberwachung industrieller Applikationen, Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, 2025.

Physikalische Sensorik und Mechatronik

Forschungsbereich Physikalische Sensorik und Mechatronik



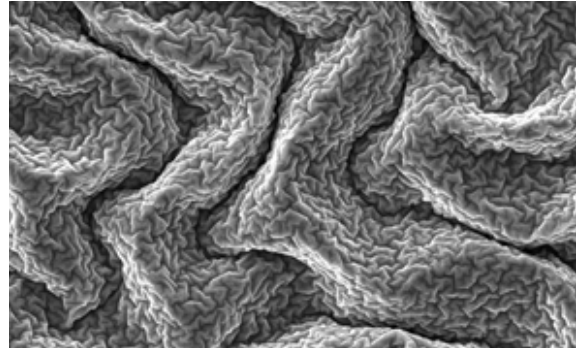
Die Gruppe erforscht neuartige nanoskalige Funktionsdünnschichten. Sie untersucht die physikalischen Eigenschaften der Dünnschichten sowie deren Anwendbarkeit im Bereich der Sensorik, der dielektrischen Elastomere und in der Medizintechnik. Die Expertise teilt sich dabei auf 4 Schwerpunkte auf: (1) Dünnschichterzeugung mittels Sputtertechnik, (2) deren Strukturierung mittels Ultra-Kurz-Puls-Laser sowie (3) deren Kontaktierung und (4) die Analytik, u.a. mittels Rasterelektronenmikroskop.



Dünnschichtentwicklung für zukünftige Sensorgenerationen

Lassen sich bewährte Technologien für Druck- und Kraftsensoren und deren Funktionsschichten noch verbessern oder lässt sich der Aufbau solcher Sensoren vereinfachen? Sind solche Systeme wasserstoffresistent? Können völlig neue Anwendungen ermöglicht werden? Wir arbeiten stetig daran!

Hochempfindliche Funktionsschichten für Sensoren, höhere Anwendungstemperaturen oder neue Fertigungsverfahren werden erforscht und entwickelt. Im Fokus steht die anwendungsorientierte Sensorik für verschiedene physikalischen Größen wie Druck, Kraft, oder Temperatur. Originäre Ideen, eigenständige und praxisnahe Forschung und Technologietransfer für Produkt- und Systeminnovationen bilden unsere Motivation. Als Forschungsgruppe arbeiten wir sowohl an grundlegenden Fragestellungen als auch in Projekten mit regionalen und internationalen Unternehmen.



Dünnschichtelektroden für dehnbare und flexible Elektronik

In diversen Anwendungen werden Elektroden mit einer hohen mechanischen Flexibilität und Dehnbarkeit benötigt. Zu diesem Zweck entwickeln wir metallische hochdehnbare Dünnschichtelektroden. Auf ein vorgespanntes elastisches Grundmaterial (Substrat) wird mittels Sputtern eine im Nanometerbereich dünne Metallschicht aufgebracht. Nach der Beschichtung wird das Substrat wieder entspannt. Es zieht sich auf seine ursprünglichen Maße zurück. Dadurch wird die Metallelektrode gestaucht und folglich aufgefaltet. Es entsteht eine gewellte Oberfläche (engl. Wrinkles). Treten später in der Anwendung mechanische Dehnungen auf, dienen diese Wrinkles als mechanischer Puffer und sie werden lediglich entfaltet. Die Funktionalität der dünnen Elektrode bleibt dabei erhalten. Als Elektrodenmaterial kommen verschiedene Metalle, wie z.B. Gold, Nickel, Nickel-Chrom oder auch Kohlenstoff zum Einsatz.

Diese dehnbaren leitfähigen Schichten finden ihren Einsatz z. B. als Elektrode für dielektrische Elastomere, eine relative neue Klasse von Sensoren und Aktoren. Weiterhin erforschen wir die Anwendung der dehnbareren Elektroden im Kontext der Medizin- und Biotechnologie sowie im Bereich der faserförmigen Sensorik und Aktorik.



Erforschung von faserförmigen Sensor- und Aktorelementen

Miniaturisierte Sensoren und Aktoren für smarte Textilien, für den Automobilsektor oder für die Medizintechnik gewinnen zunehmend an Bedeutung. In Anlehnung an diesen Trend, treiben wir zusammen mit externen Partnern die Entwicklung einer Technologieplattform zur Erzeugung von funktionalisierten Monofilamenten voran. Ein Monofilament beschreibt dabei lange Einzelfasern wie bspw. Kunststofffasern, Glasfasern oder Ähnliches. Diese Einzelfasern, mit einem Durchmesser von 0,2 – 0,5 mm, werden auf ihrer Länge vollumfänglich mit einer sehr dünnen elektrisch leitfähigen Funktionsschicht beschichtet. Anschließend wird mit einem Laser die zusammenhängende Funktionsschicht so bearbeitet, dass auf dem Monofilament helixförmige, voneinander getrennte Leiterbahnen und sich daran anschließende Funktionselemente entstehen. Nach diesem Prinzip hergestellte Sensoren oder Aktoren können abschließend in textile Gewebe eingearbeitet werden oder kommen überall dort zur Anwendung, wo bisherige Konzepte aufgrund ihrer Größe oder ihres Formfaktors an ihre Grenzen gestoßen sind.



