Fraunhofer EMI

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI

Forschen für eine sichere Zukunft.

Jahresbericht 2023/2024

Forschen für eine sichere Zukunft.

Jahresbericht 2023/2024

Heute die Sicherheitstechnologien von morgen entwickeln

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser!

Zwei wesentliche Prozesse haben das Fraunhofer EMI im Berichtsjahr geprägt. Intrinsisch war es der fällige Strategie-Prozeß für das Institut und extrinsisch die uns aufgeprägte Finanznot durch die erheblichen Mittelkürzungen im »Forschung und Technologie«-Haushalt des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg).

Strategie-Prozeß: Neue Schwerpunktthemen für das Institut

Der Strategie-Prozeß hat uns wieder einmal auf eindrückliche Art und Weise das Wesentliche, das Machbare und das Notwendige für die Zukunftsfähigkeit des Instituts vor Augen geführt. Abweichend von den früheren Strategie-Runden haben wir uns nicht mehr nur auf Geschäftsfelder und Kernkompetenzen konzentriert, sondern einem zentralen Leitgedanken Rechnung getragen: *Wissenschaftliche Herausforderungen mit innovationsförderndem Potenzial in den Forschungsfeldern des EMI identifizieren, entwickeln und vermarkten.*

Dieser Ansatz führte unmittelbar zur Benennung von zunächst neun sogenannten Schwerpunktthemen. Diese direkt aus dem Leitgedanken abgeleiteten Themen wurden mittels SWOT-, Markt- und Zukunfts-Analysen bewertet und schließlich auf sechs reduziert. Die verbleibenden werden jetzt durch regelmäßige Strategie-Runden hinsichtlich ihres Ressourcen-Bedarfs analysiert und besonders gefördert. Im Einzelnen sind das:

- Hochdynamisches Röntgen
- Batteriesicherheit
- Laser-Materie-Wechselwirkung
- Ingenieurtechnisches Resilienzmanagement
- Satellitengestützte Datenanalyse
- Menschliche Verhaltensmodelle für realistische Verkehrsprognosen

Mit dem vorliegenden Jahresbericht stellen wir die ersten drei Themen und deren aktuellen Stand am EMI dar. Im kommenden Bericht werden wir auch die drei weiteren Themen beleuchten.

Herausforderungen im Haushalt erfolgreich bewältigt

Die zweite intensive Herausforderung für das Institut bestand darin, ein Anfang Januar 2023 spontan konkretisiertes Defizit von 5,5 Mio. € zu kompensieren. Den weggefallenen Zuwendungen aus dem BMVg-Bereich mußte mit kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen begegnet werden. Drosselung der Neueinstellungen und der Vertragsverlängerungen zählten ebenso dazu wie die Schaffung von Dual-Use-Ansätzen und natürlich maximale Akquisition bei Industrie und öffentlichen Mittelgebern. Die langjährige erfolgreiche Kooperation mit beiden potentiellen Quellen hat letztlich auch zur Bewältigung der Krise geführt. Das außerordentliche Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und das Wissen um den besonderen Wert der EMI-Forschung für Schutz und Wirkung im BMVg-Bereich haben uns vor Schlimmerem bewahrt. Nur so konnten wir das abgelaufene Jahr nicht nur hinsichtlich der Forschungsplanung, sondern auch kaufmännisch höchst erfolgreich abschließen.

Meilenstein: weltweit erster Röntgencrash mit 1000 Bildern pro Sekunde

Fast schon ganz nebenbei ist in ebendiesem Berichtszeitraum der erste röntgeninstrumentierte Gesamtfahrzeug-Crash der Welt am EMI in Kooperation mit Mercedes-Benz erfolgt. Eine Kompetenz, die wir über lange Jahre entwickelt haben, die viel Ingenieur-, Logistik- und nicht zuletzt Sicherheits-Knowhow erforderte und die jetzt marktreif wurde. Nicht nur für Gesamtfahrzeuge, sondern insbesondere auch für Komponenten und Geschwindigkeiten unterschiedlichster Art. Ich als Institutsleiter bin auf meine damit betrauten Leute enorm stolz!

Zwei logische Anknüpfungspunkte an den dynamischen Röntgen-Crash führe ich noch an, weil sie mindestens ebenso vielversprechend sind:

– Unser inzwischen ebenfalls operativ gewordenes Batterie-Prüfzentrum TEVLIB, in dem geladene Lithium-Ionen-Batterien auf Mißbrauch-Lastfälle getestet werden können. Und in dem ebenfalls hochdynamische Röntgenverfahren zum Einsatz kommen.

– Das Grey-Box-Processing als ein völlig neues Konzept zur Nutzbarmachung aufwendig erzeugter experimenteller Daten für Validierungszwecke. Mit dieser neuen Form der Vervollständigung diskret vorliegender experimenteller Daten und der präzisen Ermittlung von Abweichungen in korrespondierenden Modellen zur numerischen Simulation werden Entwicklungsprozesse künftig effizienter und prognosesicherer.

Diese und viele weitere EMI-Themen finden Sie im vorliegenden Jahresbericht.

Allen Partnern, Kunden sowie Kolleginnen und Kollegen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik danke ich für das konstant entgegengebrachte Vertrauen. Ich wünsche Ihnen allen eine anregende und erhellende Lektüre!

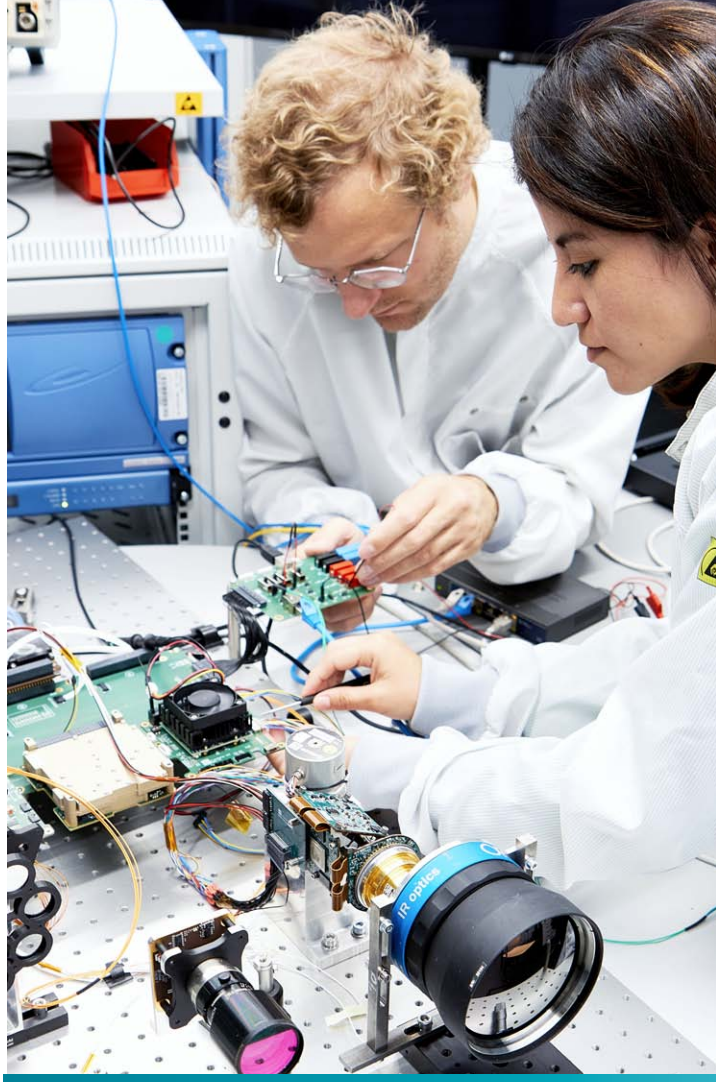
Herzlichst, Ihr

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier
Direktor Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI

Coverfoto: Mercedes-Benz Group AG, Foto Vorwort: Fraunhofer EMI

Fraunhofer EMI Jahresbericht 23/24

Crashtest mit Linearbeschleuniger: am Fraunhofer EMI entwickeltes Verfahren.



Cover
Das Fraunhofer EMI und Mercedes-Benz haben den weltweit ersten Röntgencrash mit 1000 Bildern pro Sekunde durchgeführt.

→ Mehr dazu ab Seite 58.

Fraunhofer-Präsident Prof. Dr. Hanselka informiert sich im Rahmen seiner Dialogtour über den Nanosatelliten ERNST. Der Start soll im Sommer sein.

→ S.71

02 Vorwort
Heute die Sicherheitstechnologien von morgen entwickeln.

06 Das Institut
1959 wurde das EMI als sechstes Institut in die Fraunhofer-Gesellschaft aufgenommen. Ein Überblick über Geschichte und Profil des Instituts.

Schwerpunktthemen

Im Strategieprozess 2023 hat das Institut sechs Schwerpunktthemen identifiziert. Die ersten drei werden hier vorgestellt.

12 Batteriesicherheit
Umfassende Tests für ein detailliertes Systemverständnis von Batterien.

18 Laser-Material-Wechselwirkung
Innovative Laseranwendungen entwickeln: vom Recycling bis zur Entschärfung von Sprengsätzen.

24 Hochdynamisches Röntgen
Verborgene Abläufe im Innern mit bis zu 1000 Bildern pro Sekunde erfassen.

Innovatives Recyclingverfahren für Faserverbünde: oben neu, unten nach dem Recycling.

Geschäftsfelder

Sicherheit erhöhen: Wie kann man Lithium-Ionen-Akkus sicherer machen?

32 Verteidigung
Forschen für ein wehrhaftes Deutschland: Wirkung und Schutz für die Bundeswehr.

42 Sicherheit & Resilienz
Wenn klassische Gefahrenabwehr und Prävention an Grenzen stößt, wird die Notwendigkeit für das Prinzip der Resilienz offensichtlich.

52 Automotive
Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer: egal ob mit dem Fahrrad, dem Auto oder zu Fuß.

64 Raumfahrt
Innovationsmotor Raumfahrt: Schlüsseltechnologie Kleinsatelliten.

76 Luftfahrt
Auf dem Weg zu nachhaltiger und zugleich wettbewerbsfähiger Luftfahrt.

84 Leistungszentrum Nachhaltigkeit
Nachhaltigkeitsforschung zur Anwendung bringen: das Zentrum forscht und fördert Projekte in den Bereichen nachhaltige Materialien, Energiesysteme, Resilienz sowie ökologische und gesellschaftliche Transformation.

Das Institut im Profil

96 Das Institut in Zahlen

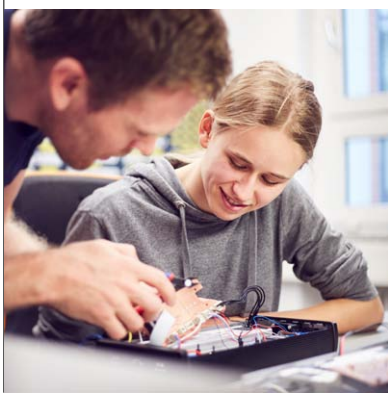
98 Personal & Finanzen

100 Kuratorium

102 Kontakt

103 Impressum

104 Publikationen



Fotos: Mercedes-Benz Group AG, Fraunhofer EMI (5)

Das Institut

Standort Freiburg

Standort Efringen-Kirchen

Standort Kandern

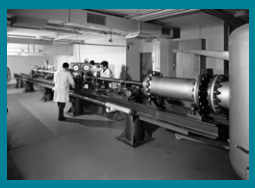
Das Fraunhofer EMI wurde 1959 gegründet. Es folgt dem Anspruch, exakteste Ergebnisse zu liefern und herausragende Technologien zu entwickeln.

Im Mittelpunkt steht: alles, was schnell abläuft, darstellbar und messbar machen. Das Fraunhofer EMI erforscht Zusammenstöße, Explosionen und die damit verbundenen Sicherheitskonzepte für eine katastrophensichere und resiliente Infrastruktur.

1959
Gründung des Instituts

Das Fraunhofer EMI entsteht aus dem 1956 gegründeten Institut für angewandte Physik an der Universität Freiburg.

Es wurde als 6. Institut in die Fraunhofer-Gesellschaft aufgenommen.



Kalter Krieg:
Forschung für die Bundeswehr und ihre Alliierten

In den ersten Jahrzehnten liegt der Schwerpunkt auf ballistischer und strömungsmechanischer Forschung.

Dazu entwickelt das Institut weltweit führende Forschungsansätze.

Weitere Standorte in Efringen-Kirchen und Kandern

Aus den ursprünglichen Steinbrüchen in Winterswei-ler und Holzen entstehen eigenständige Standorte mit Forschungsinfrastruktur.

Weltweit einzigartige Infrastruktur im Bereich Kurzzeitdynamik

Das Fraunhofer EMI macht sich schnell einen Namen als eines der weltweit führenden Institute im Bereich der Kurzzeitdynamik. Über die Jahre werden Expertise und Technologie kontinuierlich weiterentwickelt.

395

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

34,4

Millionen Euro Gesamthaushalt

3

Standorte

Geschäftsfelder

Verteidigung

Sicherheit & Resilienz

Automotive

Raumfahrt

Luftfahrt

Verbünde / Leistungsbereiche

VVS Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit

MATERIALS Werkstoffe, Bauteile

Sprecherinstitut des Leistungszentrums Nachhaltigkeit

Allianzen

Aviation & Space

Batterien

Leichtbau

Simulation

Bau

Kompetenzfeld Additive Fertigung

90er Jahre:
Öffnung für zivile Forschung

Nach Ende des kalten Krieges richtet sich das Institut neu aus. Es erschließt zivile Themen, wie Sicherheit, Automotive, oder auch den baulichen Schutz: 1993 wird das EMI beauftragt, den ersten Bombenanschlag auf das World Trade Center zu rekonstruieren.

00er Jahre:
Luft- und Raumfahrt als neue Geschäftsfelder

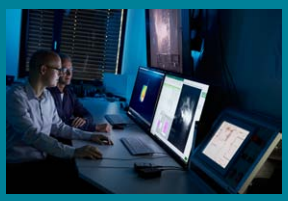
Die kurzzeitdymamische Kompetenz überträgt das EMI auf die Felder der Luft- und Raumfahrt.

Beispielsweise führt das EMI am Columbus-Modul der Raumstation ISS eine Untersuchung zum Einschlag von Meteoroiden und Weltraummüll durch.

Entwicklung Crashtest mit Röntgentechnologie

Das Fraunhofer EMI verfolgt über Jahre das Ziel, Autos beim Crashtest zu röntgen.

Zunächst können nur 8 Röntgenbilder erstellt werden. Heute erstellt die EMI-Anlage 1000 Röntgenbilder pro Sekunde.



Forschen für eine sichere Zukunft

Mit seinen Geschäftsfeldern Verteidigung, Sicherheit, Automotive, Raumfahrt und Luftfahrt hat sich das Institut konsequent darauf ausgerichtet, die Sicherheit auf dem zivilen und militärischen Sektor zu erhöhen.

Fotos: Fraunhofer EMI (9), US Department of Justice, ESA

Weltweit erster Röntgencrash mit 1000 Bildern pro Sekunde

»Einen Meilenstein bei den Entwicklungstools der Zukunft«, bezeichnet Markus Schäfer, CTO von Mercedes-Benz, den Röntgencrash. Fraunhofer EMI und Mercedes-Benz haben in einem gemeinsamen Projekt den weltweit ersten Gesamtfahrzeugcrash mit hochdynamischem Röntgen durchgeführt.

Mehr zum Röntgencrash finden Sie im Kapitel »Automotive«.

Foto: Mercedes-Benz Group AG

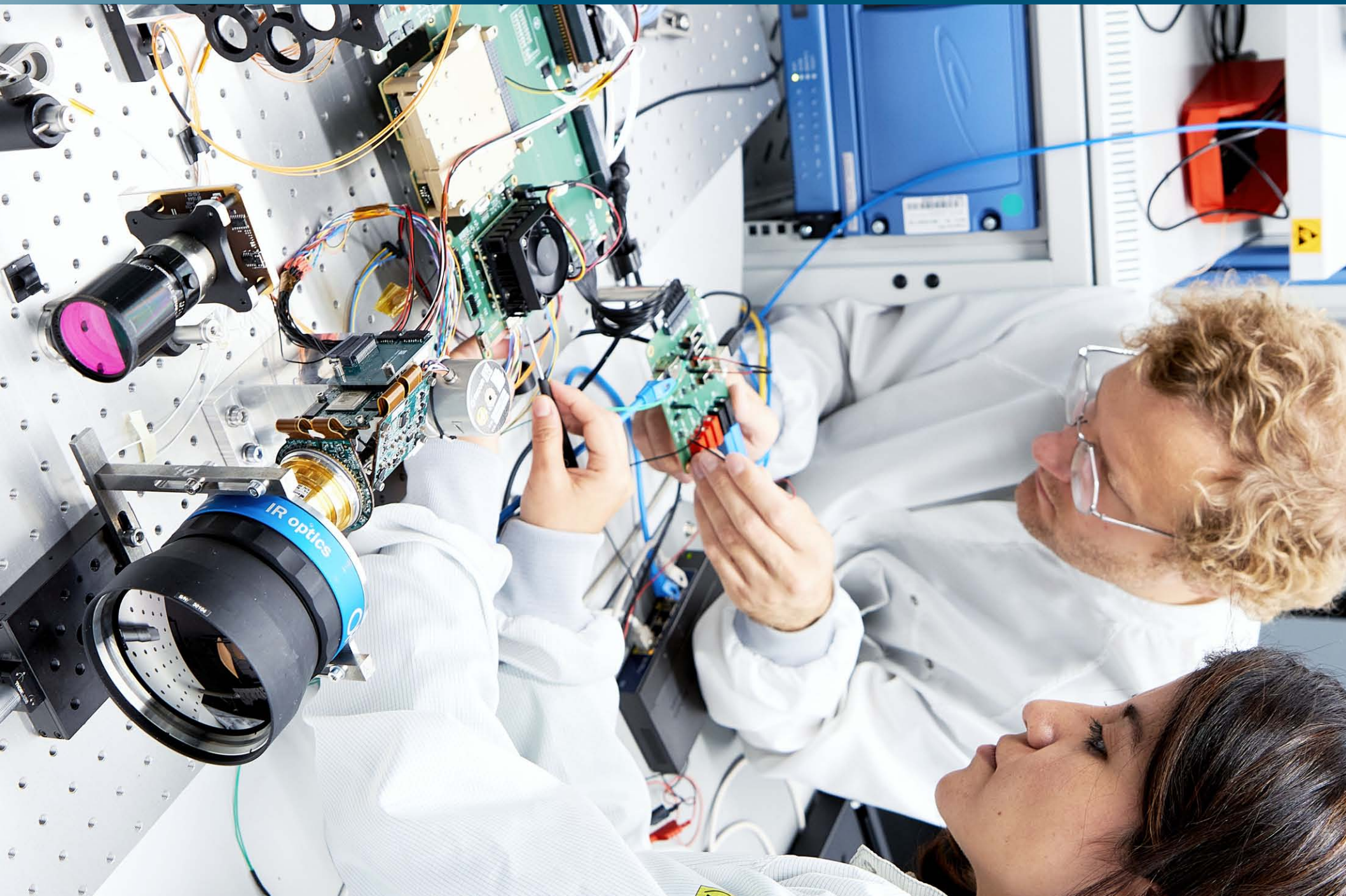

IR optics

Foto: Fraunhofer EMI

Schwerpunktthemen des Instituts

Das Fraunhofer EMI hat für den Zeitraum 2023 bis 2027 seine Institutsstrategie aktualisiert. In einem gemeinsamen Strategieprozess wurden sechs Schwerpunktthemen festgelegt. Diese Themen werden in besonderem Maß vom Institut gefördert.