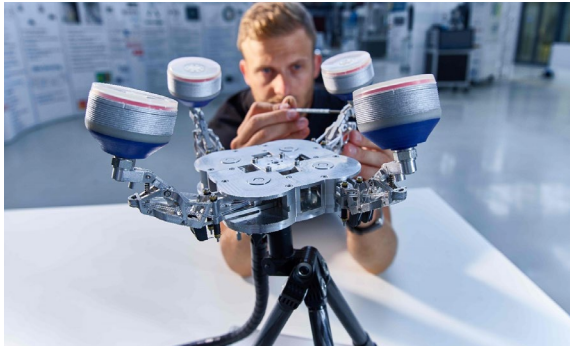
Kontakt:

Prof Dr.-Ing. John Heppe
+49 681 85787 – 62
john.heppe@zema.de

- Gratz-Kelly, Sebastian; Cerino, Mario; Philippi, Daniel; Perri, Carmen; Heppe, John; Motzki, Paul (2025): Textile Integrated Dielectric Elastomer Based Sensor-Array Combined with a Tactile Feedback Element. In: ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. St. Louis, Missouri, USA, 08.09.2025 - 10.09.2025.
- Perri, Carmen; Cerino, Mario; Weber, Tobias; Heppe, John; Motzki, Paul (2025): High-voltage switches based on flexible dielectric elastomers. In: John D. Madden, Anne L. Skov, Stefan S. Seelecke und Kentaro Takagi (Hg.): Electroactive Polymer Actuators, Sensors, and Devices (EAPAD) 2025. Vancouver, Canada, 17.03.2025 - 20.03.2025: SPIE, S. 63.
- Perri, Carmen; Cerino, Mario; Willian, Tobias Pascal; Zemlin, Benjamin; Heppe, John; Motzki, Paul (2025): Design of Flexible High Voltage Transistors Incorporating Silicone-Based Dielectric Materials for Advanced Power Electronics. In: ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. St. Louis, Missouri, USA, 08.09.2025 - 10.09.2025.

Smarte Materialsysteme

Forschungsbereich Smarte Materialsysteme



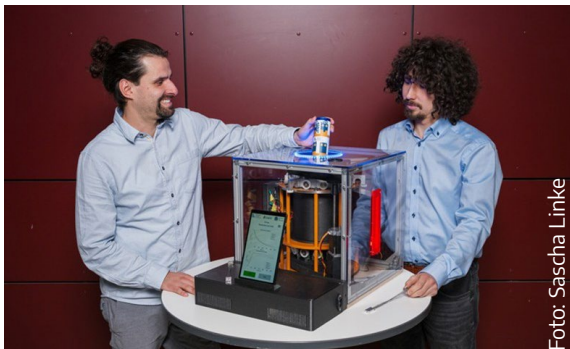
Shape Memory Alloys

Im Bereich der Formgedächtnislegierungen (engl. shape memory alloys) spezialisiert sich die Arbeitsgruppe auf Forschungsaktivitäten ausgehend von Grundlagenuntersuchungen zur Materialcharakterisierung von Formgedächtnislegierungen bis hin zur Entwicklung von innovativen und effizienten Aktor-Sensor-Systemen.



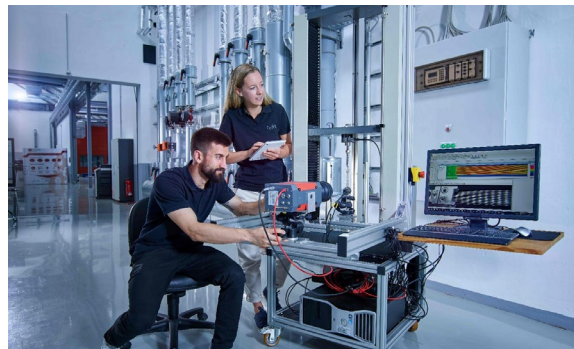
Elektroaktive Polymere

Die Arbeitsgruppe Electroactive Polymers (EAP) beschäftigt sich mit der Entwicklung von Aktor- und Sensorsystemen auf Basis dielektrischer Elastomere sowie ionischer Polymere in den Bereichen Grundlagenforschung sowie anwendungsnahe Forschung und Entwicklung industrieller Systeme.



Elastocalorics

Elastokalorisches Kühlen und Heizen ist eine disruptive Technologie, die auf dem mechanischen Be- und Entlasten von superelastischen Nickel-Titan-Legierungen (NiTi) beruht, welche dabei große Wärmemengen freisetzen können. Dieses tun sie um ein Vielfaches effizienter als gegenwärtig übliche Kältekompressionsverfahren.



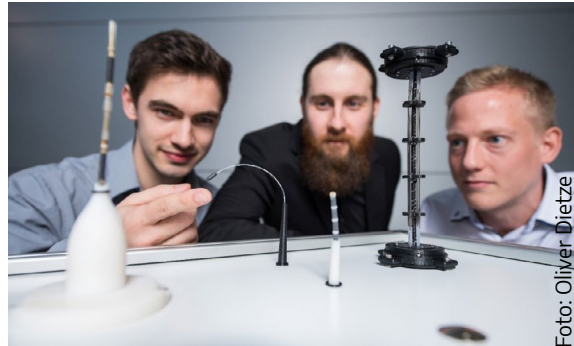
Smart Materials Modeling & Control

Intelligente Materialien wie beispielsweise Formgedächtnislegierungen oder dielektrische Elastomere weisen typischerweise ein stark nicht-lineares Materialverhalten auf. Die Arbeitsgruppe entwickelt analytische und numerische Modelle, welche bei der Auslegung von Prototypen unterstützen.



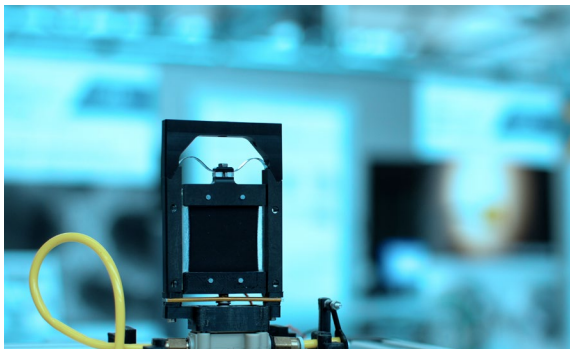
Smart Material Electronics

Ziel dieser Arbeitsgruppe ist die integrierte Ansteuerung von Systemen auf Basis smarter Materialien. Die Schaltungsentwicklung spielt besonders bei der zur Verfügungstellung der für die Materialien benötigten (Hoch-) Spannungen und Ströme eine zentrale Rolle.



Biomedical Systems

In der Biomedizin wird an smarten minimalinvasiven Chirurgiewerkzeugen und neuartigen Implantatlösungen geforscht. So werden beispielsweise Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen (FGL) für eine optimierte und patientenfreundliche Katheterverlegung untersucht.



Smart Fluidics

Aufgrund ihrer für das Anwendungsfeld der Fluidik attraktiven Eigenschaften wie Energieeffizienz, kompakte und leichtgewichtige Bauformen sowie hochfrequenter und geräuschfreier Betrieb werden smarte Materialien häufig in Ventil-, Pumpen- und Fluidsensorik-Systemen (Druck, Volumenstrom) eingesetzt.



Smart Textiles

Die Integration von Aktoren und Sensoren auf Basis dünner Nickel-Titan Drähte oder silikonbasierter Polymerfolien in Textilien ermöglicht die Funktionalisierung von Kleidung und Ausrüstung. Die integrierte Sensorik ermöglicht die präzise Erfassung von Bewegung und Vitalparametern.



Intelligente Aktor-Sensor-Systeme auf Basis elektroaktiver Polymere

Der Bereich Smarte Materialsysteme am ZeMA bearbeitet vorrangig industrie- und anwendungsrelevante Forschungsthemen, bei denen die Entwicklung mechatronischer Aktor-Sensor-Systeme im Vordergrund steht. Eine Materialkategorie zur Umsetzung dieser Forschungsthemen sind elektroaktive Polymere (EAP). Diese schließen beispielsweise dielektrische Elastomere (DE), ionische Polymere und dielektrische Fluide ein. Die Werkstoffe besitzen neben aktorischen auch gleichzeitig sensorische Eigenschaften und ermöglichen den Aufbau kompakter, leichter und energieeffizienter Lösungen für Antriebssysteme, die konventionell oft auf pneumatischen, hydraulischen oder elektromagnetischen Elementen beruhen.

Forschungsthemen beinhalten die experimentelle Charakterisierung des Materialverhaltens, die Entwicklung von Technologiedemonstratoren, miniaturisier- und integrierbare Hochspannungselektronikkonzepte, die Herstellung von dielektrischen Elastomeren mit industrietauglichen, skalierbaren Prozessen, sowie die Positionsbestimmung von EAP-Aktoren durch „Self-Sensing“ zum Aufbau kompakter, sensorloser Aktor-systeme.

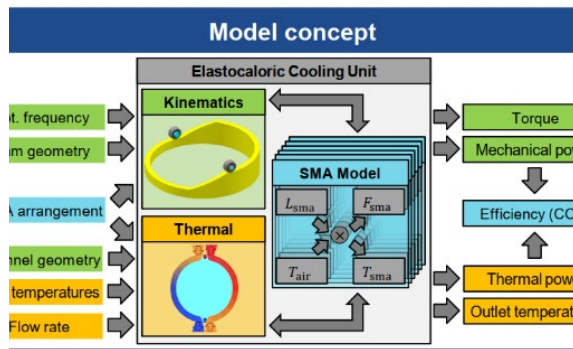


Foto: Oliver Dietze

Intelligente Aktor-Sensor-Systeme auf Basis von Formgedächtnislegierungen

Der Bereich Smarte Materialsysteme am ZeMA beschäftigt sich vorrangig mit industrie- und anwendungsnahen Forschungsthemen, bei denen die Entwicklung mechatronischer Aktor-Sensor-Systeme mit sogenannten intelligenten Materialien im Vordergrund steht. Eine Materialkategorie für diese Forschungsthemen sind Formgedächtnislegierungen (FGL), von denen hauptsächlich thermische Formgedächtnislegierungen im Fokus der Forschung stehen.

Forschungsthemen umfassen die experimentelle Charakterisierung des thermo-elektro-mechanischen Materialverhaltens, die Entwicklung von Technologiedemonstratoren und funktionalen Prototypen, die Optimierung von FGL-Aktorsystemen sowie die Entwicklung fortgeschrittener Ansteuerkonzepte für FGL-Aktoren. Anwendungsfelder in Industrie und Medizintechnik sind beispielsweise die Kontinuumsrobotik, energieeffiziente Greiftechnologien, die Ventiltechnik, Mikro-Kamerasysteme, die Endoskopie oder medizinische Implantate.



Modellierung und Regelung von smarten Materialsystemen

Intelligente Materialien wie beispielsweise Formgedächtnislegierungen oder dielektrische Elastomere weisen typischerweise ein stark nicht-lineares Materialverhalten auf, oftmals mit großer Hysterese verbunden. Das Verständnis dieses Materialverhaltens und seine mathematische und physikalische Beschreibung bildet die Grundlage für effizientes Aktor- und Sensordesign. Der Forschungsbereich entwickelt analytische und FE-basierte Modelle, welche bei der Auslegung von Prototypen unterstützen.