- Batteriesicherheit
- Laser-Materie-Wechselwirkung
- Hochdynamisches Röntgen
- Ingenieurtechnisches Resilienzmanagement
- Satellitengestützte Datenerhebung und -analyse
- Menschliche Verhaltensmodelle für realistische Verkehrsprognosen

Der Jahresbericht stellt in diesem Jahr die ersten drei Schwerpunktthemen vor. Die verbleibenden Themen folgen im nächsten Jahresbericht.

← **Satellitengestützte Datenerhebung und -analyse**
Arbeit am Nano-Satelliten ERNST

Batteriesicherheit

Batteriesysteme sicher machen

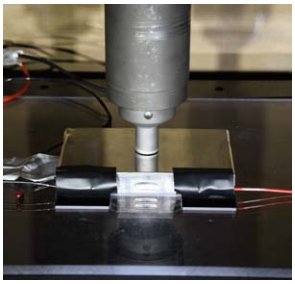
Seit über zehn Jahren hat sich das Fraunhofer EMI darauf spezialisiert, die Sicherheit von Batteriesystemen zu erhöhen.

Das Insititut setzt Experiment und Simulation bei Batterieuntersuchungen eng verzahnt ein. Dadurch können auf effiziente Weise Batteriesysteme verstanden, optimiert und weiterentwickelt werden.

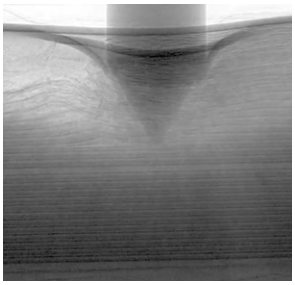
Foto: Fraunhofer EMI

Umfassende Batterietests für detailliertes Systemverständnis

Das Fraunhofer EMI bietet Analyse, Bewertung und Optimierung der Sicherheit auf Ebenen der Zellen, Module und Gesamtsysteme. Für E-Autos wurde eigens eine Forschungsanlage errichtet. Damit können Gesamtfahrzeugbatterien unter Missbrauchsbedingungen getestet werden.



Mechanische Zellcharakterisierung
Test aller üblicher Bauformen (prismatisch, zylindrisch, Pouch) gegenüber Intrusion mit unterschiedlichen Stempelgeometrien. Über Testreihen werden die kritischen Kräfte und Intrusionstiefen ermittelt, welche zum internen Kurzschluss führen. Zusätzlich kann auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten mit präzise begrenzter Intrusionstiefe getestet werden, auch an geladenen Zellen.



In-situ-Röntgenvideo
Mit selbst entwickelter Hochgeschwindigkeits-Röntgentechnik kann die zellinterne Dynamik während des thermischen Durchgehens erfasst werden. Diese Vorgänge blieben bisher verborgen. Durch die Röntgentechnik können Hersteller jetzt Zellen und Batterien mit höherer Sicherheit entwickeln.

Prüfkammer für zerstörende Batterietests: Umfangreiche Messtechnik ermöglicht eine detaillierte Analyse des Batterieverhaltens während des thermischen Durchgehens: z. B. Bestimmung des Kammerdrucks, der Temperatur auf der Zelle und des Gasvolumens während der Entgasung.

Propagationstests
In einem feuer- und explosionsfesten Bunker führt das Institut Propagationstests an Batteriemodulen und Systemen durch. Beispielsweise kann dadurch bei neuen Gehäusekonzepten die Widerstandsfähigkeit gegenüber batterie-internem Brand sowie die Wirksamkeit propagationshemmender Maßnahmen bewertet werden.

Crashtests von Modulen und HV-Speichern
Zur Bewertung der Crashsicherheit von geladenen Modulen und HV-Speichern besitzt das Institut einen Batterie-Crashbeschleuniger. In Verbindung mit Simulationen können Batteriesysteme umfassend beschrieben und erforscht werden.

Fotos: Fraunhofer EMI (5)

Simulation und virtuelle Prototypen

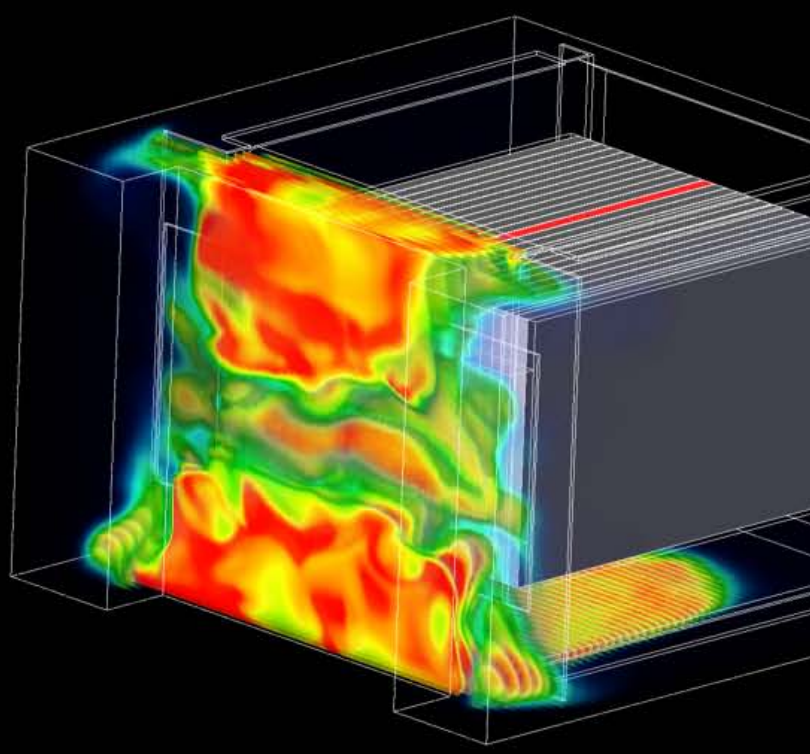
Simulationsmethoden ermöglichen detaillierte Einblicke in das Deformationsverhalten von Batterien und in die Phänomenologie des thermischen Durchgehens.

Schnell und kostengünstig zum sicheren Batteriesystem
In enger Verzahnung mit Versuchen im Batterietestzentrum entstehen realitätsnahe Simulationsmodelle, die Batteriesysteme effizienter und günstiger optimieren als reine Experimente.

Bewertung mechanischer Deformationen
Detaillierte strukturmechanische Modelle bilden mechanische Deformationen von Batterien, wie sie bei Crashs auftreten, realistisch ab. Dies umfasst einzelne Zellen bis hin zu Batteriemodulen und -gehäusen.

Strömungssimulationen zum thermischen Durchgehen
Strömungssimulationen ermöglichen die Nachbildung der Gasausbreitung und der chemischen Reaktionen beim thermischen Durchgehen. Grundlage dafür sind sorgfältige Tests und Kenntnisse zur vorliegenden Zellchemie. Zu einer fundierten Modellierung des thermischen Durchgehens gehört auch eine Berücksichtigung der freigesetzten Partikel, da diese einen beträchtlichen Anteil der Wärme transportieren.

Auswirkungen des thermischen Durchgehens
Um die Ausbreitung des thermischen Durchgehens zu verhindern, ist es wichtig, dass angrenzende Bauteile ihre Strukturintegrität behalten. Eine umfassende Bewertung der Sicherheit erfordert daher nicht nur die Simulation des Brandes, sondern auch eine fundierte Modellierung des thermomechanischen Materialverhaltens der umgebenden Strukturen.



Exemplarische Strömungssimulation zum Ausgasen einer Batteriezelle im Modul
Geometrie dankenswerterweise von der RCT Power GmbH zur Verfügung gestellt.

Anwendungsfelder

Automotive

Crashsicherheit von Elektrofahrzeugen, Auslegung von Batterien gegen thermisches Durchgehen

Luftfahrt

Risiko von Handys, Laptops und Tablets in der Flugzeugkabine, Drohnenimpakt auf Flugzeugstrukturen

Stationäre Speicher

Sicherheitskonzepte für Heimspeicher, Wirksamkeit von Brandschutzmaßnahmen

Verteidigung

Sicherer Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in der Bundeswehr, wehrtechnische Belastungen (z.B. Beschuss)

E-Bike, E-Scooter

Untersuchung von Batteriebränden

Spezialanwendungen

Übertragung des vorhanden Know-Hows auf beliebige Anwendungs- und Einbausituationen

Aktuelle Forschung dazu am EMI

Sicherer Betrieb von Heimspeichern

Batteriesicherheit bei Elektrofahrzeugen

Sicherheit von Batterien unter wehrtechnischen Belastungen

Sicherheit von elektronischen Devices im Flugzeug

Sichere und nachhaltige kunststoffbasierte Batteriegehäuse

Methoden und Modelle zur volldigitalen nachhaltigen Produktentwicklung

Schwerpunkt Batteriesicherheit

Leitung Experiment
Dr. Sebastian Schopferer
sebastian.schopferer@emi.fraunhofer.de

Leitung Simulation
Benjamin Schaufelberger
benjamin.schaufelberger@emi.fraunhofer.de

Foto: Fraunhofer EMI (2)

Laser-Materie-Wechselwirkung

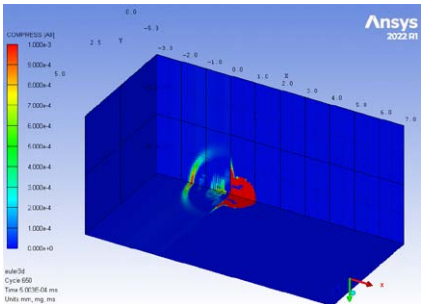
Forschung für innovative Laseranwendungen

Das Fraunhofer EMI betreibt Labore, die Effekte intensiver Laserstrahlung mit modernster Hochgeschwindigkeitsmesstechnik wissenschaftlich analysieren. Die Untersuchungen werden durch Simulationen ergänzt. Sie ermöglichen eine physikbasierte Berechnung der Wechselwirkungsprozesse und eine Optimierung der Prozessparameter. Ziel ist die Entwicklung neuartiger Laseranwendungen.

Im Bild: Hochenergielaser mit Leistungen im Bereich von 100 kW ermöglichen eine schnelle Prozessführung in der Materialbearbeitung

Im Fokus: Laseranwendungen der Zukunft entwickeln

Vom Recycling bis zur Entschärfung von Sprengsätzen: Lasertechnologie ist ein zentrales Schlüsselelement in der Entwicklung innovativer Verfahren. Entscheidende Grundlage ist dabei das detaillierte Verständnis der Laser-Materie-Wechselwirkung.



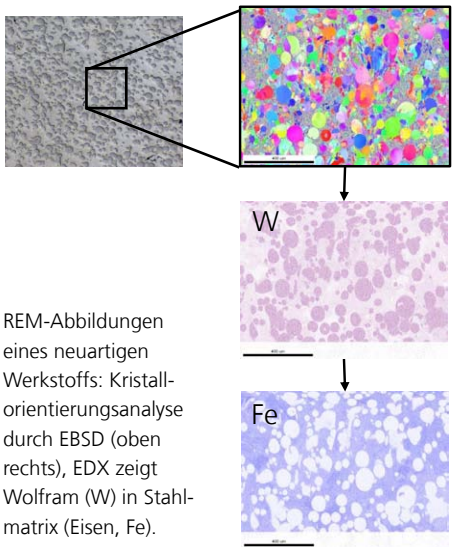
Simulation der Laserablation unterstützt Arbeiten zur Prozesskontrolle.

Künstliche Intelligenz überwacht Bearbeitungsprozesse

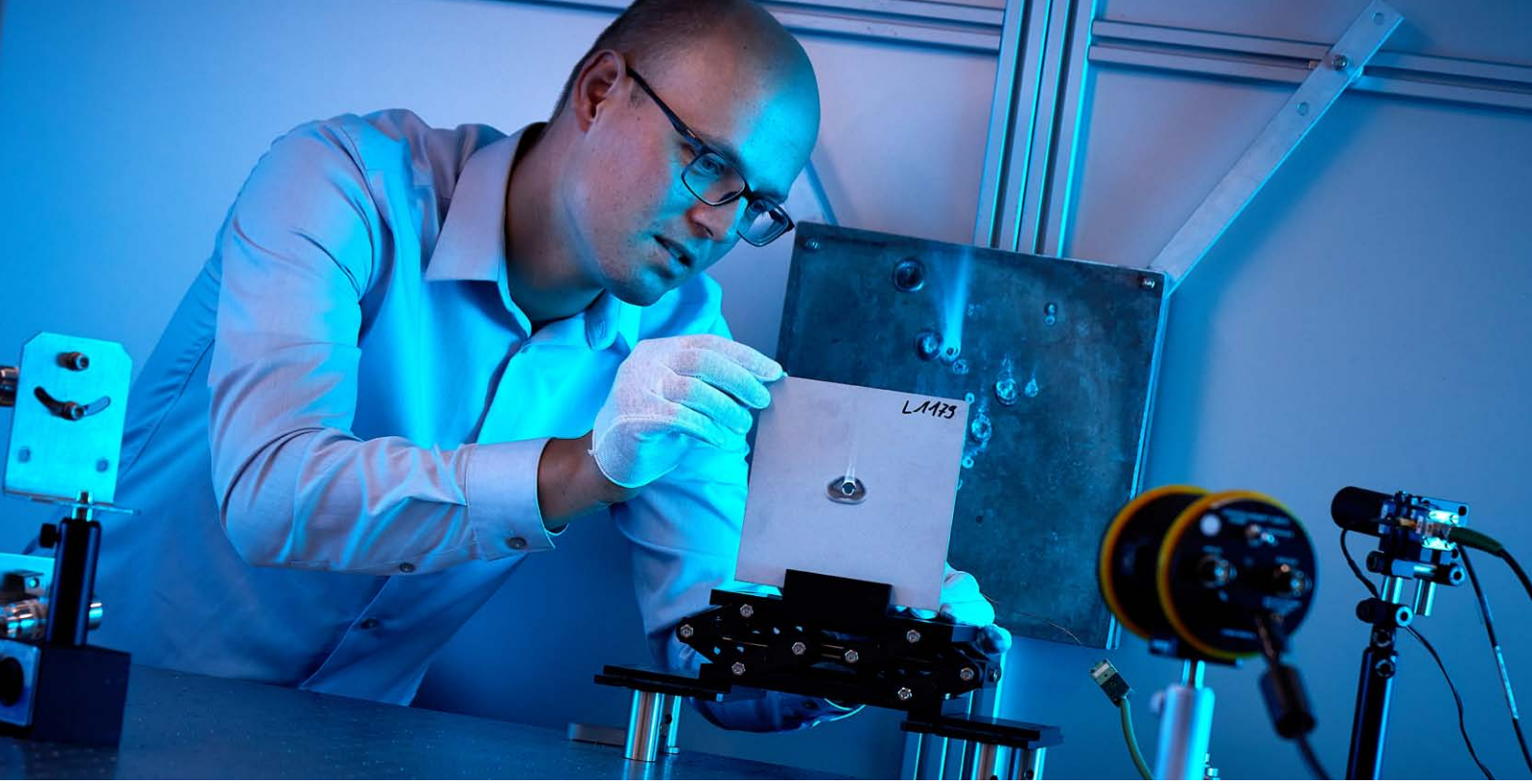
Welches Potenzial hat die künstliche Intelligenz für die Laser-Materialbearbeitung? Im Projekt RAPID-KI erforscht das EMI gemeinsam mit anderen Fraunhofer-Instituten die Möglichkeit, datenbasierte Methoden für die Prozesskontrolle beim Materialabtrag mit gepulsten Lasern zu nutzen. Anwendungsmöglichkeiten sind das Recycling von Elektronik-Komponenten sowie das Entlacken großflächiger Flugzeugteile.

Neuartige Materialien mittels generativer Fertigung

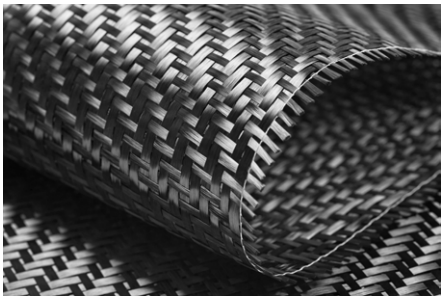
Wie kann die Lasertechnologie die Entwicklung neuartiger Materialien unterstützen? Das selektive Laserstrahl-Schmelzen (engl.: Selective Laser Melting, SLM) wird in der generativen Fertigung insbesondere für die Herstellung geometrisch komplexer Metallbauteile eingesetzt. Durch Verwendung spezieller Mischungen von Metallpulvern als Ausgangsmaterial in Verbindung mit den passenden Prozessparametern können neuartige Werkstoffe mit maßgeschneiderten physikalischen Eigenschaften entwickelt werden. In diesem Zusammenhang forscht das Fraunhofer EMI insbesondere an der Herstellung von Metall-Matrix-Verbundmaterialien, die sich durch eine große Härte bei gleichzeitig hoher plastischer Verformbarkeit auszeichnen.



REM-Abbildungen eines neuartigen Werkstoffs: Kristallorientierungsanalyse durch EBSD (oben rechts), EDX zeigt Wolfram (W) in Stahlmatrix (Eisen, Fe).



Innovationen durch Hochleistungs-Lasertechnologie: neue Chancen für zahlreiche Anwendungsfelder.



Kohlenstofffaser-Gelege ohne Matrix.

Recycling von Verbundmaterialien

Wie können Verbundmaterialien ressourcenschonend wiederverwendet werden? Verbundmaterialien wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK, engl.: carbon fiber reinforced plastics) besitzen aufgrund ihrer hohen Stabilität in Kombination mit geringem Gewicht ein großes Potenzial im Leichtbau und werden insbesondere in der Luftfahrt- und Automobilindustrie eingesetzt. Das Recycling ausgedienter Bauteile ist bisher noch ein ungelöstes Problem. Das Fraunhofer EMI forscht an laserbasierten Technologien, die eine Wiederverwendung der verbauten Kohlenstofffasern ermöglichen.

Entschärfung von Sprengsätzen

Wie kann die Lasertechnologie die Sicherheit bei Entschärfungsprozessen erhöhen? Die Entschärfung von Sprengsätzen stellt stets ein Risiko für die beteiligten Einsatzkräfte dar – sei es beim Fund von alter Weltkriegsmunition oder im Zusammenhang mit terroristischen Anschlägen. Die Nutzung von Lasertechnologie zur kontrollierten Beseitigung von Explosivstoffen sowie zur Delaborierung von Blindgängern wurde in Speziallaboren am Fraunhofer EMI in internationalen Projekten erforscht. Dabei kann die Sicherheit der Einsatzkräfte durch die Möglichkeit, Laserstrahlung über große Entfernungen einzusetzen, erheblich verbessert werden.

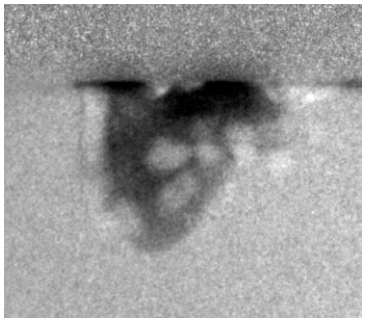
Durch Laserneutralisation aufgerissenes Rohrbombenmodell.

Fotos: Fraunhofer EMI (4), vitals / stock.adobe.com

Anwendungspotenzial von Hochleistungs-Laserstrahlung bis 120 kW

Welche neuartigen Möglichkeiten bieten Hochleistungs-Laserquellen in der Materialbearbeitung? Typische Laserquellen, die bisher in der industriellen Fertigung für Schweißen und Schneiden eingesetzt werden, arbeiten mit Strahlleistungen in der Größenordnung von 10 Kilowatt. Durch aktuelle Fortschritte in der Lasertechnologie sind heute bereits Laser in der Leistungsklasse von 100 Kilowatt kommerziell verfügbar. Das Fraunhofer EMI untersucht industrielle Anwendungsmöglichkeiten für diese neue Generation von Laserquellen, wie beispielsweise für einen schnellen Materialabtrag oder die Härtung von Oberflächen. Auch die Entwicklung neuartiger Hochleistungs-Bearbeitungsoptiken wird in diesem Zusammenhang adressiert.

Mit 120 kW Laserleistung lokal schnell gehärtetes Stahlwerkstück.



Im Röntgenvideo eines Laserschweißprozesses (Laser von oben, nach links) wird mit Tracern (Wolfram-Pulver, im Video schwarz) die Schmelzbaddynamik visualisiert (mit Universität Stuttgart, IFSW).

Neue Erkenntnisse durch Kompetenz in der Hochgeschwindigkeitsmesstechnik

Wie können neue messtechnische Verfahren für eine bessere Prozesskontrolle und zur Gewinnung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse eingesetzt werden? Das Fraunhofer EMI ist weltweit führend auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitsmesstechnik und nutzt diese Kompetenzen insbesondere im Bereich der Lasertechnologie. Ein aktuelles Beispiel ist die Einrichtung eines Messplatzes, bei dem die Laser-Materie-Wechselwirkung mit Hochgeschwindigkeitsröntgenbildgebung untersucht wird. Ein Linearbeschleuniger erlaubt es erstmals, hochdynamische Prozesse besonders auch in dicken Metallproben sichtbar zu machen. Damit können hochdynamische Prozesse, die bei der Laser-Materialbearbeitung im Inneren von Proben stattfinden, mit einer bisher nicht erreichten Zeitauflösung sichtbar gemacht werden.

Hochenergie-Laser mit 100 kW

Bisher werden in der Industrie Laser mit Leistungen von rund 10 kW für die Materialbearbeitung eingesetzt. In der Zwischenzeit sind auch Lasersysteme mit Leistungen von über 100 kW kommerziell verfügbar.

Das Fraunhofer EMI untersucht die Wechselwirkungsprozesse derartiger Hochenergie-Laserstrahlung mit Materie und entwickelt neuartige Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Materialbearbeitung, Sicherheit und Wehrtechnik.

Neue Laser-Anwendungen entwickeln: Das Fraunhofer EMI setzt einen Ytterbium-Hochenergie-Laser ein.

Aktuelle Forschung dazu am EMI

Projekt RAPID KI
Nutzung von Machine-Learning zur Prozesskontrolle bei der Laser-Materialbearbeitung.

Projekt DigiTain
Anwendung der Lasertechnologie zum Recycling von Wasserstofftanks aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen.

Projekt Laser Safety Quantitative Risk Analysis
Softwaretool zur Beurteilung der Sicherheit bei Freifeld-Laseranwendungen

Projekt Topologieoptimierung für multidisziplinäre Designprobleme
Softwarelösungen und Forschungsdienstleistung für die Industrie.

Projekt Expertentool Laserwirkung
Untersuchung von grundlegenden Wechselwirkungsprozessen von Hochenergie-Laserstrahlung mit Materie und Entwicklung von prognosefähigen Computermodellen.

Schwerpunkt Laser-Materie-Wechselwirkung
Dr. Jens Osterholz
jens.osterholz@emi.fraunhofer.de

Dr. Martin Lück
martin.lueck@emi.fraunhofer.de

Fotos: Fraunhofer EMI (6)

Hochdynamisches Röntgen

Sehen, was wirklich im Innern passiert

Mehr hochwertige Daten pro Experiment: das innovative Forschungskonzept aus Röntgensimulation, Röntgenexperiment und Analyse liefert einzigartige Daten und Ansichten.

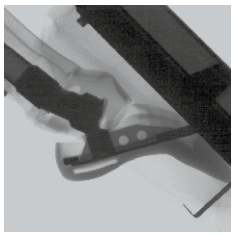
Im Bild: Röntgensimulation eines Fahrzeugcrashs

Foto: Fraunhofer EMI

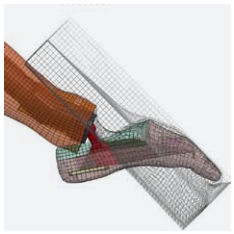
Mit Röntgen eine neue Dimension erschließen

Hochdynamisches Röntgen mit 1000 Bildern pro Sekunde

Die Technologie ermöglicht es erstmals, das Verhalten innenliegender Bauteile und Subsysteme experimentell während des Versuchs zu validieren.



Direkte Beobachtung kritischer Abläufe
Diese Vorgänge können bisher nur indirekt gemessen werden (zum Beispiel durch Beschleunigungssensoren) oder nach dem Versuch rekonstruiert werden. Hochdynamisches Röntgen ermöglicht die direkte Beobachtung kritischer Abläufe.



Millisekundengenaue Analyse und Datenrückführung in gewohnte Arbeitsumgebung
Der kritische Zeitpunkt, in dem ein System kippt, kann millisekundengenau mit der FE-Simulation abgeglichen werden. Wenn im Röntgenbild markante Bereiche über die Zeit verfolgt werden, ist es möglich, die Trajektorien zurück in die Auswertesoftware zu übertragen.

Verknüpfung von Design, Prozess und Material
Die Analyse des Materials findet vor, während und nach den Prozessen statt. Durch die digitale Verknüpfung aus Design, Prozess und Material können Lösungen zuverlässig und in höchster Präzision ermittelt werden.

Fotos: Fraunhofer EMI (3), Mercedes-Benz Group AG

Forschungscrashanlage am Fraunhofer EMI: In der Forschungscrashanlage werden Impaktversuche auf Bauteil- und Gesamtfahrzeugebene mit Impaktmassen bis zu 3 t und Geschwindigkeiten bis zu 80 km/h realisiert. Im Bild: Gesamtfahrzeugversuch mit Einsatz eines Linearbeschleunigers.

Hochdynamischer Röntgencrash: die Technologie im Detail

Kann man ein Auto röntgen – wie beim Arzt?
Und das alles bei einem Aufprall mit hoher Geschwindigkeit?

An der Forschungscrashanlage des Fraunhofer EMI wird während des Fahrzeugcrashs ein Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideo erstellt.

Unter Verwendung von A-priori-Daten und Simulationen werden im Vorfeld definierte Bereiche und spezifische Bauteile im Fahrzeuginnern betrachtet.

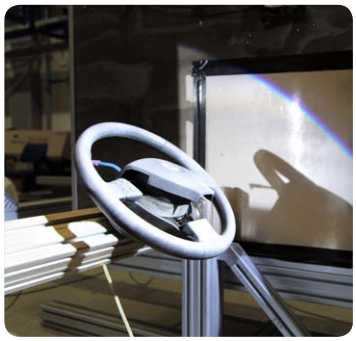
Stehen FE-Simulationsdaten zur Verfügung, können mit der selbst entwickelten Röntgensimulation virtuelle Vorversuche durchgeführt werden. Dadurch kann der Experimentaufbau optimiert werden. Das Beobachtungsfenster in Raum und Zeit ist dabei so festzulegen, dass wichtige Vorgänge möglichst quer zur Beobachtungsrichtung stattfinden.

Für spezielle Fragestellungen werden Marker eingesetzt – ähnlich wie in der Medizin. Sie sind nach der Aufnahme besonders gut im Röntgenbild zu erkennen. Unter diesen Voraussetzungen kann die exakte Auswertung der Ergebnisse erfolgen.

Aus den Rohdaten wird mit digitalen Bildverarbeitungsalgorithmen ein Röntgenvideo erzeugt. Es wird so aufbereitet, dass Vorgänge im Innern leicht nachvollziehbar sind. Zusätzlich können digitale Mustererkennungstechniken Merkmale nachverfolgen und ihre Trajektorien quantitativ erfassen.

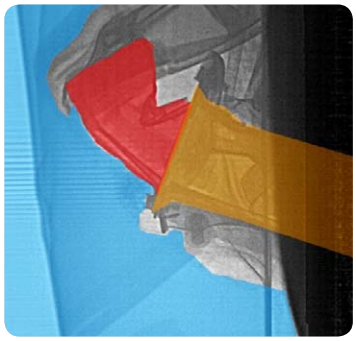
Anwendungsbeispiele

Die relevanten Abläufe bei Experimenten finden häufig verborgen im Innern statt. Die Gründe sind vielfältig: komplexer Komponenten-Aufbau, Überlagerung von mehrstufigen Schutzkonzepten oder Verkleidungen. Bei all diesen Einschränkungen ermöglicht hochdynamisches Röntgen einen direkten Einblick.



Dummykopfaufprall auf das Lenkrad

Genaue Erfassung der Kopfposition – trotz Airbags
Beim Crashtest moderner Fahrzeuge zünden eine Vielzahl von Airbags. Insbesondere die Curtain-Airbags blockieren den Blick auf die Dummys im Fahrzeuginnern. Beschleunigungssensoren, Innenkameras und Farbmarkierungen geben nur ein unvollständiges Bild wieder. Mit hochdynamischem Röntgen kann die genaue Position von Dummys im Fahrzeug gefilmt werden: Wie nahe ist der Kopf dem Lenkrad wirklich gekommen? Gibt es elastische Deformationen, die nach dem Crash nicht mehr erkennbar sind?



NCAP-MPDB-Test genauer erfassen

Röntgen liefert Antworten über den Crash-Ablauf
Beim MPDB-Test dringt der Vorderwagen tief in die Wabenbarriere ein. Bei der Auswertung wird die plastische Verformung millimetergenau nach dem Crash vermessen. Doch wie tief dringt das Fahrzeug zu welchem Zeitpunkt ein? Wann treten in der Crashstruktur in der Barriere Verformungen auf? Wie groß ist die maximale elastische Deformation? Auf diese Fragen kann Röntgen die Antwort liefern.

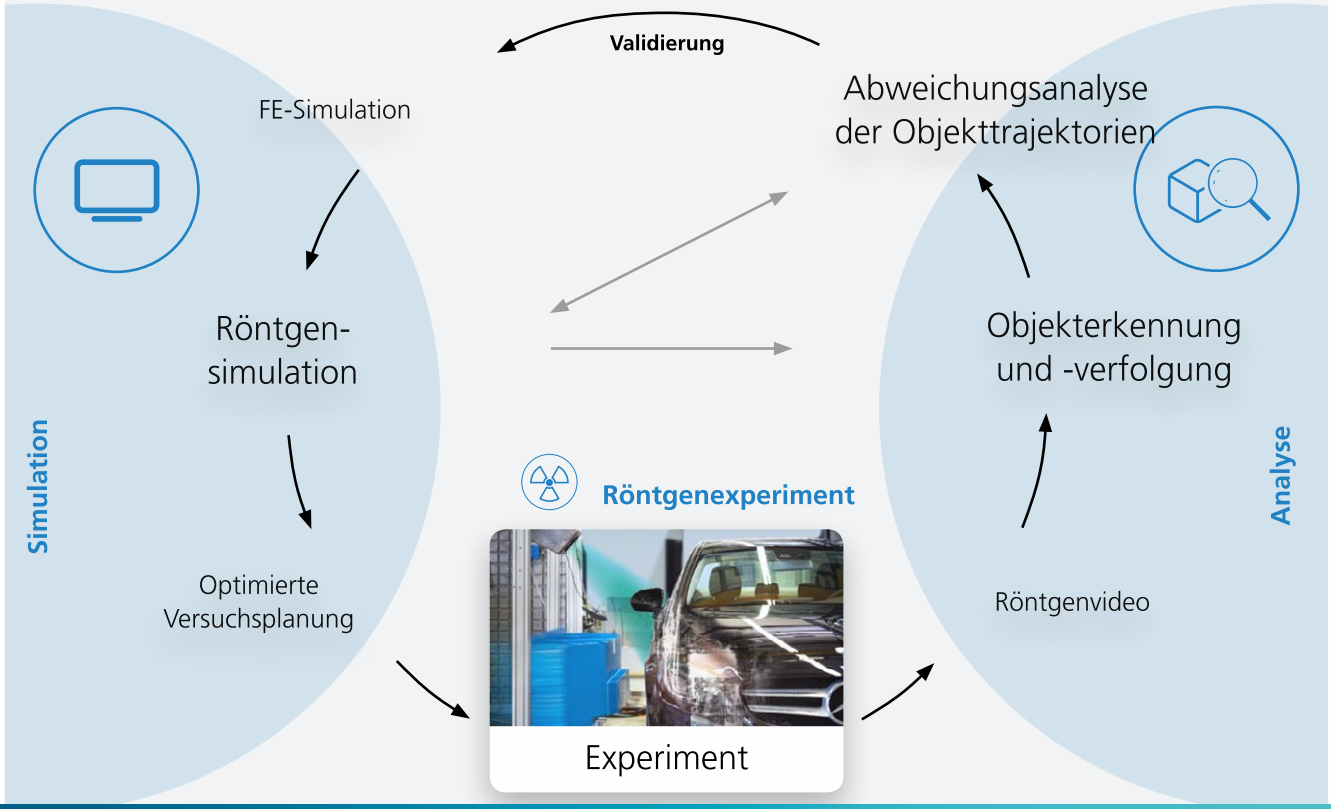
Komplexe, mehrlagige Crashstrukturen

Aufprall zur Zeit der tiefsten Intrusion untersuchen
Beim Schutz von VRUs oder Insassen kommen Dummys in Kontakt mit mehrlagigen komplexen Strukturen, wie zum Beispiel der A-Säule. Dabei verformen sich sowohl äußere Schichten als auch innere Strukturen. Elastische Verformung der tiefer liegenden Strukturen oder wann es zum Versagen kommt, ist aber nach dem Test nicht mehr erkennbar. Mit hochdynamischem Röntgen kann der Aufprall zum Zeitpunkt der tiefsten Intrusion untersucht und entsprechende Fragestellungen aufgeklärt werden.

Fotos: Fraunhofer EMI (6)

Fusion zwischen Simulation und Experiment

Auf Basis von Finite-Element-Simulationen werden simulierte Röntgenbilder zur Versuchsplanung generiert. Mithilfe dieser Daten wird der Versuchsaufbau auf maximalen Informationsgewinn optimiert. Das im Versuch ermittelte Röntgenvideo wird im Nachgang analysiert. Die dabei gewonnenen Daten ermöglichen die Validierung der Simulationsmodelle von bisher nicht sichtbaren Bauteilen.



Aktuelle Forschung dazu am EMI

DigiTain – Digitalization for Sustainability

Öffentlich gefördertes Projekt durch BMWK und Europäische Union

SiKuBa

Sichere Batteriegehäuse aus Kunststoff; öffentlich gefördertes Projekt durch BMWK

Grey-Box-Processing

Generierung und Nutzung hybrider Datensätze aus unvollständigen, mit heterogenen Unsicherheiten behafteten Messdaten mit prognosefähigen FE-Struktursimulationen

Schwerpunkt Hochdynamisches Röntgen

Dr. Jens Fritsch
jens.fritsch@emi.fraunhofer.de

Dr. Malte Kurfiß
malte.kurfiss@emi.fraunhofer.de

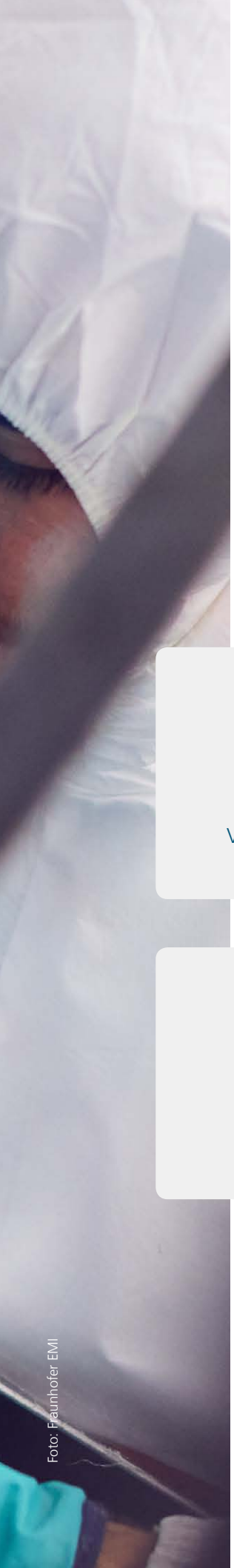


Foto: Fraunhofer EMI

Geschäftsfelder am Fraunhofer EMI

Verteidigung

Sicherheit & Resilienz

Automotive

Raumfahrt

Luftfahrt

← **Sicherheit von Batteriesystemen erhöhen**
Am Standort Efringen-Kirchen können umfangreiche Tests zur Batterieprüfung durchgeführt werden. Sie sind eng verknüpft mit begleitenden Simulationen.