Aufgrund der Nichtlinearität stellt auch die Ansteuerung und eventuelle Regelung der Materialien eine weitere Herausforderung dar. Neue Regelstrategien und -konzepte erlauben den optimierten Betrieb der intelligenten Aktoren in der Anwendung.

Forschungsschwerpunkte sind die konzentrierte- und Finite-Elemente-Modellierung, multiphysikalisch gekoppelte Simulationen sowie die experimentelle Charakterisierung, die Entwicklung von KI-Methoden zur Optimierung des Systementwurfs und GUI-Design-Schnittstellen auf Anwenderebene, die Entwicklung von Algorithmen zur Bewegungs-/Kraftregelung und Hysterese-Kompensationsmethoden, sowie die Entwicklung von Regelstrategien für smarte Aktoren in Anwendungen.

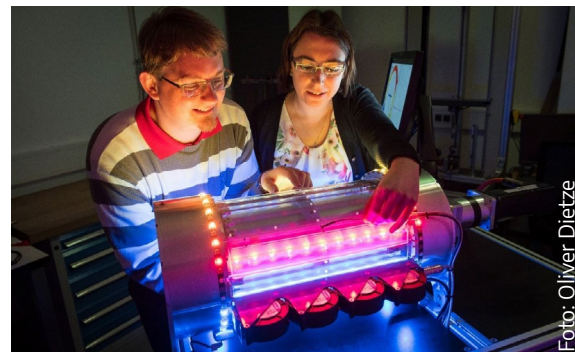


Foto: Oliver Dietze

Elastokalorik

Elastokalorisches Kühlen und Heizen ist eine disruptive neue Technologie, die auf dem mechanischen Be- und Entlasten von superelastischen Nickel-Titan-Legierungen (NiTi) beruht, welche dabei extrem große Wärmemengen freisetzen und absorbieren können. Dies tun sie um ein Vielfaches effizienter als gegenwärtig übliche Kältekompressionsverfahren, und darüber hinaus wird durch die Verwendung von Metallen die Freisetzung schädlicher Klimagase in die Atmosphäre vollständig vermieden. Das US-Energieministerium und die EU-Kommission deklarierten die Elastokalorik bereits als zukunftsreichste Alternative zu herkömmlichen Verfahren. Im Mai 2025 fand die zweite Elastokalorik Konferenz – die Elastocalorics2025 – initiiert von Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke und Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki am ZeMA statt, an der international führende Expertinnen und Experten aus der Forschung und der Industrie teilnahmen. Im Rahmen der Konferenz konnten die 2023 begonnen Arbeiten zur Gründung der „International Elastocalorics Society“ fortgeführt werden, die Elastokalorik-Community weiter vernetzt werden und bereits der nächste Austragungsort der Elastocalorics2027 in HongKong festgelegt werden.



Smart Implants for Life Enrichment – SmILE

Hintergrund:

Durch den aktuellen demografischen Wandel – der zunehmenden Alterung der Gesellschaft – gibt es einen wachsenden Fokus auf Krankheitsbilder, die zunehmend im Alter auftreten. Eine der Krankheitsgruppen sind die muskuloskelettalen nichtübertragbaren Erkrankungen (MSK-NCDs). Zu den bekanntesten Krankheitsbildern gehören Arthrose, rheumatoide Arthritis, Osteoporose sowie Fragilitätsfrakturen. Diese Erkrankungen haben häufig chronische Schmerzen oder eingeschränkte Mobilität zur Folge, was einen direkten Einfluss auf die Lebensqualität hat. MSK-Erkrankungen gelten als Treiber von Pflegebedürftigkeit und langfristigem Funktionsverlust im Alter. Außerdem stehen sie im Zusammenhang mit sozialer Isolation sowie psychischen Belastungen, gerade im höheren Alter. Mit der steigenden Lebenserwartung nimmt sowohl die Häufigkeit als auch die Dauer dieser Erkrankungen weiter zu. Dadurch entstehen nicht nur individuelle Belastungen für die Betroffenen, sondern auch zunehmende Herausforderungen

für das Gesundheits- und Pflegesystem. Erkrankungen des Bewegungsapparates führen häufig zu einer schrittweisen Einschränkung der Selbstständigkeit und erhöhen das Risiko für Stürze und weitere Folgeerkrankungen. Insbesondere nach Knochenbrüchen kann es zu verzögerten Heilungsverläufen kommen, die den funktionellen Abbau weiter verstärken. Die medizinische Versorgung ist dabei bislang häufig auf punktuelle Untersuchungen und die Behandlung akuter Ereignisse ausgerichtet. Eine kontinuierliche Begleitung des Heilungsverlaufs oder eine frühzeitige Erkennung von Risiken ist oft nur eingeschränkt möglich. Daraus ergibt sich ein wachsender Bedarf an neuen Ansätzen, die Prävention, frühe Intervention und eine gezielte Unterstützung der Heilungsprozesse besser miteinander verbinden.

Zielsetzung:

Vor diesem Hintergrund besteht ein zunehmender Bedarf an neuen Ansätzen und Lösungen, um die Erkrankungen des Bewegungsapparates im frühen Stadium

zu erkennen sowie zu begleiten. Ziel des Projekts ist es daher, die Gesundheit und Selbstständigkeit von Menschen mit muskuloskelettalen Erkrankungen langfristig zu erhalten sowie den altersbedingten Funktionsverlust zu verlangsamen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Vorbeugung sowie einer frühzeitigen Unterstützung von Heilungsprozessen. Durch geeignete technische Lösungen sollen Veränderungen im Gesundheitszustand früher erkannt und gezielt adressiert werden. Gleichzeitig sollen Patienten stärker in die Beobachtung ihres eigenen Gesundheitszustands eingebunden werden.