Foto: Bundeswehr / Marco Dorow

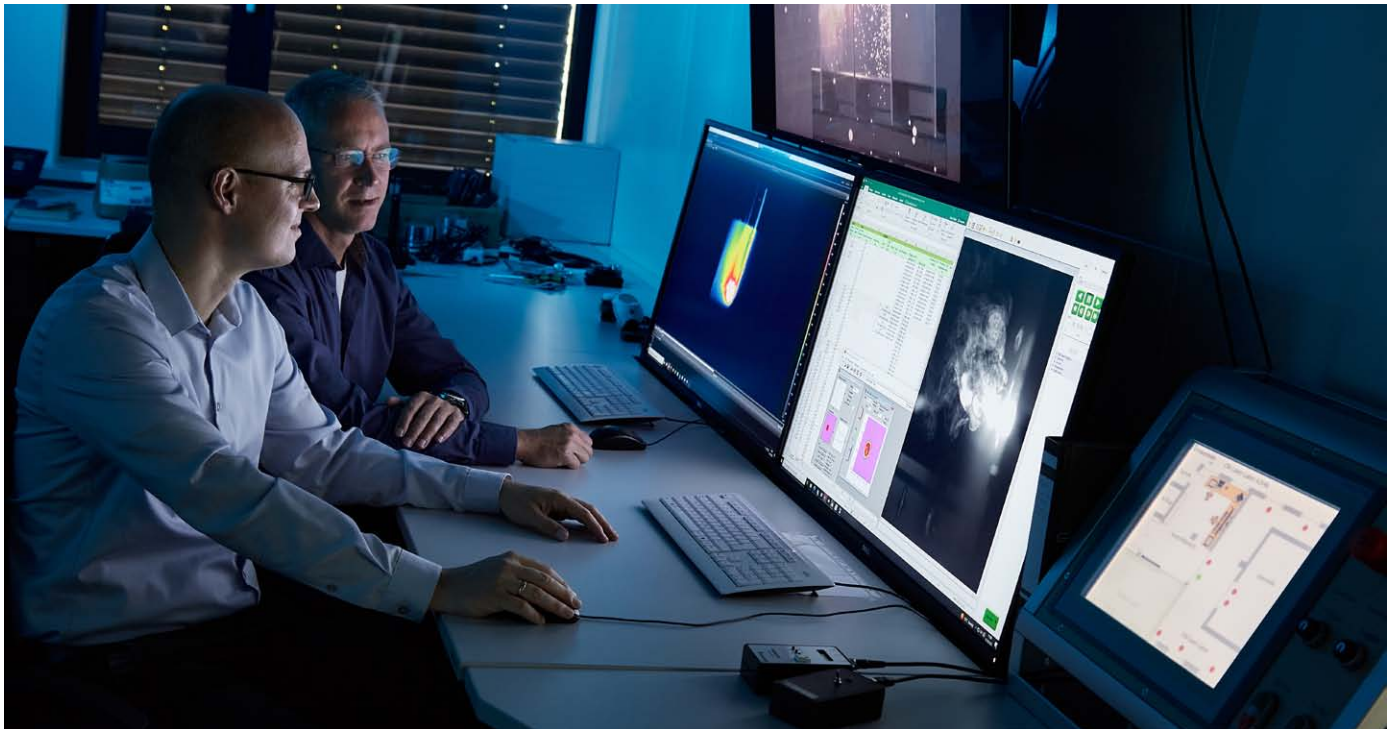
Wirkung und Schutz für die Bundeswehr

Die Bundeswehr benötigt zukunftsfähige Systeme für Land, Luft, See und Cyberraum. Daher erforscht das Fraunhofer EMI wissenschaftlich-technologische Fragen aus den Bereichen Wirkung und Schutz sowie wehrtechnische Sicherheit und Systeme.

Aktuell entwickelt das Institut eine elektronische Schießbereichsbegrenzung, um die Panzerwaffe nicht nur in statischen, sondern auch dynamischen Erprobungsszenarien unter Aufrechterhaltung der Schießsicherheit untersuchen zu können.

Im Bild: Übung des Panzerbataillons 393 mit Kampfpanzer Leopard 2A7V.

Geschäftsfeld Verteidigung



Forschen für ein wehrhaftes Deutschland

Nach 30 Jahren Einsparungen und Reduktion bei den deutschen Streitkräften hat der Ukraine-Konflikt zu einer Kehrtwende geführt. Landes- und Bündnisverteidigung sind wieder in den Mittelpunkt gerückt. Die Kompetenzen des Fraunhofer EMI sind dabei stark gefragt.

Das Institut dankt in besonderem Maß für die langjährige und umfangreiche Förderung durch das Bundesministerium für Verteidigung.

Von **Daniel Hiller**

Das Fraunhofer EMI verfügt über Labore, in denen intensive Laserstrahlung mit modernster Hochgeschwindigkeits-Messtechnik wissenschaftlich analysiert wird. So können Laseranwendungen der Zukunft entwickelt werden.

Wendepunkt für die europäische Sicherheitsarchitektur

Der 24. Februar 2022 markiert eine Zäsur, wie sie Europa seit 1945 in Hinsicht auf Sicherheits- und Verteidigungsanforderungen nicht mehr erlebt hat. Mit dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine und dem damit einhergehenden Bruch mit den international anerkannten Regeln der territorialen Integrität souveräner Staaten endet eine der längsten Friedensphasen in der jüngeren Geschichte Europas.

Die Folgen dieses Krieges wirken sich massiv auf die deutsche Sicherheits- und Verteidigungspolitik aus – wie auch auf die deutsche und europäische wehrtechnische Industrie. Wurde in den letzten 30 Jahren Personal und Material in allen Teilstreitkräften reduziert, sieht sich auch die Bundeswehr nun hohen Herausforderungen gegenüber. Während politisch der Fokus wieder deutlich auf Landes- und Bündnisverteidigung liegt, stehen die deutsche Rüstungsindustrie und ihre Leistungsfähigkeit angesichts umfassender Nachfragen im In- und Ausland massiv unter Produktionsdruck für Waffen und Munition.

Veraltetes Material und dringender Bedarf an Neuentwicklungen

Ferner betreibt die Bundeswehr in sämtlichen Teilstreitkräften Technologien und Systeme, deren Lebenszyklen in vielen Fällen bereits erreicht oder gar überschritten sind. Vorhandenes Material und Ausrüstung wurden im Geiste einer strengen Haushaltsdisziplin lediglich instandgehalten und eventuell in ihrem jeweiligen Leistungsvermögen noch etwas aufgewertet. Tatsächliche Neuentwicklungen von wehrtechnischen Systemen im größeren Umfang, verknüpft mit den begleitenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten nur selten angestoßen. Auch hier hat das Jahr 2022 nochmal großen Einfluss genommen auf das Handeln der Politik und Wirtschaft in Sachen neuer wehrtechnischer Großsysteme. Mit den beiden gemeinsam mit Frankreich bereits vor 2022 initiierten Entwicklungsprojekten Future Combat Air Systems (FCAS) und Main Ground Combat System (MGCS) sollen zwei Projekte verfolgt werden, bei denen deutsche Verteidigungstechnologie und -forschung maßgebliche Beiträge leisten werden.

Fotos: Fraunhofer EMI (6)

Labor für 3D-Druck: Die am Fraunhofer EMI entwickelten Methoden für effiziente Prozessparameter verkürzen Entwicklungszeiten und ermöglichen eine äußerst hohe Materialqualität.

Forschung am Fraunhofer EMI

Im Lichte dieser Entwicklungen finden die Forschungsarbeiten am Fraunhofer EMI im Bereich Wirkung und Schutz starkes Interesse seitens unserer öffentlichen Auftraggeber bei der Bundeswehr ebenso wie bei der wehrtechnischen Industrie. Ob im Bereich Luftverteidigung, Fahrzeugschutz, 3D-Druckverfahren für wehrtechnisch relevante Bauteile und Schutzkomponenten, ob im Kontext der Entwicklung von Simulationswerkzeugen für hochkomplexe Explosionsereignisse im militärischen Kontext oder im Zuge der persönlichen Ausstattung von Soldaten im Einsatz: die Kompetenzen des Fraunhofer EMI werden intensiv nachgefragt.

Auf den folgenden Seiten berichten Forscherinnen und Forscher aus verschiedenen Projekten über ihre Forschung am Fraunhofer EMI: von Grundlagen der Technologieerforschung bis hin zur Herstellung von Funktionsillustrationen und Softwareprototypen. Sie zeigen, wie Innovationen möglich werden, die am Ende der Bundeswehr im Einsatz neue Lösungen im Bereich Wirkung und Schutz zur Verfügung stellen.

Dienstleistungen am EMI

Analyse von Wirk- und Schutzmechanismen

Computersimulation von Impakt- und Stoßwellenereignissen

Entwicklung von Sensorik und Elektronik für extreme Bedingungen

Kurzzeitmesstechnik, z. B. Röntgendiagnostik

Materialcharakterisierung und Versagensanalyse

Analyse zur technischen Sicherheit und Zuverlässigkeit wehrtechnischer Systeme

Schießsicherheit für Panzer in dynamischen Erprobungsszenarien

Die Fähigkeiten von Waffensystemen, die auf die Nutzung in dynamischen Einsatzszenarien ausgelegt sind, lassen sich in rein statischen Erprobungsszenarien nicht vollständig untersuchen.

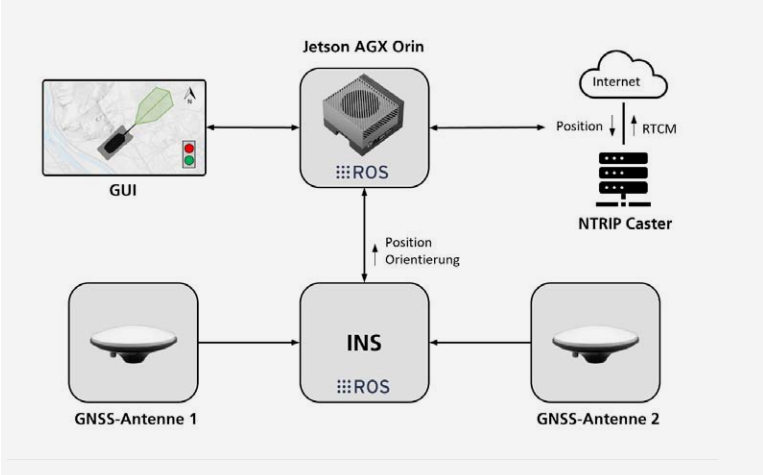
Daraus ergibt sich der Bedarf nach einer Möglichkeit, Waffensysteme unter Aufrechterhaltung der Schießsicherheit auch in dynamischen Szenarien untersuchen zu können. Ein am Fraunhofer EMI entwickeltes Schießbereichsbegrenzungssystem überwacht die Position und Ausrichtung des Waffensystems. Mit diesem System kann die Freigabe zum Schießen automatisch auf zulässige Bereiche beschränkt werden.

Entwicklung einer elektronischen Schießbereichsbegrenzung

Im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung mit dem Erprobungszentrum Unterlüß (EZU) der Rheinmetall Waffe Munition GmbH entwickelt das Fraunhofer EMI eine elektronische dynamische Schießbereichsbegrenzung, die als externes Anbaugerät an einem (hier beispielhaft ausgewählten) Kampfpanzer (KPZ) Leopard 2 adaptiert werden kann. Dabei wurde ein Funktionsillustrator entwickelt, der für eine Erprobung mit nur minimalem Systemeingriff über eine Standardschnittstelle am Fahrzeug montierbar ist und im Nachhinein wieder abgebaut werden kann. Im Gegensatz zu klassischen mechanischen Bereichsbegrenzern handelt es sich um eine Multisensorplattform, die auch im Fahrbetrieb verwendbar ist. Das System misst mittels GNSS (Globalem Navigationssatellitensystem) seine aktuelle Position und mittels Inertialmesssystem seine Bewegung. Basierend auf den örtlichen Gegebenheiten des Erprobungsplatzes werden mittels einer GIS-gestützten Analyse (Geografisches Informationssystem) unter Einbeziehung der fusionierten Sensordaten in Echtzeit die zulässige Waffenausrichtung und Waffenposition bestimmt, in der ein Schuss ausgelöst werden darf. Je nach Munition, Fahrzeuggeschwindigkeit und Platzgegebenheiten sind die Präzisions- und Geschwindigkeitsanforderungen technisch herausfordernd. Hinzu kommt noch die Belastung durch den Schuss, gegen die das System gehärtet sein muss.

Echtzeitanalyse für sichere Waffenausrichtung

Es ergeben sich drei Hauptanforderungen: Messabweichung des Azimuts, Ausgangsdatenrate von Position und Orientierung und die Stoßfestigkeit des Systems.
Um die absolute Ausrichtung der Bordkanone zu bestimmen, kommt ein satellitengestütztes inertiales Navigationssystem (INS) zum Einsatz. Das INS liefert kontinuierlich aktualisierte Informationen über die Fahrzeugausrichtung, während zwei GNSS-Multibandantennen dazu dienen, den Azimut zu korrigieren. Dabei ist es möglich, durch Echzeitkinematik (real-time kinematics, RTK) die Antennenpositionen in einem Bereich zwischen 1 cm und 2 cm anzugeben.



Schießsicherheit für Panzer
Andreas Siebert, andreas.siebert@emi.fraunhofer.de
Sebastian Hess, sebastian.hess@emi.fraunhofer.de

Fotos: Fraunhofer EMI (2)

Generatives Design bei Bauteilen des Nanosatelliten ERNST: Multidisziplinäre Anforderungen sind bei Space-Hardware die Regel.

3D-Druck im militärischen Kontext: schneller und kostengünstiger zum Ziel

Wie das Fraunhofer EMI generative Algorithmen einsetzt, um effiziente Konstruktionsentwürfe zu erstellen und komplexe Designprobleme zu lösen.

Automatisierte Tools für Konstruktion, Simulation und Optimierung sind heute unverzichtbar im modernen Engineering. Ein Beispiel dafür sind generative Algorithmen wie die Topologieoptimierung, die automatisiert effiziente Konstruktionsentwürfe erstellen können. Das Fraunhofer EMI setzt innovative Softwarelösungen und spezialisierte Forschungsdienstleistungen ein, um komplexe Designprobleme zu lösen.

Einsatz von intelligenten Algorithmen in der Bauteilauslegung

Mit intelligenten Algorithmen kann man die Grenzen traditioneller Designmethoden überwinden. Das Fraunhofer EMI nutzt diese Technologien, um multidisziplinäre Problemstellungen, wie Schwingverhalten, Energieabsorption oder thermische Leitfähigkeit, effizient anzugehen. Der Einsatz generativer Algorithmen ermöglicht es, das richtige Gleichgewicht zwischen Masse, Leistungsfähigkeit und Robustheit zu finden.

KI-unterstütztes Konzeptdesign

In der frühen Phase der Produktentwicklung helfen KI-gestützte Methoden, Mehrzielprobleme zu lösen. Das Fraunhofer EMI kombiniert KI-Modelle, die bei der Variantengenerierung ihre Stärken ausspielen, mit numerischen und analytischen Ansätzen, um funktionale, nachhaltige und kostenoptimierte Lösungen zu entwickeln. Obwohl die Lösung partieller Differenzialgleichungen herausfordernd ist, bieten KI-gestützte Methoden enormes Potenzial.

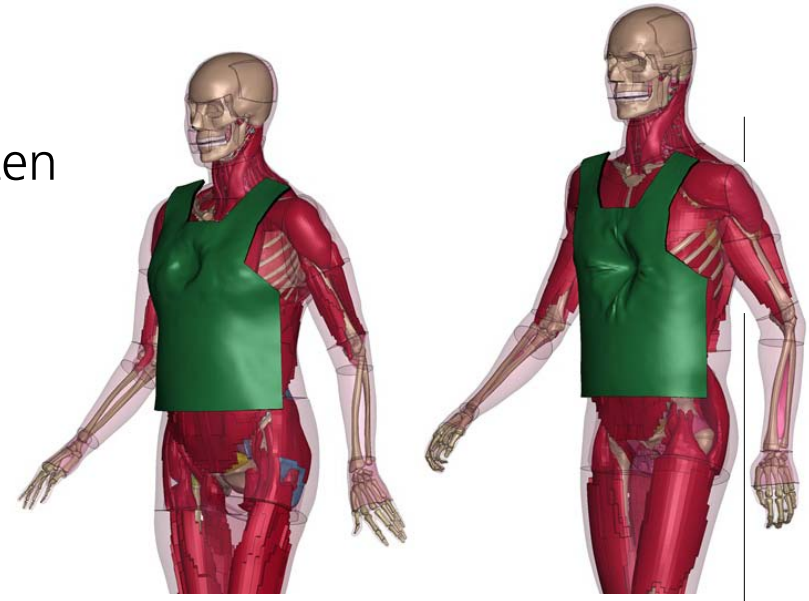
Expertenlösungen als Dienstleistungsangebot

Das Fraunhofer EMI bietet umfassende Dienstleistungen von Beratung über Implementierung bis hin zur Schulung an. Diese Services unterstützen sowohl die Nutzung und Automatisierung spezialisierter Arbeitsabläufe als auch spezifische Anwendungsfälle, bei denen Standardtools nicht ausreichen.

Additive Manufacturing
Dr. Klaus Hoschke
klaus.hoschke@emi.fraunhofer.de

Soldatinnen und Soldaten besser schützen

Biomechanische Analysen für persönliche Schutztechnologien und Körperschutz



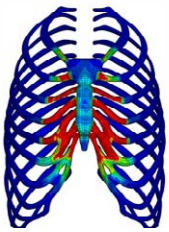
Menschmodelle GHBMC F05 und M50 der Firma Elemance mit angelegter weichballistischer Schutzweste und simuliertem Impakt in der Mitte des Brustkorbs.

Verletzungen durch Verformung der Schutzausrüstung

Ein »Behind Armor Blunt Trauma« (BABT) entsteht durch nicht penetrierende ballistische Aufprallvorgänge, die durch die schnelle Verformung der persönlichen Schutzausrüstung (PSA) verursacht werden. Während des Aufpralls verformen sich die PSA und das darunter liegende Körpergewebe rapide. Diese hochdynamische Belastung kann Prellungen, Risse, Brüche und Verletzungen von Organen verursachen. Eine Messung der maximalen Verformungstiefe in ballistischem Ton (»Backface Deformation«, BFD – Grenzwert 44 mm erstmalig festgelegt 1979 vom US-Justizministerium) wird noch heute fast weltweit zur Zertifizierung von Schutzwesten verwendet. Jedoch gibt es keinen direkten kausalen Zusammenhang zwischen BFD und Schwere der resultierenden Verletzungen beim Menschen. Numerische Menschmodelle (»Human Body Models«, HBM) können inzwischen verwendet werden, um diese ballistischen Limits zu hinterfragen und um diese spezielle Form der ballistischen Belastung körperregionabhängig zu untersuchen. Das Fraunhofer EMI verfolgt das Ziel, virtuelle Berechnungsmethoden mit hoher Prognosefähigkeit zu entwickeln, um Fragestellungen zu stoßartigen Belastungseffekten auf den Körper beim Einsatz von persönlichen Schutztechnologien analysieren zu können. Dadurch wird die Bewertungsfähigkeit für PSA und den Körperschutz ausgebaut.

Experimentelle Analyse von Belastungseffekten

Eine hohe Prognosesicherheit von numerischen Berechnungen wird durch eine experimentelle Validierung unterstützt. Hierfür werden geeignete Ersatzmaterialen benötigt. Die gezielte Entwicklung von Surrogat-Knochenmaterialien für ballistische Dummys ist aktuell Bestandteil einer Dissertation am EMI mit dem Thema »Simulationsmethoden zur prognosefähigen Analyse von Knochensurrogaten«. Konventionelle Crashtest-Dummys aus der Automobilindustrie sollen gezielt weiterentwickelt und für wehr- oder polizeitechnische Zwecke eingesetzt werden. Somit kann am EMI die Wirksamkeit persönlicher Schutzausrüstung im getragenen Zustand unter Zuhilfenahme von Dummys experimentell untersucht werden. Der Einsatz numerischer Menschmodelle ermöglicht ferner die quantitative Erfassung von Verletzungsrisiken und damit eine bessere konstruktive Auslegung von PSA-Produkten, die mit einem höheren Schutz vor Verletzungen verbunden ist. Für diese wurde ein zusätzliches Modellierungsverfahren entwickelt, um einfache Textilelemente von einer 2D-Form in eine 3D-Form zu überführen, die sich der virtuellen Körperoberfläche anpassen. Diese Technik stellt allgemein ein einfaches Mittel dar, um flexible Objekte über dreidimensionale Konturen zu drapieren.



Rippenknochendehnungen und wirkende Kräfte auf den Brustkorb.

Schutztechnologien und Körperschutz
Marcin Jenerowicz
marcin.jenerowicz@emi.fraunhofer.de

Fotos: Fraunhofer EMI (4)

Militärische Infrastruktur benötigt besonderen baulichen Schutz. Eine Studie des Fraunhofer EMI hilft beim Einsatz nachhaltiger Materialien. Im Bild: Fliegerhorst in Wunstorf

Baulicher Schutz für militärische Infrastrukturen

Herausforderungen durch die Umstellung auf nachhaltigere Materialien bei Bauten mit Schutzanforderungen

Nationale und internationale Übereinkommen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen sowie die zunehmend begrenzte Verfügbarkeit von klassischen Baustoffen zwingen den Bausektor dazu, auf alternative nachhaltigere Baumaterialien und Bauweisen zurückzugreifen.

Dies wird auch Auswirkungen auf Bauten mit Schutzanforderungen gegenüber physikalischen Bedrohungen haben. Während das dynamische Verhalten und das Schutzpotential von konventionellen zement- und betonbasierten Massivbauteilen gut erforscht sind, ist das Verhalten von Bauteilen aus nachhaltigeren Baumaterialien gegenüber diesen Belastungen weitgehend unbekannt.

Materialienkatalog: nachhaltig und zugleich schutzwirksam

Im Rahmen der Studie werden geeignete Bauweisen identifiziert, die die Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung für bundeseigene Bauten erfüllen und gleichzeitig den Schutzanforderungen des Verteidigungssektors gerecht werden. Zu diesem Zweck wurde ein Katalog von Materialien erstellt, der anhand von Nachhaltigkeitsaspekten bewertet wurde. In einem zweiten Schritt wurden die Materialien und ihr Einsatz in Bauteilen anhand ihrer mechanischen Eigenschaften und ihrer Leistungsfähigkeit gegenüber dynamischen Lasten ausgehend von Projektilimpakt und Luftstoßwellen bewertet.

Planungshilfe bei Auswahl geeigneter Bauweisen

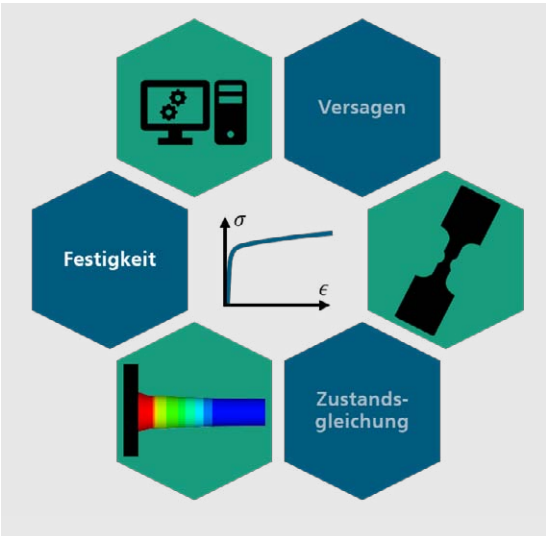
Diese Vergleichsanalyse ist die Grundlage für zukünftige experimentelle und simulationsbasierte Forschungsarbeiten, um die dynamische Reaktion von Bauteilen aus nachhaltigen Materialien quantitativ zu erfassen. Die Forschungsergebnisse sollen Planer und Bauherrenvertreter bei der Auswahl geeigneter Bauweisen unterstützen, die sowohl Nachhaltigkeits- als auch Schutzaspekte berücksichtigen.

Baulicher Schutz von militärischen Infrastrukturen

Johannes Scheider
johannes.schneider@emi.fraunhofer.de

Wie verwundbar ist Infrastruktur im Auslandseinsatz durch Explosionen und Beschuss?

Das Fraunhofer EMI entwickelt ein softwarebasiertes Analysetool, mit dem die Schutzwirkung von Infrastruktur im Auslandseinsatz gegen Explosions- oder Beschussbelastungen quantifiziert werden kann. Dadurch ist es für Operationsplaner möglich abzuleiten, für welche Einsatzzwecke Bestandsbauten geeignet sind und welche Randbedingungen bei Neubauten zu beachten sind, um Schutzanforderungen bei Einsätzen zu erfüllen.



Neue Werkstoffmodelle für präzise Simulationen in der Endballistik

Für prognosefähige Simulationen von endballistischen Vorgängen ist es unverzichtbar, die Effekte von dynamischen Belastungen in Werkstoffmodellen richtig zu beschreiben. Diese Modelle werden in der Regel anhand spezieller Charakterisierungsversuche kalibriert, die aber für die Endballistik wenig repräsentativ sind.

Am Fraunhofer EMI werden datenbasierte Methoden eingesetzt, um Modellparameter gleichzeitig auf eine breitere Vielfalt von Versuchstypen zu optimieren, einschließlich Impaktversuche. Die resultierenden Werkstoffmodelle beschreiben die untersuchten Materialien signifikant besser als zuvor und ermöglichen eine deutliche Steigerung der Genauigkeit bei der Computersimulation von Materialien unter hochdynamischer Belastung.

Geschäftsfeld Verteidigung
Daniel Hiller, daniel.hiller@emi.fraunhofer.de
→ emi.fraunhofer.de/verteidigung

Fotos: Bundeswehr / Rolf Klatt, Gorodenkoff / iStock, Fraunhofer EMI (2)

Geschäftsfeld Sicherheit & Resilienz

Technische Resilienz für Katastrophenschutz

2023 wurde Südeuropa stark von Waldbränden heimgesucht. Etwa 5.000 km² fielen den Flammen zum Opfern, das entspricht der doppelten Fläche von Luxemburg. Durch die Erderwärmung werden in den nächsten Jahren stärkere Waldbrände erwartet. Wie technische Resilienz hilft, Katastrophen besser zu beherrschen und wie das Fraunhofer EMI konkret an Lösungen zur besseren Brandbekämpfung forscht, lesen Sie auf den folgenden Seiten.

Im Bild: NASA-Satellitenbild der Waldbrände vom 22. August 2023 bei Alexandroupolis mit hunderte Kilometer langer Rauchfahne, die über das Mittelmeer treibt.

Foto: NASA

Wie technische Resilienz unsere Sicherheit stärkt

Naturkatastrophen, Kriminalität, Terroranschläge – diese Phänomene haben eine Gemeinsamkeit: ihr Eintritt lässt sich weder komplett verhindern, noch in vielen Fällen präzise vorhersagen.

Dort, wo klassische Gefahrenabwehr und Prävention an Grenzen stößt, wird die Notwendigkeit für das Prinzip der Resilienz offensichtlich.

Von **Daniel Hiller**

To bend, but not to break
Technische Resilienz ist die Fähigkeit von technischen Systemen, bei Störungen oder unerwarteten Ereignissen funktionsfähig zu bleiben oder sich schnell zu erholen. Dazu gehören Robustheit, Fehlertoleranz und flexible Anpassungsstrategien, um Ausfälle zu minimieren und den Betrieb zu sichern.

Foto: Eduardo / stock.adobe.com

Ingenieurtechnische Resilienz für praxistaugliche Anwendungen

Waldbrände, Wirbelstürme, Extremhitzeperioden und Hochwasserfluten haben im vergangenen Jahr Schäden von über 200 Milliarden Euro verursacht. Bei der Cyberkriminalität nehmen Angriffe massiv zu: auf große wie kleine Unternehmen, auf öffentliche Einrichtungen wie Kommunen, aber auch auf kritische Infrastrukturen wie Krankenhäuser. Im Bereich der Terrorgefahren verdeutlichten eine ganze Reihe an Anschlägen, wie relevant dieses Phänomen für unsere offene Gesellschaft bleibt.

Technische Resilienz stärkt unsere Sicherheit, indem sie Systeme und Infrastrukturen widerstandsfähiger gegen Störungen macht. Dies bedeutet, dass Gebäude, Netzwerke und andere kritische Einrichtungen so konzipiert sind, dass sie Erschütterungen, Naturkatastrophen, Cyberangriffe und andere Bedrohungen aushalten oder sich schnell davon erholen können. Durch Redundanzen, Notfallsysteme und widerstandsfähige Materialien kann die Ausfallwahrscheinlichkeit minimiert und die Kontinuität gewährleistet werden. Solche Maßnahmen sind entscheidend, um die Sicherheit von Menschen und wichtigen Einrichtungen zu gewährleisten.

Das Fraunhofer EMI beforscht das Themenfeld. Es strebt kontinuierlich danach, aus der Forschung heraus praxistaugliche Werkzeuge zu entwickeln.

Aktuell entwickelte ingenieurtechnische Lösungen

– Gemeinsam mit einem Industriepartner hat das Fraunhofer EMI eine Software für Wetterextreme entwickelt. Sie beschreibt unter anderem die Resilienz der Baustruktur bei Hochwasser.

– Kommt es einmal zur Großschadenslage, dann sind neben einzelnen Gebäuden ganze Infrastrukturbereiche betroffen. Einsatzkräfte müssen schnell ein umfassendes Lagebild über die Situation haben und in kurzer Zeit viele Entscheidungen über Einsätze fällen, die über Leben und Tod entscheiden. Im EU-Projekt TeamAware erforschen EMI-Experten, wie man die Resilienz von Einsatzkräften technisch unterstützen kann.

– Darüber hinaus hat das Fraunhofer EMI am Standort Berlin neue Simulationslösungen entwickelt, um das Verhalten von großen Menschenmengen in Krisensituationen simulieren zu können. Derartige Werkzeuge sind für Sicherheitsbehörden enorm hilfreich, wenn z. B. Sicherheitsszenarien im Rahmen von Großveranstaltungen betrachtet werden.

– Auf großer Ebene hilft eine EMI-Lösung im Bereich der Stromversorgung, Störungen und Ausfälle in einzelnen Netzbereichen schnell zu kompensieren und Kaskadeneffekte zu reduzieren.

Neue Richtlinien zur Steigerung der Resilienz

Anfang 2024 veröffentlichte das BMBF die nunmehr 4. Auflage des nationalen zivilen Sicherheitsforschungsprogramms. Das EMI knüpft mit seinem Leistungsangebot an sämtliche der 6 Säulen des Programms an. 2024 wird zudem das neue Dachgesetz zur Stärkung der physischen Resilienz von Betreibern kritischer Anlagen, kurz KRITIS-Dachgesetz, erwartet. Im Zuge der Umsetzung einer europäischen Richtlinie zur Steigerung der Resilienz kritischer Entitäten, wird dieses neue Gesetz dem Thema Resilienz in Unternehmen voraussichtlich einen starken Schub geben. Hierzu kann das Fraunhofer EMI mit seinen Kompetenzen gemeinsam mit der Wirtschaft Innovationen umsetzen. Parallel dazu wird die im letzten Jahr durch das Bundesinnenministerium veröffentlichte nationale Strategie zur Steigerung der Resilienz in einer nationalen Plattform zur Umsetzung begleitet. Das Fraunhofer EMI wird in dieser Plattform mitwirken und damit die strategische Themensetzung aktiv mitgestalten.

Resilienz von der Natur lernen
Ein Beispiel für Resilienz in der Natur sind Bäume, die sich durch Flexibilität und Stärke an Umwelteinflüsse anpassen und Stürmen standhalten.
Im Bild: eine Windbuche am Schauinsland bei Freiburg.

Dienstleistungen am EMI

Risikoanalyse und physische Sicherheit

Schutz von Gebäuden und Infrastrukturen vor Extrembelastungen.
Bauteile, Gebäude, Stadtviertel

Resilienzmanagement und Geschäftskontinuität für Unternehmen

Sämtliche Risiken, wie Terror, Hagel, Sturm, Erdrutsch, Hochwasser, Erdbeben

Resilienzbewertungen und -design

Produktionssysteme, Versorgungsnetzwerke und Lieferketten

Verletzliche Infrastrukturen: Die Katastrophe im Ahrtal hat gezeigt, wie verwundbar unsere Infrastrukturen sind.

Auf dem Weg zur widerstandsfähigen Stadt

Zur Resilienz baulicher Strukturen gegenüber Hochwasserereignissen

In mehreren Projekten erforscht das Fraunhofer EMI die Vulnerabilität von Gebäuden und bauliche Infrastrukturen gegenüber Hochwasserereignissen, um Versagensursachen zu identifizieren, mögliche Schadenswahrscheinlichkeiten zu quantifizieren und Verbesserungsmaßnahmen zu qualifizieren. Übergeordnetes Ziel ist die Stärkung der Resilienz urbaner Strukturen.

Zentrales Element ist die Entwicklung von generischen Gebäudemodellen. Das sind vereinfachte mathematische Modelle, die typische Merkmale von Gebäuden in Bezug auf ihre Struktur, Materialien und Bauweise berücksichtigen. Diese Modelle stellen eine breite Palette von Gebäudetypen dar und können verwendet werden, um die Vulnerabilität einer großen Anzahl von Gebäuden gegenüber Hochwasser zu bewerten, ohne dass für jedes einzelne Gebäude spezifische Daten erforderlich sind. Probabilistische Analysen generischer Gebäudemodelle basieren auf der Verwendung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für verschiedene Parameter, wie z. B. die Höhe des Hochwassers oder Festigkeitswerte der Konstruktionswerkstoffe. Durch die Kombination dieser Wahrscheinlichkeitsverteilungen können statistische Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von Schäden und Risiken abgeleitet werden.

Projekt »ResCentric«

Dr. Julia Rosin, julia.rosin@emi.fraunhofer.de

Fotos: sophie1404 / stock.adobe.com, Christian / stock.adobe.com

Neue Plattform verbessert Koordination von Hilfskräften bei Großeinsätzen

Projekt TeamAware: Team Awareness Enhanced with Artificial Intelligence and Augmented Reality

In den vergangenen Jahren kam es zu einer signifikanten Zunahme von Großeinsätzen im Katastrophenschutz. Dies stellt eine erhebliche Herausforderung für Einsatzkräfte dar, insbesondere im Hinblick auf Koordination, Reaktion und Kommunikation. Im Zuge der internationalen Katastrophenhilfe soll das Projekt »TeamAware« helfen, neue und bekannte Probleme im Katastrophenschutz zu lösen. Es wurde im Rahmen der europäischen Forschungsinitiative »Horizon2020« entwickelt. Beim Projekt arbeiten 22 internationale Partner zusammen.

»TeamAware« verfolgt drei Ansätze: erstens, die Reduktion der manuellen Berichterstattung. Dafür werden neue Sensorsysteme verwendet. Zweitens, die Nutzung dezentraler Datenübertragung und -verarbeitung. Drittens, benutzerfreundliche Anzeigen für Einsatzkräfte auf allen Ebenen.