Hierfür sollen insbesondere sonst passive Implantate funktional erweitert werden. Durch die Anbindung von Sensoren und Aktoren sollen Implantate künftig in der Lage sein, Heilungsprozesse gezielt zu überwachen und aktiv die Heilung zu unterstützen, wie beispielsweise durch gezielte Medikamentenabgabe oder aktive Stimulation zur Beschleunigung der Knochenheilung. Alles soll auf einer modularen Gesundheitsplattform zusammengeführt werden. Ein weiteres Ziel ist der Aufbau einer digitalen Gesundheitsplattform, auf der die erfassten Daten zusammengeführt und verständlich aufbereitet werden. Die Plattform soll sowohl für Patienten als auch medizinischem Fachpersonal einen besseren Überblick über den Krankheits- und Heilungsverlauf ermöglichen und damit Behandlungsentscheidungen unterstützen.

Vorgehen:

Bei SmILE kommen interdisziplinäre Partner aus Forschung, Industrie und klinischer Anwendung eng zusammen. Insgesamt sind 25 europäische Projektpartner beteiligt, die unterschiedliche

fachliche Schwerpunkte, wie Medizintechnik, klinische Forschung, Aktorik, Sensorik und Datenverarbeitung, abdecken. Durch diese breite Aufstellung soll sichergestellt werden, dass technische Entwicklungen von Beginn an mit medizinischen Anforderungen und praktischen Einsatzbedingungen abgestimmt werden. Ein regelmäßiger Austausch zwischen den Projektpartnern dient dazu, Schnittstellen frühzeitig abzustimmen und die einzelnen Beiträge sinnvoll zusammenzuführen. Auf diese Weise entsteht schrittweise ein Gesamtsystem, das aus verschiedenen aufeinander abgestimmten Bausteinen besteht.

Das ZeMA behandelt innerhalb dieses Konsortiums die Entwicklung eines aktiven Implantat-Moduls auf Basis von Formgedächtnislegierung (FGL), welches die Heilung von Knochenbrücken beschleunigen soll. Die Arbeiten bauen auf Forschungsarbeiten auf, welche im Rahmen eines durch die Werner-Siemens-Stiftung geförderten Projekts zu smarten Implantaten durchgeführt wurden. In diesem wurden grundlegende Konzepte für aktive Implantatfunktionen entwickelt, erste technische Machbarkeiten nachgewiesen und Prototypen inklusive Elektronik aufgebaut. Diese Vorarbeiten bilden die Basis für die Entwicklung des aktiven FGL Implantats im SmILE-Projekt. Ziel ist es, die bestehenden Konzepte weiterzuentwickeln sowie zu optimieren und in den modularen Systemansatz zu überführen. Die entwickelten Lösungen sollen dabei kompatibel mit der übergeordneten Plattform sein und sich in das Zusammenspiel von Aktorik, Sensorik und digitaler Gesundheitsplattform einfügen.

Projektstand:

Im Projekt wurden die technischen Anforderungen und Spezifikationen der Aktorik gemeinsam mit den beteiligten Projektpartnern abgestimmt. Dabei erfolgte ein enger Austausch zu relevanten elektrischen Parametern sowie Schnittstellen zur späteren gemeinsamen Integration auf der modularen Implantat Plattform. Darüber hinaus wurde zur Qualitätssicherung ein Design-Eingabe-, Ausgabe-, Verifizierungs- und Validierungsbericht (DIOVV-Report) für den Anwendungsfall erstellt.

Weiter wurde ein Prüfstand zur elektromechanischen Charakterisierung des Implantats aufgebaut, welcher für die

Untersuchung mechanischer und elektrischer Eigenschaften genutzt wird. Außerdem wurde die mechanische Auslegung des Implantats, insbesondere im Hinblick auf die Kraftübertragung der FGL-Aktorik, optimiert. Eine Überarbeitung der elektrischen Kontaktierung der FGL-Aktoren stellt eine erhöhte Zuverlässigkeit auf Basis der Erkenntnisse des vorangegangenen Projektes dar. Auf dieser Basis wurde eine erste mechanische Charakterisierung des Implantats durchgeführt.

Laufzeit:

01.01.2025 – 31.12.2027

**Kontakt:**

Tom Gorges, M.Sc.
+49 681 302 71366
tom.gorges@zema.de

- Addario, Saverio; Gratz-Kelly, Sebastian; Naso, David; Rizzello, Gianluca; Moretti, Giacomo (2025): An experimental parametric analysis of the acoustic response in dielectric elastomer loudspeakers. In: JVC/Journal of Vibration and Control 31 (15-16). DOI: 10.1177/10775463241273022.
- Addario, Saverio; Priuli, Alberto; Gratz-Kelly, Sebastian; Willian, Tobias; Schultes, Günter; Seelecke, Stefan S.; Rizzello, Gianluca (Hg.) (2025): Multi-dimensional negative-stiffness thermoplastic bias mechanisms for high-stroke dielectric elastomer actuator arrays.
- Anitha Sivakumar, Shivaani; Gorges, Tom; Goergen, Yannik; Nalbach, Sophie; Motzki, Paul (Hg.) (2025): Enhanced shape memory alloy-driven Fin Ray gripper system.
- Baltes, Matthias; Holz, Benedikt; Bruch, Daniel; Motzki, Paul (2025): Electronic Control System for Optimized Resonance Operation of Dielectric Elastomer Pumps through Self-Sensing. In: Advanced Engineering Materials 27 (18). DOI: 10.1002/adem.202501204.
- Barakat, Rawan; Kirsch, Susanne Marie; Welsch, Felix; Motzki, Paul (2025): Bidirectional rotational antagonistic shape memory alloy actuators for high-frequency artificial muscles. In: Scientific Reports 15 (1). DOI: 10.1038/s41598-025-93209-9.
- Chowdhury, Tajbeed A.; Wagner, Eric; Motzki, Paul; Lehser, Martina (Hg.) (2025): Prognosis and predictive modeling of hand movements in industrial tasks using StretchSense glove and digital twin simulations.
- Chowdhury, Tajbeed Ahmed; Wagner, Eric; Motzki, Paul; Lehser, Martina (Hg.) (2025): Enhanced transfer learning algorithm with zero-shot components for dermatological diagnosis using the HAM10000 dataset.
- Fasolt, Bettina; Holz, Benedikt; Bruch, Daniel; Motzki, Paul; Seelecke, Stefan (Hg.) (2025): Influence of silicone content in the electrode matrix on the failure of DE actuators. EuroEAP 2025 international conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers.
- Fries, Michael; Motzki, Paul; Bähre, Dirk; Jung, Anne (2025): A Simulative Evaluation of Triply Periodic Minimal Surface Structures in the Context of Elastocaloric Applications. In: Advanced Engineering Materials 27 (20). DOI: 10.1002/adem.202500661.
- Göddel, Philipp; Pirritano, Carmelo; Goergen, Yannik; Gorges, Tom; Motzki, Paul (Hg.) (2025): Compact Rotary Actuator based on Shape Memory Alloy Wire Bundles and textile-based Deflection Mechanism. Proceedings of ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2025.
- Gorges, Tom; Weber, Till; Mayer, Joshua; Motzki, Paul (2025): Experimental investiga-

tion of phase-dependent resistivity and Poisson's ratio in shape memory alloy wires. In: Smart Materials and Structures 34 (6). DOI: 10.1088/1361-665X/ade580.

Gratz-Kelly, Sebastian; Cerino, Mario; Nalbach, Sophie; Heppe, John; Motzki, Paul (Hg.) (2025): Textile integrated dielectric elastomer sensor and actuator elements with sputtered metal electrodes. EuroEAP 2025 Thirteenth international Conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers. Online verfügbar unter www.iMSL.de.

Gratz-Kelly, Sebastian; Cerino, Mario; Philippi, Daniel; Perri, Carmen; Heppe, John; Motzki, Paul (Hg.) (2025): TEXTILE INTEGRATED DIELECTRIC ELASTOMER BASED SENSOR-ARRAY COMBINED WITH A TACTILE FEEDBACK ELEMENT. Proceedings of ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2025.

Gratz-Kelly, Sebastian; Rizzello, Gianluca; Motzki, Paul; Moretti, Giacomo (Hg.) (2025): Integrated textile-biased dielectric elastomer feedback actuator.

Heib, Lennart; Moretti, Giacomo; Rizzello, Gianluca (Hg.) (2025): Maximizing power generation of bi-stable electrostatic energy harvesters in river flow scenarios.

Heib, Lennart; Rizzello, Gianluca; Moretti, Giacomo (Hg.) (2025): Simulation study of bi-stable sea wave energy harvesters with electrostatic power take-off. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM.

Herrmann, David; Kunze, Julian; Kobes, Julian; Seelecke, Stefan; Motzki, Paul; Rizzello, Gianluca; Böhm, Valter (Hg.) (2025): A mobile tensegrity robot driven by rolled dielectric elastomer actuators. 2025 IEEE 8th International Conference on Soft Robotics, RoboSoft 2025.

Jalaliankhakshour, Alireza; Rizzello, Gianluca; Cherubini, Antonello; Fontana, Marco; Moretti, Giacomo (2025): Current-Limiting Control Strategies in Variable Capacitance Electrostatic Energy Harvesters. In: Advanced Intelligent Systems. DOI: 10.1002/aisy.202500985.

Kohl, Manfred; Ament, Christoph; Arivanandhan, Gowtham; Bechtold, Tamara; Conrad, Peter; Croce, Sipontina et al. (2025): Active bi- and multistability in cooperative microactuator systems (Sensors and Actuators Reports, 9).

Kunze, Julian; Herrmann, David; Kobes, Julian; Motzki, Paul; Böhm, Valter; Rizzello, Gianluca; Seelecke, Stefan (Hg.) (2025): Design and validation of a tensegrity soft robot with rolled dielectric elastomer actuators. EuroEAP 2025 International Conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers.

Naumov, Vladimir; Soleti, Giovanni; Goergen, Yannik; Mandolino, Michele A.; Wagner, Eric; Rizzello, Gianluca et al. (Hg.) (2025): Kinematic Modeling and Self-Sensing of

a Shape Memory Alloy Wire-Driven Continuum Robot. 2025 IEEE 8th International Conference on Soft Robotics, RoboSoft 2025.

Neu, Julian; Croce, Sipontina; Schagaew, Andrej; Seelecke, Stefan; Rizzello, Gianluca (2025): Cooperative Systems Based on Arrays of Dielectric Elastomer Actuators. In: Actuators 14 (11). DOI: 10.3390/act14110544.

Nicholson, Douglas E.; Benafan, Othmane; Bigelow, Glen S.; Pick, Dean; Fumagalli, Luca; Yin, Weimin et al. (2025): Do Shape Memory Alloys Have Standards? In: AM&P Technical Articles 183 (2). DOI: 10.31399/asm.amp.2025-02.p036.

Nicholson, Douglas E.; Benafan, Othmane; Bigelow, Glen S.; Pick, Dean; Fumagalli, Luca; Yin, Weimin et al. (2025): DO SHAPE MEMORY ALLOYS HAVE STANDARDS?: A growing collection of standard material specs and test methods has been established to assess and control quality in shape memory alloys for medical devices and actuator applications. In: Advanced Materials and Processes 183 (2). DOI: 10.31399/asm.amp.2025-02.p036.