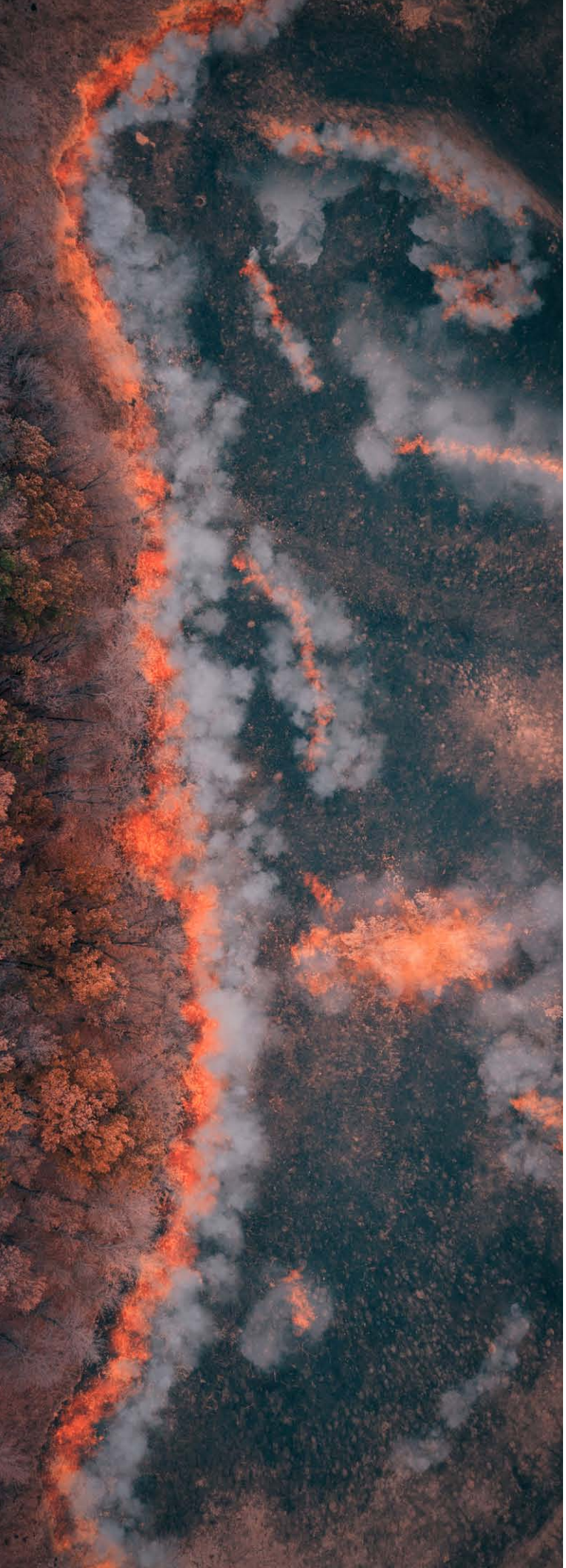
In »TeamAware« kommen Drohnen, smarte Kleidung und verschiedene Sensoren zum Einsatz. Sie messen zum Beispiel Standorte, Körperpositionen und Herzraten der Ersthelfer. Auch chemische Gase oder Audio- und Videoaufnahmen werden erfasst. Die gesammelten Daten werden zusammengeführt und individuell genutzt. So kann man auch Stress- und Erschöpfungslevel der Einsatzkräfte erkennen.

Das Fraunhofer EMI hat in »TeamAware« eine Software-Plattform entwickelt. Diese kann Datenströme analysieren, verarbeiten und auswerten. Die Daten werden durch neue Algorithmen gebündelt. So erhöht sich ihre Aussagekraft. Mithilfe eines KI-basierten Decision Support Systems wird die aktuelle und vergangene Lage analysiert und in Echtzeit Handlungsempfehlungen und Hinweise auf kritische Situationen gegeben. Anschließend werden alle Daten in einem übersichtlichen Gesamtlagebild dargestellt, welches nach modernen und erprobten HMI-Gesichtspunkten entwickelt wurde. Mithilfe dieses Systems werden Einsatzkräfte auf taktischer und strategischer Ebene in die Lage versetzt, das ablaufende Geschehen live zu verfolgen, dieses anhand der einzelnen und zusammengeführten Datenlagen einzuschätzen und auf sich ändernde Faktoren direkt und unmittelbar zu reagieren.

Im Kontext der Sicherheitsforschung konnte das Fraunhofer EMI mit TeamAware einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, Ersthelfer und Einsatzkräfte für komplexe und herausfordernde Einsatzlagen mittels neuer Ideen und Technologien fit zu machen und ihre Arbeit sicherer und effektiver zu gestalten.

Projekt »TeamAware«
Jakob Stigler,
jakob.stigler@emi.fraunhofer.de

Foto: Andrii Chagovets / stock.adobe.com



Waldbrände effizienter bekämpfen

Neues Verfahren verbessert die Waldbrandbekämpfung aus der Luft

Das Fraunhofer EMI und das Startup-Unternehmen CAURUS Technologies GmbH arbeiten gemeinsam an der Entwicklung eines neuartigen Löschverfahrens. Es soll die Effizienz der Waldbrandbekämpfung aus der Luft verbessern.

Studien haben gezeigt, dass eine Optimierung der Größe der Wassertröpfchen und die Position der Wolke den Löscherfolg stark beeinflussen. Es handelt sich um kritische Elemente, um die Temperatur eines Brandes unter den Entzündungspunkt zu bringen, sowie dem Feuer den zum Verbrennungsvorgang benötigten Sauerstoff zu entziehen.

Durch das Verfahren können erheblich schneller Vegetationsbrände bekämpft werden und die Effizienz des Wassereinsatzes vervielfacht sich. Der zukünftige Mechanismus zur gezielten Erzeugung einer Wasser-Aerosol-Wolke wird im Fraunhofer DeepTech Accelerator AHEAD bereits in Phase 2 gefördert.

Wirksamer Löschangriff bei Waldbränden
In den vergangenen Jahren sind jedes Jahr etwa 5000 bis 10 000 km² Waldfläche den Flammen zum Opfer gefallen. CAURUS Technologies und Fraunhofer EMI arbeiten an einem neuen Mechanismus, der eine effizientere Löschwolke entstehen lässt.

Effizientes Löschverfahren
Dirk Schaffner,
dirk.schaffner@emi.fraunhofer.de

Resiliente Stromnetze für die Energiewende

Der Wegfall grundlastfähiger Kraftwerke und der zunehmende Strombedarf für Wärmepumpen und E-Mobilität erfordern eine neue Architektur des Stromnetzes

Die traditionell stark hierarchisch strukturierte Stromversorgung in Deutschland steht vor gravierenden Umbrüchen. Die Energiewende erfordert den Übergang zu einer neuen Architektur, die durch eine dezentrale Energieerzeugung in unteren Netzebenen und den Wegfall traditioneller Stabilitätsgaranten in Form großer Kraftwerke gekennzeichnet ist. Verbraucherseitig erhöhen eine zunehmende Verbreitung von Wärmepumpen und E-Mobilität die Anforderungen an das Stromnetz. Gleichzeitig führt der Klimawandel zu häufigeren und stärkeren Extremwetterereignissen.

Entwicklung eines Resilienzmonitors

Im Projekt RESIST bündeln fünf Fraunhofer-Institute – das EMI, das IEE, das ISE, das ISOB-AST und das IEG – ihre Expertise mit dem Ziel, die Resilienz der Stromversorgung unter diesen Bedingungen zu steigern. Dazu werden aktuelle Technologien im Bereich der Stromversorgung durch Simulationen und Tests neuer Hardware weiterentwickelt. Auf Basis der daraus entstandenen Ergebnisse wendet das Fraunhofer EMI die Strategien des Resilienz-Managements an, um die Resilienz in der Stromversorgung strukturiert und umfassend abzubilden. Dafür steht jetzt ein Katalog von Resilienz-Schlüsselindikatoren zur Verfügung, der im eigens entwickelten Resilienzmonitor (R-Monitor) seine Anwendung findet. Der R-Monitor bildet die Resilienz der Stromversorgung basierend auf der Zusammenführung unterschiedlichster Datenquellen zeitlich ab und berücksichtigt dabei die Risiken und Möglichkeiten neu eingeführter Technologien und Methoden. Dies geschieht unter anderem durch die Implementierung eines im Rahmen des Projekts am Fraunhofer EMI entwickelten Tools. Dieses Tool beschreibt das dynamische Verhalten eines Übertragungsnetzes nach hypothetischen Ausfällen und ermöglicht so eine Stabilitätsbewertung des aktuellen Netzzustands. Des Weiteren entwickelt das Fraunhofer EMI ein Netzwerkmodell, das mithilfe des hauseigenen Softwaretools CaESAR die Konsequenzen eines Stromausfalls für kritische, untereinander abhängige, Infrastrukturen abbildet.

Neue Impulse für 2024

Im November 2023 wurde auf Basis der bisherigen Ergebnisse von RESIST zu einem Workshop am EMI mit den Schwerpunkthemen »Resilienz in der Netzplanung« und »Perspektiven für Verteilnetzinseln« eingeladen. Die bisherigen entwickelten Lösungen stießen bei den eingeladenen Stakeholdern, von Netzbetreibern bis hin zum Katastrophenschutz, auf großes Interesse. Darüber hinaus ergaben sich aus dem Austausch neue Impulse für das Jahr 2024. Beim resilienten Umbau des Stromnetzes warten also noch viele Herausforderungen auf innovative Lösungen.

Projekt »RESIST«

Prof. Dr. Alexander Stolz,
alexander.stolz@emi.fraunhofer.de

Nachhaltige und resiliente Logistik: SARIL Kick-Off

Das EU-geförderte Projekt SARIL (Sustainability And Resilience for Infrastructure and Logistics networks) soll eine Entscheidungsunterstützung für resiliente und nachhaltige Logistik bieten. Zudem entwickelt SARIL Empfehlungen für den Umgang mit Störungen sowie für grüne Geschäftsmodelle für Logistikunternehmen und Behörden.

Das Projekt wird vom EMI geleitet und von einem internationalen Team aus Wissenschaftlern und Industriepartnern seit Juni 2023 mit einer Laufzeit von 3 Jahren bearbeitet.

Resiliente Logistik gewährleistet, dass Waren und Rohstoffe auch bei disruptiven Ereignissen wie Naturkatastrophen, Lieferengpässen oder politischen Krisen zuverlässig transportiert und verteilt werden.

Das Fraunhofer EMi ist stolz, seine Kompetenz im Bereich Resilienz direkt vor Ort in Freiburg einzubringen.

Freiburg RESIST

Das Projekt FreiburgRESIST ist eines der fünf Gewinnerprojekte im Wettbewerb »SifoLIFE – Demonstration innovativer, vernetzter Sicherheitslösungen« des BMBF. Ziel des Verbundprojekts ist ein dynamisches, vernetztes Resilienz-Managementsystem. Damit soll die Planung von Großveranstaltungen, die Evakuierung in Krisenlagen und die Kommunikation der Einsatzkräfte verbessert werden.

Das Fraunhofer EMI beteiligt sich als Entwicklungspartner mit den Themen Personendichtemonitoring und Prognose sowie Hör- und Sichtbarkeitsanalysen.

Geschäftsfeld Sicherheit & Resilienz
Daniel Hiller, daniel.hiller@emi.fraunhofer.de
→ emi.fraunhofer.de/sicherheit

Fotos: Fraunhofer EMI (using Midjourney) (2), Patrick Seeger / Stadt Freiburg, Fraunhofer EMI

Geschäftsfeld Automotive

Die Verkehrssicherheit von morgen heute auf den Weg bringen

Um den Verkehr der Zukunft sicher zu gestalten, sind innovative Technologien von zentraler Bedeutung: Intelligente Infrastrukturen, miteinander kommunizierende Autos und Assistenzsysteme, die Fahrfehler korrigieren, Schutz verletzlicher Verkehrsteilnehmer und die Sicherheit batterieelektrischer Fahrzeuge.

Im Bild: Projekt Attention. KI-optimiertes Fahrzeugverhalten beim Zusammenstoß

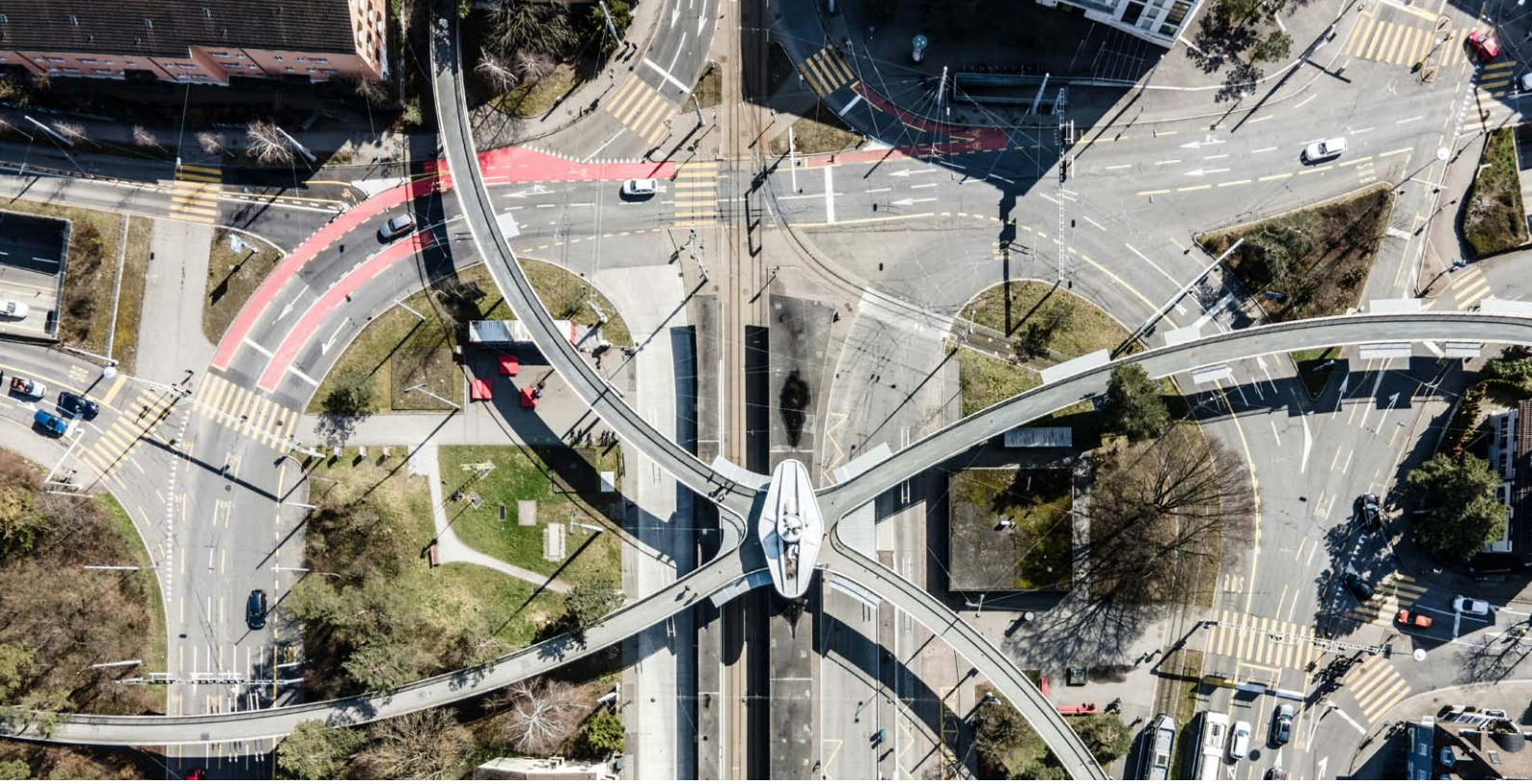
Foto: Fraunhofer EMI

Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer

Das Mobilitätssystem steht vor vielschichtigen Herausforderungen: In Zukunft soll es nicht nur CO_2-neutral und bedarfsorientiert sein. Menschen aus allen Bevölkerungsgruppen sollen sich sicher und sorglos fortbewegen können, egal ob mit dem Fahrrad, dem Auto oder zu Fuß. Von der sogenannten »Vision Zero« – keine Verkehrstoten – sind wir leider im Moment noch weit entfernt.

Die am Fraunhofer EMI entwickelten Konzepte sollen helfen, die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmenden zu erhöhen.

Von **Dr. Jens Fritsch**



Zunehmende Komplexität: Das Fraunhofer EMI entwickelt Konzepte, um den Verkehr der Zukunft sicher und ressourceneffizient zu gestalten. Luftbild vom Bucheggplatz in Zürich.

Der Straßenverkehr wird sich in den kommenden Jahren stark verändern. Die zunehmende Automatisierung, die Einführung batterieelektrischer Fahrzeuge und die Diversifizierung und multimodale Ausrichtung des Verkehrs stellen neue Herausforderungen an die Fahrzeug- und Verkehrssicherheit.

Vision Zero

Mobilität ist das Fundament unserer Wirtschaft und Gesellschaft. Sie ist Voraussetzung für funktionierende Märkte und prägt entscheidend Wohlstand und Lebensqualität der Bürgerinnen und Bürger. Mobilität muss nachhaltig sein, das heißt umwelt-, wirtschafts- und sozialverträglich. Vor allem aber muss sie sicher sein. Denn Verkehrsunfälle bedeuten großes Leid für die Betroffenen selbst, aber auch für ihre Familien, Angehörigen und Freunde.

Mit der sogenannten »Vision Zero« wird das ehrgeizige Ziel verfolgt, dass im Jahr 2050 in Europa kein Mensch mehr bei einem Verkehrsunfall ums Leben kommt. Nicht zuletzt durch die aufeinanderfolgenden Verkehrssicherheitsprogramme der Bundesregierung konnte die Verkehrssicherheit in Deutschland in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich verbessert werden. Die Zahl der Verkehrstoten ist seit 1970 um mehr als 75 Prozent zurückgegangen.

Dieser Erfolg ist auf eine Vielzahl von Faktoren zurückzuführen, darunter die Einführung neuer Sicherheitstechnologien in den Fahrzeugen, die Verbesserung der Straßeninfrastruktur und die Sensibilisierung der Verkehrsteilnehmer für die Gefahren im Straßenverkehr. Allerdings partizipieren nicht alle Verkehrsteilnehmenden gleichermaßen an dieser positiven Unfallentwicklung: So stagniert zum Beispiel die Zahl der Schwerverletzten. Zudem steigt derzeit die Zahl der im Straßenverkehr getöteten ungeschützten Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer.