Perri, Carmen; Cerino, Mario; Heppe, John; Motzki, Paul (2025): High-voltage switching using silicone-based dielectric elastomer actuators and switches: performance in actuation frequency and voltage. In: EuroEAP 2025 International Conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers (13), S. 662–672. Online verfügbar unter www.iMSL.de.

Perri, Carmen; Cerino, Mario; Weber, Tobias; Heppe, John; Motzki, Paul (Hg.) (2025): High-voltage switches based on flexible dielectric elastomers.

Perri, Carmen; Cerino, Mario; Willian, Tobias P.; Zemlin, Benjamin; Heppe, John; Motzki, Paul (Hg.) (2025): DESIGN OF FLEXIBLE HIGH VOLTAGE TRANSISTORS INCORPORATING SILICONE-BASED DIELECTRIC MATERIALS FOR ADVANCED POWER ELECTRONICS. Proceedings of ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2025.

Priuli, Alberto; Addario, Saverio; Schultes, Günter; Seelecke, Stefan; Rizzello, Gianluca (Hg.) (2025): Control-Oriented Energy-Based Modeling of Cooperative Dielectric Elastomer Actuator Arrays. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM.

Rizzello, Gianluca (Hg.) (2025): Leveraging bi-stability and model-based approaches in dielectric elastomer soft robots.

Rizzello, Gianluca; Moretti, Giacomo (Hg.) (2025): Model-based investigation of distributed sensing in dielectric elastomer membranes.

Sivakumar, Shivaani Anitha; Barakat, Rawan; Gorges, Tom; Nalbach, Sophie; Motzki,

- Paul (Hg.) (2025): BIO-INSPIRED SOFT-GRIPPING SYSTEM UTILIZING SHAPE MEMORY ALLOYS FOR PRECISE MANIPULATION OF FRAGILE OBJECTS. Proceedings of ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2025.
- Soleti, Giovanni; Heib, Lennart; Lesseur, Valeria Alejandra Santillan; Rizzello, Gianluca (2025): Bi-Modal Self-Sensing Proprioception and Contact Detection in Dielectric Elastomer Soft Robots. In: IEEE Robotics and Automation Letters 10 (11). DOI: 10.1109/LRA.2025.3619708.
- Soleti, Giovanni; Kunze, Julian; Massenio, Paolo Roberto; Rizzello, Gianluca (Hg.) (2025): Model-based design of multi-stable 3D soft manipulators: A dielectric elastomer case study. 2025 IEEE 8th International Conference on Soft Robotics, RoboSoft 2025.
- Soleti, Giovanni; Massenio, Paolo Roberto; Kunze, Julian; Rizzello, Gianluca (2025): Model-Based Robust Position Control of an Underactuated Dielectric Elastomer Soft Robot. In: IEEE Transactions on Robotics 41. DOI: 10.1109/TRO.2025.3539184.
- Triki, Nadia; Bruch, Daniel; Seelecke, Stefan; Motzki, Paul (Hg.) (2025): Design and performance optimization of tubular IPMC actuators for biomedical applications.
- Weber, Tobias; Fasolt, Bettina; Willian, Tobias; Bruch, Daniel; Nalbach, Sophie; Motzki, Paul (Hg.) (2025): ADEPT - Automated Dielectric Elastomer Actuator Performance-Tester. EuroEAP 2025 International Conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers. Online verfügbar unter www.iMSL.de.
- Weber, Tobias; Fasolt, Bettina; Willian, Tobias; Bruch, Daniel; Nalbach, Sophie; Motzki, Paul (Hg.) (2025): ADEPT: automated dielectric elastomer actuator performance-tester.
- Willian, Tobias; Bruch, Daniel; Motzki, Paul; Seelecke, Stefan S. (Hg.) (2025): Detection of inhomogeneities in dielectric elastomer transducers using thermal imaging.
- Zarth, Alexander; Göddel, Philipp; Gorges, Tom; Motzki, Paul; Griebisch, Jürgen (Hg.) (2025): SEMI-AUTOMATED SMA MICROWIRE HANDLING SYSTEM FOR PRODUCING A PRELOAD FORCE AND ITS EFFECT ON THE LASER WELDING PROCESS FOR HIGH-PERFORMANCE BUNDLE ACTUATORS. Proceedings of ASME 2025 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2025.
- Zemlin, Benjamin; Göttel, Dirk; Koch, Marcus; Cerino, Mario; Hubertus, Jonas; Schultes, Günter; Heppe, John (Hg.) (2025): RF sputtered gold thin films on silicone membranes as electrodes for dielectric elastomer transducers. EuroEAP 2025 International Conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers.
- (2025). EuroEAP 2025 International Conference on Soft Transducers and Electromechanically Active Polymers (13).

Zemlin, Benjamin; Kunze, Julian; Cozette, Bobby; Curtis, Sabrina; Seelecke, Stefan S.; Quant, Eckardt; Motzki, Paul (Hg.) (2025): Hybrid smart actuator combining electro-active polymers with superelastic TiNiCuCo.

Vorträge

Motzki, Paul, “Elastokalorik = nachhaltige Klimatechnologie für den Automotive Sektor? (Projekt SMARTCool)” – Impulse Lecture: Forschungsnetzwerke Energie, Industriewende-Dialog – Aktuelles aus der Forschung, online, Jan. 2025.

Motzki, Paul, “Smart materials research in Saarland – from innovative actuators to clean and efficient cooling systems (and their combination?)” – Invited Lecture: EPFL Microcity, Neuchatel, Switzerland, Feb. 2025.

Motzki, Paul, “Intelligente Materialien - aus der Forschung in Produkte (made in Saarland)” – Invited Lecture: LIONS Club Saarbrücken e.V., Saarbrücken, Germany, Feb. 2025.

Motzki, Paul, “Elastokalorik - Nickel-Titan für nachhaltiges und effizientes Kühlen und Heizen” – Invited Lecture: 2. Regionalkonferenz Südwest, MIT-Club of Germany e.V., Saarbrücken, Germany, Mar. 2025.

Motzki, Paul, “Ambient Temperature-Resilient Neural Network-based Self-Sensing of Shape Memory Alloy Actuators” – Invited Lecture: CASMART Technical Meeting, online, Mar. 2025.

Motzki, Paul, “Bio-inspired Soft Robots Based on Thermal Shape Memory Alloy Actuators” – Invited Talk: RoboSoft 2025 Workshop: Soft Robotic Actuation and Sensing Based on Functional Materials, Lausanne, Switzerland, Apr. 2025.

Motzki, Paul, “AM-SMART: Webinar 8: Elastocalorics,” – Invited Host: Advanced Manufacturing of Smart Materials and Structures, online, Apr. 2025.

Motzki, Paul, “Smart Materials in Haptic Perception & Tactile Stimulation” – Invited Pitch: Workshop Tactile Campus Saar, Saarland University, Saarbrücken, Germany, May 2025.

Motzki, Paul, “Smart Material Systems – Innovations for an intelligent future” – Invited Lecture: Volkswagen Group, Innovationsaustausch mit Forschungseinrichtungen, online, May 2025.

Motzki, Paul, “Actuator innovation and tomorrow’s cooling systems – Smart Material Systems made in Saarland” – Invited Lecture: CAU Kiel, Department of Materials Science, Kiel, Germany, Jul. 2025.

Motzki, Paul, “Pushing the Boundaries of Shape Memory Alloy Actuators: Record-breaking actuation frequencies and AI-based closed-loop control” – Invited Talk: BoKoMaT_9 conference, Bochum, Germany, Sep. 2025.

Motzki, Paul, “Elastokalorik – Energieeffizientes und nachhaltiges Kühlen ohne klimaschädliche Gase” – Invited Lecture: Wissenschaftsforum des MINT-Campus Alte Schmelz, St. Ingbert, Germany, Oct. 2025.

Motzki, Paul, “Elastokalorik – energieeffizientes und nachhaltiges Kühlen (und Heizen) ohne klimaschädliche Gase” – Invited Lecture: DGM-Webinar Innovative Materialansätze für effizientere Kühlung, online, Nov. 2025.

Motzki, Paul, “Elastokalorik – Nachhaltige Klimatechnik im Saarland” – Keynote: Smart Materials Summit – expert panel edition, Karlsruhe, Germany, Nov. 2025.

Motzki, Paul, “Momentum #002” – Invited Podcast: Momentum Saar Podcast, online, Nov. 2025.

Weitere Projekte aus den
Forschungsbereichen finden Sie
auf unserer Webseite

www.zema.de/projekte



Daten zum Jahr



Tag der Deutschen Einheit 2025

Wir blicken begeistert zurück auf das Bürgerfest zum Tag der Deutschen Einheit 2025 – mit unserem Stand, spannender Technik zum Ausprobieren und vielen tollen Begegnungen.

Unser Highlight: die neugierigen Besucher:innen, mit denen wir über

Technik, Innovation und Zukunftsideen gesprochen haben.

Es war toll, dass wir Teil dieses besonderen Wochenendes sein durften – es war rundum gelungen, inspirierend und einfach schön!



**Weitere News aus dem Jahr und
Events finden Sie auf unserer
Webseite**

www.zema.de/news

Kontakt

Biomechatronische Systeme

Kontakt:

Prof. Dr. Martina Lehser
+49 681 85787 – 102
martina.lehser@zema.de

Kontakt:

Thomas Hall
+49 681 302 – 4688
thomas.hall@zema.de

Fertigungstechnolo- gien

Industrial Security

Kontakt:

Christian Siegwart
+49 681 85787 – 540
christian.siegwart@zema.de

Montagesysteme

Kontakt:

Christoph Speicher
+49 681 85787 – 535
christoph.speicher@zema.de

Kontakt:

Prof. Dr. Andreas Schütze
+49 681 302 – 4663
andreas.schuetze@zema.de

Multimodal Smart Sensing

Physikalische Sensorik und Mechatronik

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. John Heppe
+49 681 85787 – 62
john.heppe@zema.de

Smarte Materialsysteme

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki
+49 681 85787 – 13
paul.motzki@zema.de



Interesse an...
praxisnaher Forschung und
Promotion?

Dann haben wir Interesse an dir!

Unsere Stellenanzeigen findest du auf
www.zema.de

Wir freuen uns auch auf
Initiativbewerbungen!

ZeMA

Herausgeber:

ZeMA – Zentrum für Mechatronik- und Automatisierungstechnik gGmbH
Eschberger Weg 46
66121 Saarbrücken
+49 681 85787 – 0
www.zema.de
info@zema.de

Geschäftsführer:

Prof. Dr. Susan Pulham
Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki

Vorsitzender des Aufsichtsrats:

Jürgen Barke (Minister für Wirtschaft, Innovation, Digitales und Energie)

Handelsregister:

Saarbrücken HR B 17885

Redaktion und Gestaltung:

Verena Milde

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

© ZeMA gGmbH 2025

ZeMA