Darüber hinaus wird sich der Straßenverkehr in den kommenden Jahren weiter verändern. Die zunehmende Automatisierung, die Einführung batterieelektrischer Fahrzeuge sowie die Diversifizierung und Multimodalität des Verkehrs stellen neue Herausforderungen an die Fahrzeug- und Verkehrssicherheit.

Verletzliche Verkehrsteilnehmer

Ein wichtiger Forschungsbereich ist die Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger, Roller- und Fahrradfahrer. Hier geht es darum, Lösungen zu finden, um Unfälle zu vermeiden und das Verletzungsrisiko zu minimieren. Geforscht wird an der Entwicklung fortschrittlicher Assistenzsysteme, die die Aufmerksamkeit des Fahrers auf ungeschützte Verkehrsteilnehmer lenken und frühzeitig auf potenzielle Gefahrensituationen hinweisen. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von Kameras, Radarsensoren und künstlicher Intelligenz geschehen.

Fotos: Fraunhofer EMI (using Midjourney), Patrick Federi / unsplash.com

Im Projekt ATTENTION erforscht das EMI gemeinsam mit den Konsortialpartnern eine Methode zur Echtzeit-Verletzungsprognose ungeschützter Verkehrsteilnehmer. Dazu werden datengetriebene Verfahren eingesetzt, um aus fahrzeugbasierten Videodaten und virtuellen Tests mit digitalen Menschmodellen ein situationsspezifisches Verletzungsrisiko zu ermitteln. Perspektivisch ermöglicht die Verletzungsprognose durch risikominimierende Strategien des automatisierten Fahrzeugs einen sowohl sicheren als auch effizienten Verkehr.

Wesentliche Ergebnisse des Projekts sind unter anderem der Aufbau einer Positions- und Bewegungsdatenbank für Fußgänger und Radfahrer. Dabei werden Daten der Bosch-Unfallforschung analysiert und als Grundlage für eine biomechanische und KI-basierte Bewegungsprädiktion genutzt. Finite-Elemente-Crashsimulationen liefern dann potenzielle Verletzungsmuster, die mit realen Unfalldaten verglichen und in einer weiteren Kollisions- und Verletzungsdatenbank abgelegt werden.

Die Ergebnisse der Crashsimulationen dienen als Trainingsdaten und bilden die Grundlage für die KI-basierte Prognose von situationsspezifischen Verletzungswerten, aus denen ein Verletzungsrisikoindex abgeleitet wird. Auf Basis des Verletzungsrisikoindex werden weitere Maßnahmen, wie z. B. eine Änderung des Fahrverhaltens, abgeleitet. Die Umsetzung erfolgt in einem virtuellen Demonstrator.

Autonome Fahrfunktionen

Autonome Fahrzeuge haben das Potenzial, den Straßenverkehr sicherer zu machen, indem menschliche Fehler reduziert werden. Um eine sichere Integration autonomer Fahrzeuge in den Straßenverkehr zu gewährleisten, sind allerdings noch zahlreiche technische und rechtliche Herausforderungen zu bewältigen. Die Forschung zielt hier unter anderem darauf ab, die Zuverlässigkeit und Sicherheit autonomer Fahrfunktionen zu verbessern.

Das EMI beschäftigt sich gemeinsam mit seinen Konsortialpartnern im Forschungsprojekt KIsSME mit der Frage, welche Verkehrssituationen für die Absicherung autonomer Fahrfunktionen relevant sind. Für die Erprobung und Absicherung hochautomatisierter Fahrzeuge werden große Datenmengen benötigt, die insbesondere das Unfallgeschehen und kritische Situationen abdecken müssen.

Durch die Aufzeichnung von Verkehrssituationen mit Versuchsfahrzeugen wird ein wichtiger Beitrag generiert. Die dabei anfallenden Datenmengen sind jedoch so groß, dass schnell Kapazitätsgrenzen erreicht werden. Die Entwicklung von Selektionsalgorithmen, die eine gezielte Aufzeichnung relevanter Fahrsituationen direkt im Aufzeichnungsfahrzeug ermöglichen, ist das Hauptziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts KIsSME. Das EMI hat in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ein Bewertungssystem entwickelt, das die Kritikalität aus den Bewegungsdaten der Fahrzeuge abschätzt. Eine vordefinierte Auswahl von Metriken, die zunächst durch Skalierungsmethoden in Einzelkritikalitäten transformiert werden, ist der wichtigste Ausgangspunkt für das System. Anschließend können diese zu einer Gesamtkritikalität zusammengefasst werden. Sowohl zur Identifikation kritischer Situationen in vorhandenen Datensätzen als auch zur Auslösung eines im Projekt geforderten Triggers zur Datenspeicherung kann das Bewertungssystem verwendet werden.

Elektromobilität

Elektromobilität ist eine entscheidende Schlüsselkomponente für eine nachhaltige individuelle Mobilität der Zukunft. Ein wesentliches Kernelement aller Elektro- und Hybridfahrzeuge ist die Speicherung elektrischer Energie in Hochvoltbatterien. Von ihrer Integrität hängt es ab, ob es bei einem Unfall zu einem mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbaren Schaden, zu einem Fahrzeugbrand oder gar zu einer Explosion kommt. Letzteres ist die Folge einer Überhitzung (thermisches Durchgehen) der Batterie, die beispielsweise durch einen Kurzschluss oder die Zerstörung der inneren Zellstruktur hervorgerufen werden kann. Zur

Foto: Fraunhofer EMI (using Midjourney)

Welche Verkehrssituationen sind relevant, um autonome Fahrfunktionen abzusichern? Große Datenmengen werden benötigt, die insbesondere das Unfallgeschehen und kritische Situationen abdecken müssen.

Beurteilung der Crashsicherheit ist es daher notwendig, mögliche Zelldeformationen besser zu verstehen und in Bezug auf das Auftreten eines Kurzschlusses zu bewerten.

Am EMI wurde zu diesem Zweck eine neue Methode zur röntgendiagnostischen Untersuchung des Versagens von Lithium-Ionen-Zellen unter extremen Bedingungen etabliert. Für die Analyse von Batterieausfällen stellt diese Technologie einen wichtigen Meilenstein dar, da sie optisch nicht zugängliche Vorgänge im Zellinneren sichtbar macht.

Dazu wird eine Röntgendiagnostikröhre eingesetzt, die Videoaufzeichnungen von bis zu fünf Sekunden Dauer und Bildraten von bis zu 2000 Bildern pro Sekunde ermöglicht. Zur Untersuchung von Penetrationsvorgängen, wie sie bei einem Fahrzeugcrash auftreten können, wurde eine Vorrichtung aufgebaut, mit der Zellen unterschiedlicher Formate durch Einstechen beschädigt und so zum Versagen gebracht werden können. Videoaufzeichnungen eines solchen Versuchs erlauben Beobachtungen zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Penetration und ermöglichen so ein vertieftes Verständnis der zellinternen Vorgänge.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten, die darauf abzielen, den Straßenverkehr für alle Beteiligten sicherer zu machen. Die Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer, die Absicherung autonomer Fahrfunktionen und die Sicherheit von Fahrzeugbatterien spielen dabei eine wichtige Rolle. Ein sicheres Verkehrsumfeld für alle können wir nur durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung schaffen.

Aktuelle Forschung dazu am Fraunhofer EMI

ATTENTION
Artificial Intelligence for real-time injury prediction; öffentlich gefördertes Projekt durch BMWK

KIsSME
Gezielte Aufnahme von relevanten Daten für die Weiterentwicklung und Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen; öffentlich gefördertes Projekt durch BMWK

X-Ray Car Crash
Internes Forschungsprojekt zur Entwicklung eines neuartigen Mess- und Auswerteverfahrens, das unter Einsatz von Röntgendiagnostik die Beobachtung des dynamischen Verhaltens verborgener Fahrzeugstrukturen unter Crashbelastung ermöglicht

AVEAS
Absicherungsrelevante Verkehrssituationen erheben, analysieren, simulieren; öffentlich gefördertes Projekt durch BMWK

Der transparente Crash

Gemeinsam mit Mercedes-Benz hat das Fraunhofer EMI den weltweit ersten Röntgencrash durchgeführt – mit 1000 Röntgenbildern pro Sekunde.

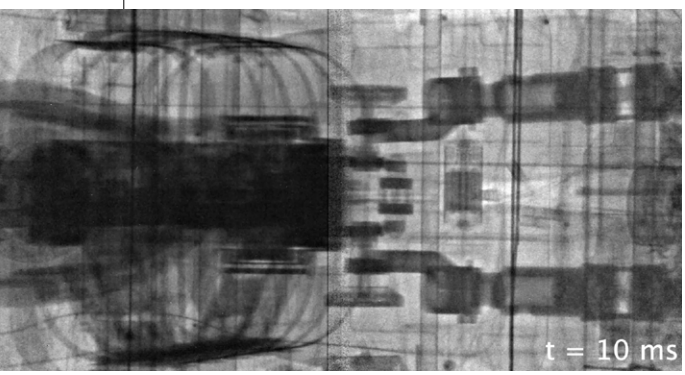
Was genau passiert beim Crash? Wann faltet die crash-absorbierende Struktur? Kommt es zur Interaktion von A-Säule und Insassendummy? Wie tief dringt der Dummykopf in den Airbag ein und wie nahe kommt er dabei den harten Strukturen?

In einem Crashtest sollen diese wichtigen Fragen über den Einsatz einer Vielzahl von Sensoren und Hochgeschwindigkeitskameras beantwortet werden. Eine völlig neuartige Technologie kommt jetzt hinzu, die bisher unsichtbare Verformungen und ihre exakten Abläufe hochauflösend sichtbar machen kann: Zusammen mit Mercedes-Benz hat das Fraunhofer EMI den weltweit ersten Röntgencrash mit einem Pkw durchgeführt. Dazu nutzt das Fraunhofer EMI einen Linearbeschleuniger als Röntgenquelle und kombiniert ihn mit einem Hochgeschwindigkeitsdetektor. So werden mit einer hohen zeitlichen Auflösung von 1000 Bildern pro Sekunde und hohen Röntgenenergien von bis zu 7,9 Millionen Elektronenvolt die relevanten Bereiche innerhalb eines Fahrzeugs sichtbar.

Um die Forschenden und die Umwelt vor dieser Strahlung zu schützen, mussten umfangreiche Strahlenschutz-Baumaßnahmen an der Crashhalle des Fraunhofer EMI durchgeführt werden. Zusätzlich zu den physikalischen Abschirmungen wurde ein komplexes, technisches Sicherheitskonzept entwickelt und implementiert, das den Strahlenschutz auf der einen Seite und die nötige Flexibilität für einen Forschungsbetrieb auf der anderen Seite bestmöglich vereint.

Der Test im Detail

Der erste Röntgencrash war ein Seitenaufprall mit einer MPD-Barriere. Dabei traf die Barriere eine C-Klasse-Limousine mit 60 km/h senkrecht von der Seite. Im Innenraum auf dem Fahrersitz saß ein weiblicher, für den Seitenaufprall optimierter Dummy. Im Dummy, im Fahrzeug und in der Crashhalle zeichnen Dutzende von Messkanälen Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Hochgeschwindigkeitsvideos auf. Die Röntgencrash-Technologie beobachtete dabei den Bereich des Dummys auf dem Fahrersitz. Unterhalb des Fahrzeugs befand sich ein 40 cm x 80 cm großer Röntgendetektor, der zusammen mit dem Fraunhofer EZRT entwickelt wurde. Unter der Hallendecke war der mehr als 2 Tonnen schwere Linearbeschleuniger positioniert. Von Gegengewichten gehalten, schwebte der Linearbeschleuniger auf einem lineargeführten XY-Tisch. Dies gewährleistet einen



0,1 Sekunden dauert der Aufprall beim Crash.
In dieser Zeit erzeugt die am Fraunhofer EMI entwickelte Technologie ein Video mit 100 Röntgenbildern. Die Bilder geben Auskunft über verborgene Vorgänge beim Crash.

maximalen Freiraum für den Crash unterhalb der Röntgenquelle und gleichzeitig eine hochgenaue Positionierung des Brennflecks.
Synchron zur konventionellen Messtechnik wurden 1000 Röntgenbilder pro Sekunde während des Crashversuchs aufgenommen.
Die auf langjähriger Forschung beruhende Auslegung des Röntgenexperiments ermöglichte eine präzise geplante Ansicht der inneren Dynamik des Crashtests, wie sie zuvor noch nie sichtbar gemacht wurde. Kurz nach dem Impakt ist die beginnende Deformation der Seite des Fahrzeugs zu erkennen. Die auslösenden Airbags verhindern für konventionelle Kameras eine detaillierte Sicht auf das Geschehen im Innenraum.

Vertiefte Einblicke durch Röntgen

Im Röntgenbild allerdings sieht man die vom schützenden Airbag hervorgerufene Bewegung des linken Arms des Dummys. Während des weiteren Verlaufs des Versuchs wird die zunehmende Belastung des Dummys im Torso sichtbar, bevor die Schutzstrukturen des Fahrzeugs den Impakt letztendlich abfangen und den überlebenswichtigen Schutzraum sichern.
Diese nun zugänglichen Informationen ermöglichen ein tieferes Verständnis über die komplexe Interaktion des Dummys mit den Rückhaltesystemen und erlauben eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Sicherheitstechnologien im Fahrzeug.

Weltweit erste Durchleuchtung eines Gesamtfahrzeugcrashs mit 1000 Bildern pro Sekunde.

Fotos: Mercedes-Benz Group AG (2)

Sicherheit autonomer Fahrzeuge durch Daten optimieren

Das Projekt KIsSME zeigt, wie innovative Algorithmen aus riesigen Datenbergen genau die kritischen Verkehrsmomente herausfiltern, die Forschung und Technologie voranbringen und gleichzeitig Ressourcen schonen.

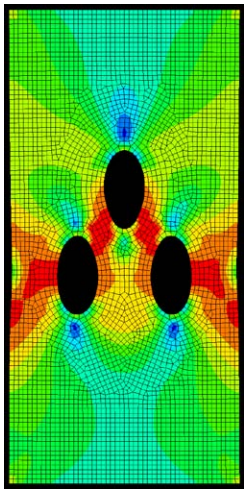
Ziel des Projektes KIsSME war die Entwicklung von Algorithmen zur effizienten Datenerfassung in Versuchsfahrzeugen. Dazu hat sich das Fraunhofer EMI mit der Frage beschäftigt, wie sicherheitsrelevante Situationen aus den Sensordaten eines Fahrzeugs identifiziert werden können. Als Kernbaustein wurde ein modulares Bewertungsframework entwickelt, das die Berechnung einer Gesamtkritikalität für die jeweilige Fahrsituation ermöglicht. Eingangsgrößen sind Bewertungsmaße (Metriken), die sich aus der Fahrdynamik einzelner Verkehrsteilnehmer und der Relativbewegung mehrerer Verkehrsteilnehmer zueinander ableiten lassen.

Für alle Metriken werden sicherheitskritische Wertebereiche identifiziert und darauf aufbauend Skalierungen vorgenommen, um dimensionslose und damit vergleichbare Größen zu erhalten. Die Kombination der skalierten Metriken führt schließlich zur gewünschten Gesamtkritikalität. Wesentliche Vorteile des Systems gegenüber bisherigen Ansätzen zur Kritikalitätsbewertung liegen zum einen in der Modularität des Systems bei der Auswahl der Metriken und zum anderen in der Bewertbarkeit sehr komplexer Fahrszenarien durch die Berechnung eines akkumulierten Kritikalitätswertes. Darüber hinaus hat das EMI eine KI-Methode zur Generierung neuer Szenarien und zur Vorhersage von Fahrzeugtrajektorien implementiert. Diese Vorhersagen können wiederum zur Berechnung detaillierterer Metriken für die Kritikalitätsbewertung verwendet werden. Das Projekt KIsSME wurde 2023 abgeschlossen. Die Mitarbeiter des EMI konzentrieren sich nun darauf, die gewonnenen Erkenntnisse in Folgeprojekten anzuwenden. So werden im Projekt AVEAS Methoden zur datenbasierten Optimierung von Verkehrssimulationen untersucht, wobei die Identifikation und Nachbildung sicherheitskritischer Situationen eine wesentliche Rolle spielt.

Projekt »KIsSME«

mirjam.fehling-kaschek@emi.fraunhofer.de

Neuartige Materialmodelle mit künstlicher Intelligenz



Durch den Einsatz von maschinellem Lernen entstehen neue Materialmodelle, mit denen Strukturen sicherer und nachhaltiger ausgelegt werden können.

Während der vergangenen drei Jahre war das EMI am Forschungsprojekt »AIMM« (Artificial Intelligence for Material Models) beteiligt. Gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung wurde an der Entwicklung neuartiger Materialmodelle gearbeitet.

Neuartige Materialmodelle aus Versuchsdaten

Ein Materialmodell beschreibt vereinfacht gesagt das Verhalten eines Werkstoffs bei mechanischer Belastung, indem es zu einer gegebenen Dehnung die Spannung im Werkstoff liefert. Klassische Modelle basieren auf einer analytischen Beschreibung und werden anhand von aus Versuchen abgeleiteten Parametern kalibriert. Im Gegensatz dazu erlernen die neuartigen Modelle das Materialverhalten mit Methoden des maschinellen Lernens (ML) direkt aus Versuchsdaten. Dadurch soll die Modellierung des Materialverhaltens vereinfacht werden, was zu verkürzten Entwicklungszeiten und geringeren Kosten bei der Fahrzeugentwicklung beiträgt.

Optimierte Probenkörper

Diese neue Herangehensweise bei der Modellierung erfordert ebenfalls neue Konzepte bei der Materialcharakterisierung. Klassische Versuche zielen darauf ab, möglichst genau definierte Belastungszustände in Probekörpern zu erzeugen, aus denen die Parameter für die Modelle bestimmt werden können. Im Gegensatz dazu benötigen die neuartigen ML-Modelle eine Vielzahl unterschiedlicher Zustände in einem Probekörper, um eine ausreichende Datenbasis für das Training vorzufinden. Am EMI wurden daher optimierte Probekörper entwickelt, die für die experimentelle Ermittlung von Trainingsdaten genutzt werden können.

Prognostizierte Spannungen kommunizieren

Ein Problem, das sich beim Training mit Versuchsdaten ergibt, ist die Tatsache, dass mechanische Spannungen nicht direkt in Versuchen messbar sind. Um die ML-Modelle trainieren zu können, muss ihnen jedoch mitgeteilt werden, ob ihre prognostizierte Spannung richtig oder falsch ist. Gemeinsam mit den Projektpartnern hat das EMI eine Methode erarbeitet, mit der der Trainingsprozess trotz fehlender Spannungen durchgeführt werden kann. Diese basiert darauf, dass in jedem Punkt eines Probekörpers zu jeder Zeit ein Kraftgleichgewicht vorliegt, welches bei einer falschen Prognose des Materialmodells verletzt wäre.

Im Rahmen von AIMM konnten wichtige Fortschritte im Bereich der ML-Materialmodelle erzielt werden, die deren zukünftige Nutzung vorantreiben.

Projekt »AIMM«

Thomas Haase, thomas.haase@emi.fraunhofer.de

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Fotos: Ziyan Yang / stock.adobe.com, Fraunhofer EMI, Fraunhofer EMI (using Midjourney)

DigiTain-Gesamttreffen: Fahrzeuge nachhaltig entwickeln

Das Forschungsprojekt DigiTain – Digitalization for Sustainability – befasst sich mit Fragen zur volldigitalen Produktentwicklung nachhaltiger Elektroantriebsarchitekturen. Seit Anfang 2023 arbeiten 26 geförderte und 2 assoziierte Partner aus Industrie und Wissenschaft an neuen Methoden zur entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung.

Das Fraunhofer EMI entwickelt in verschiedenen Arbeitspaketen innovative Lösungsansätze:

- Sichere Auslegung und Integration von Batteriespeichern
- Neue Recycling-Methoden für CFK-Wasserstofftanks
- Neuartige Crashversuche für Batteriezellen
- Automatisierung der Ökobilanzierung
- Neue experimentelle Validierungsverfahren

Treffen des Konsortiums am Fraunhofer EMI
Am 18. Januar 2024 trafen sich rund 90 Mitglieder des Konsortiums. Ziel des Projekts: Ökologisch und wirtschaftlich nachhaltige Kriterien in die frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung integrieren.

Thermisches Durchgehen von Pouch-Zellen
Experimentelle Untersuchung zur Wirkung auf Kunststoffstrukturen.

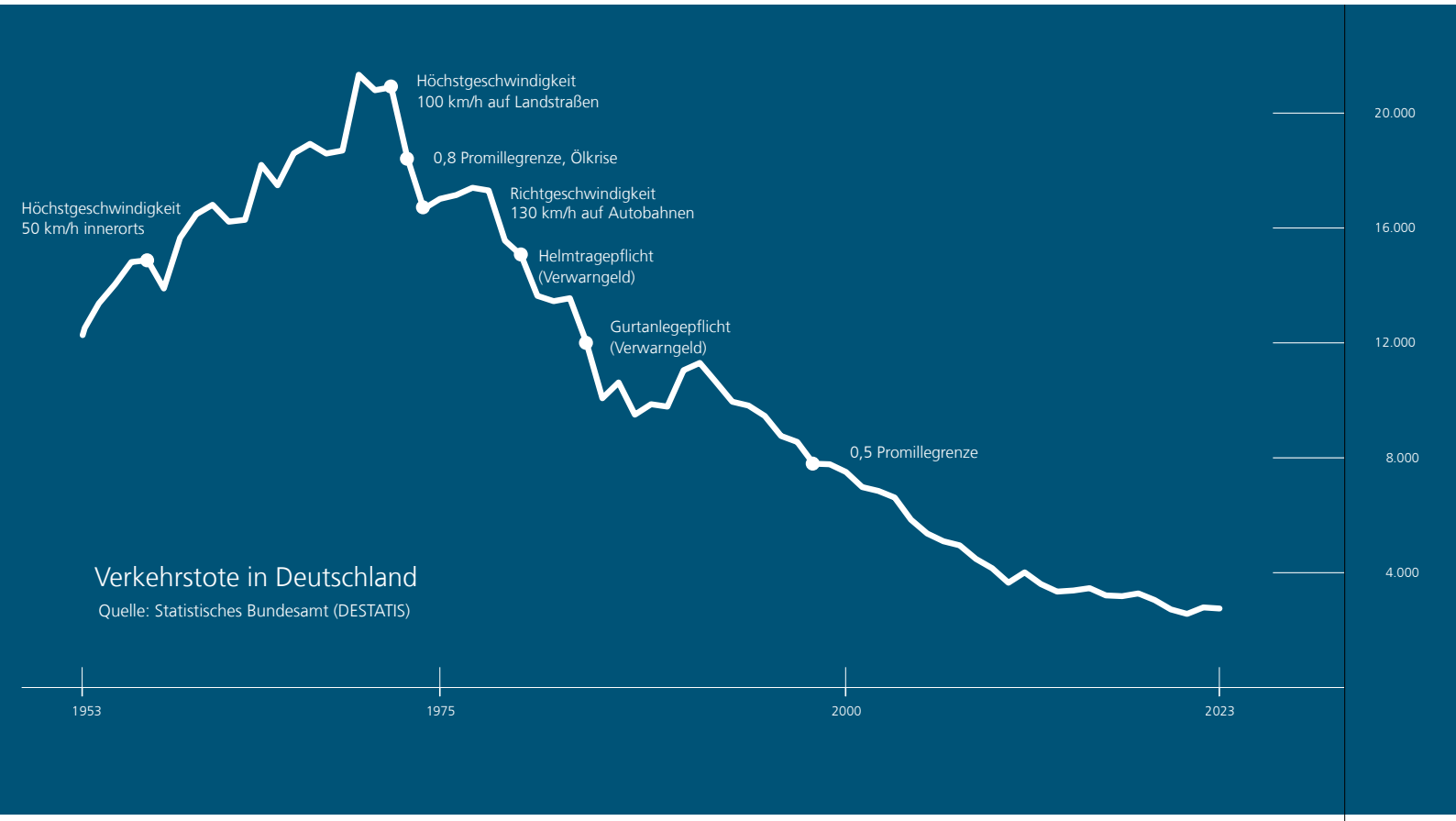
Sichere Batteriegehäuse aus Kunststoff

Methodenentwicklung zur virtuellen Auslegung gegen Folgen des thermischen Durchgehens

Der experimentelle Nachweis der Sicherheit von Batteriegehäusen ist zeit- und kostenintensiv. Das Fraunhofer EMI entwickelt daher mit den Projektpartnern Kautex Textron GmbH & Co. KG und Farasis Energy Europe GmbH Simulationsmethoden zur virtuellen Gehäuseauslegung (Projekt SiKuBa).

Wesentliche Grundlage für diese Simulationsmethoden sind hochinstrumentierte Batterieversuche. Bei diesen Versuchen wird das thermische Durchgehen im Labor gezielt herbeigeführt.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.



Verkehrstote in Deutschland

Quelle: Statistisches Bundesamt (DESTATIS)

Vision Zero

Ziel: bis 2050 keine Verkehrstoten mehr in Europa

Der Begriff Vision Zero wurde ursprünglich im Bereich der Arbeitssicherheit entwickelt. Er besagt, dass am Arbeitsplatz keine Mitarbeiter aufgrund mangelnder Sicherheitsvorkehrungen verletzt oder getötet werden dürfen. Das Prinzip wurde 1997 in Form der Road Traffic Safety Bill vom schwedischen Parlament eingeführt, um die Verkehrssicherheit in Schweden zu verbessern.

Im Jahr 2017 hat die EU-Kommission die Vision Zero als Paradigmenwechsel und Handlungskonzept für den europäischen Straßenverkehr formuliert. Das Ziel ist es, bis 2050 keine Verkehrstoten mehr in Europa zu haben. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich, wie auch andere EU-Mitgliedstaaten, dazu verpflichtet, dieses Ziel zu erreichen.

Geschäftsfeld Automotive
Dr. Michael Dlugosch,
michael.dlugosch@emi.fraunhofer.de
→ emi.fraunhofer.de/automotive

Fotos: Fraunhofer EMI (3), Statistisches Bundesamt (DESTATIS)

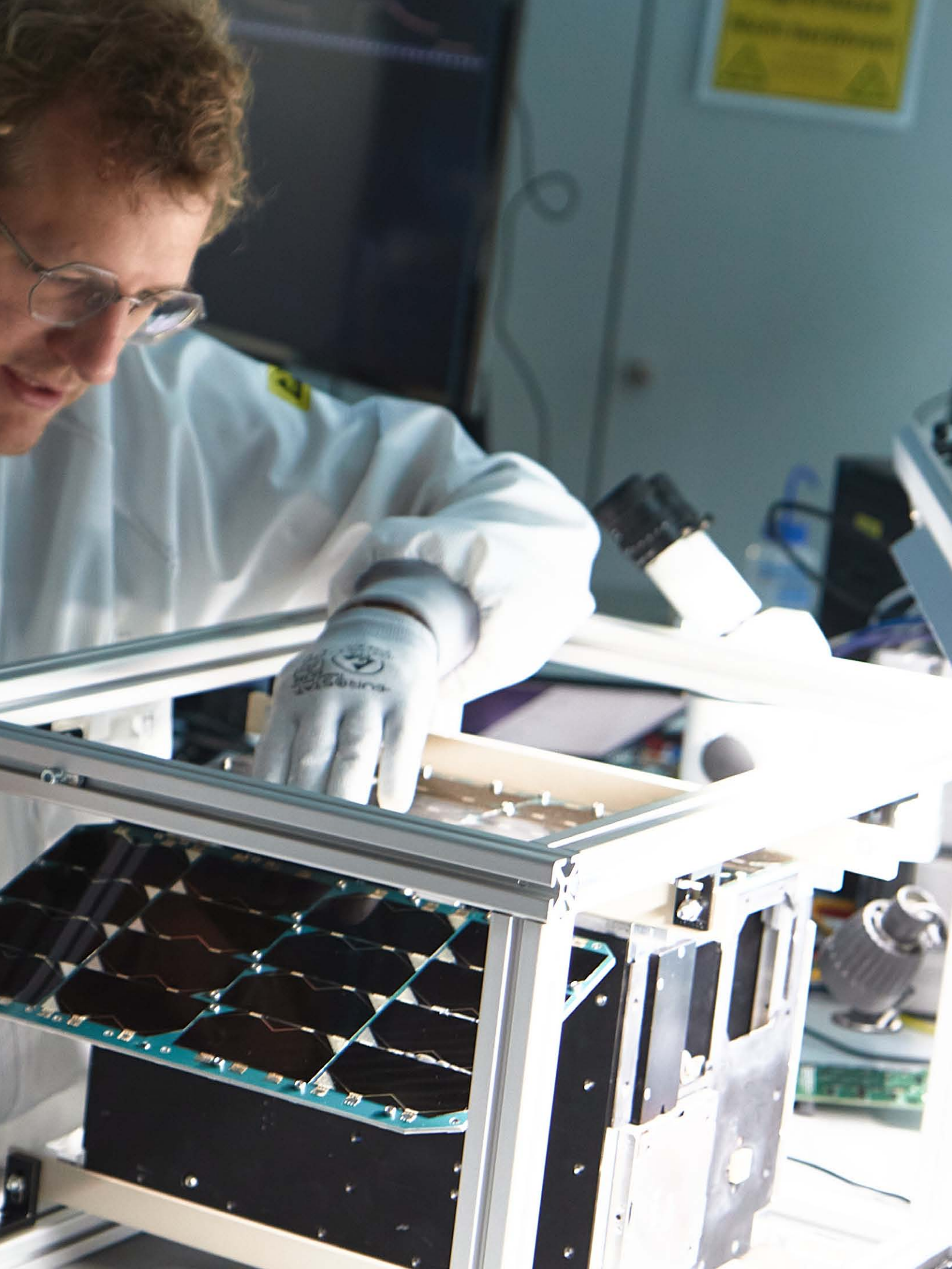
Geschäftsfeld Raumfahrt

Kleine Satelliten – große Leistung

Die »Zwerge« unter den Satelliten leisten Großes: sie erkennen Waldbrände, detektieren Treibhausgase, sehen Wolken, messen Meerestemperaturen, erkennen Fahrzeuge ... und noch viel mehr. Wie Forschung dazu beiträgt, auch wirtschaftlich ein Erfolgsmodell daraus zu machen, erfahren Sie auf den nächsten Seiten.

Im Bild: Kleinsatellit ERNST wird für den Thermal-Vakuum-Test vorbereitet, den wichtigsten Umwelttest zur Simulation des Flugs eines Satelliten in einer erdnahen Umlaufbahn.

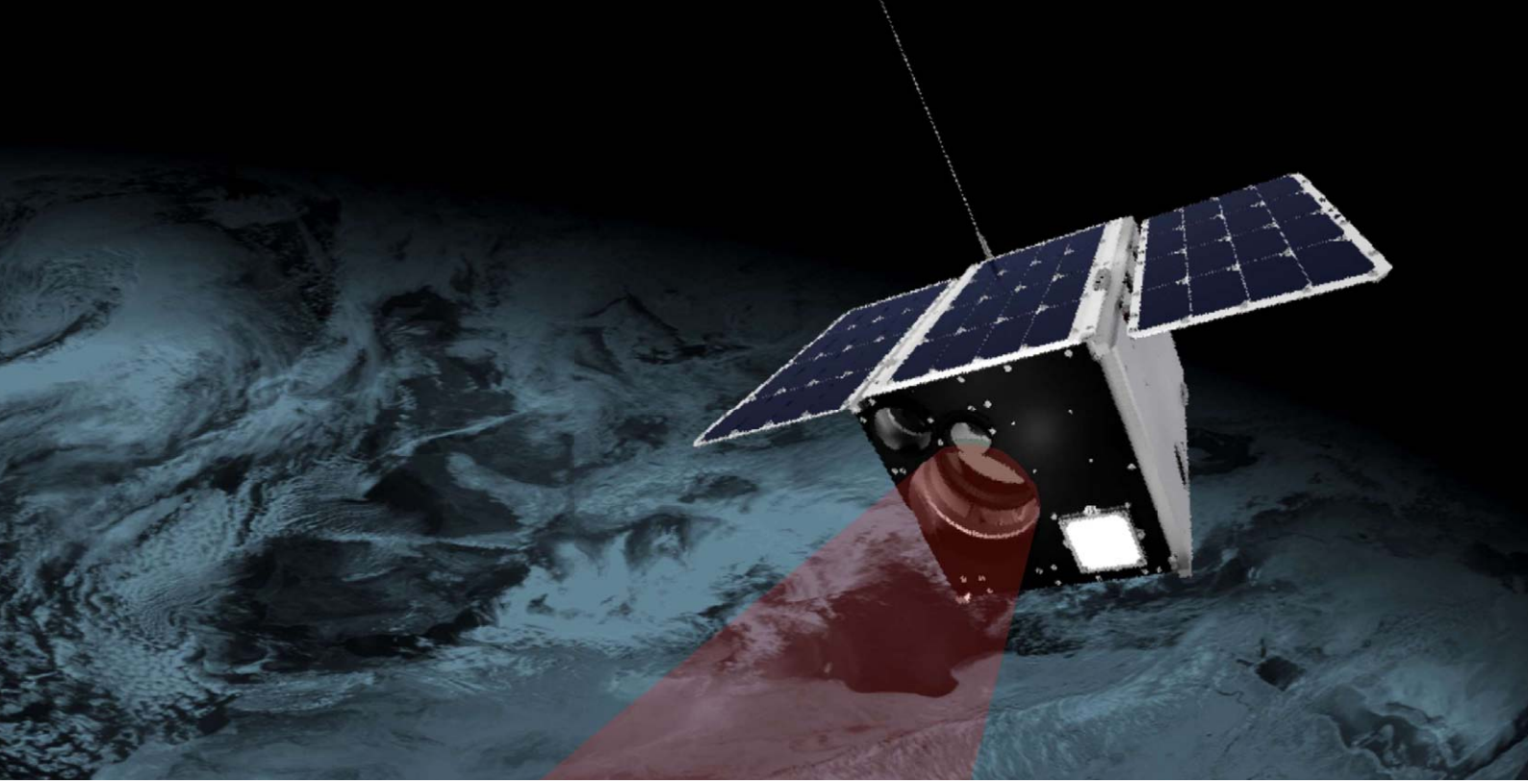
Foto: Fraunhofer EMI



Innovationsmotor Raumfahrt: Schlüsseltechnologie Kleinsatelliten

Der Weltraum wird zunehmend kommerziell genutzt. Das zeigt sich anhand der stark steigenden Zahl der Satelliten in erdnahen Umlaufbahnen. Mit den Satellitenkonstellationen im Aufbau entsteht eine neue Infrastruktur im Weltraum. Durch Satellitentechnologie werden neue Anwendungen in Wirtschaft, Staat und Gesellschaft ermöglicht. Kleinsatelliten sind der Schlüssel dazu.

Von **Prof. Dr. Frank Schäfer**



Kleinsatelliten sind der Schlüssel zu neuen Anwendungen in Wirtschaft, Staat und Gesellschaft. In der Abbildung ist der 12U Cubesat ERNST des Fraunhofer EMI dargestellt.

NewSpace: Kommerzialisierung des Weltraums

Die zunehmende Kommerzialisierung des Weltraums, die unter dem Begriff des NewSpace zusammengefasst wird, lässt sich eindrucksvoll anhand der steigenden Anzahl von Satellitenstarts darstellen. 2019 wurden laut United Nations Office for Outer Space Affairs 586 Satelliten in eine Erdumlaufbahn verbracht, während diese Zahl in nur 4 Jahren auf 2664 Satelliten anstieg. Das entspricht einer mittleren jährlichen Zunahme von 46 %. Bemerkenswert dabei ist, dass von Beginn der Raumfahrt bis 2016 nie mehr als 250 Satelliten in einem Jahr gestartet wurden. Von den im Jahr 2023 gestarteten Satelliten gehörten 1935 zur Starlink-Konstellation des US-Unternehmens SpaceX, das entspricht rund 73 % aller gestarteter Satelliten. Rund 80 % aller Satelliten wurden von den USA gestartet. Zum Vergleich: Deutschland hat 5 Satelliten in 2023 gestartet. Im gleichen Zeitraum (2019 – 2023) stieg die Zahl der weltweit durchgeführten Starts von Trägerraketen von 102 auf 223 an.

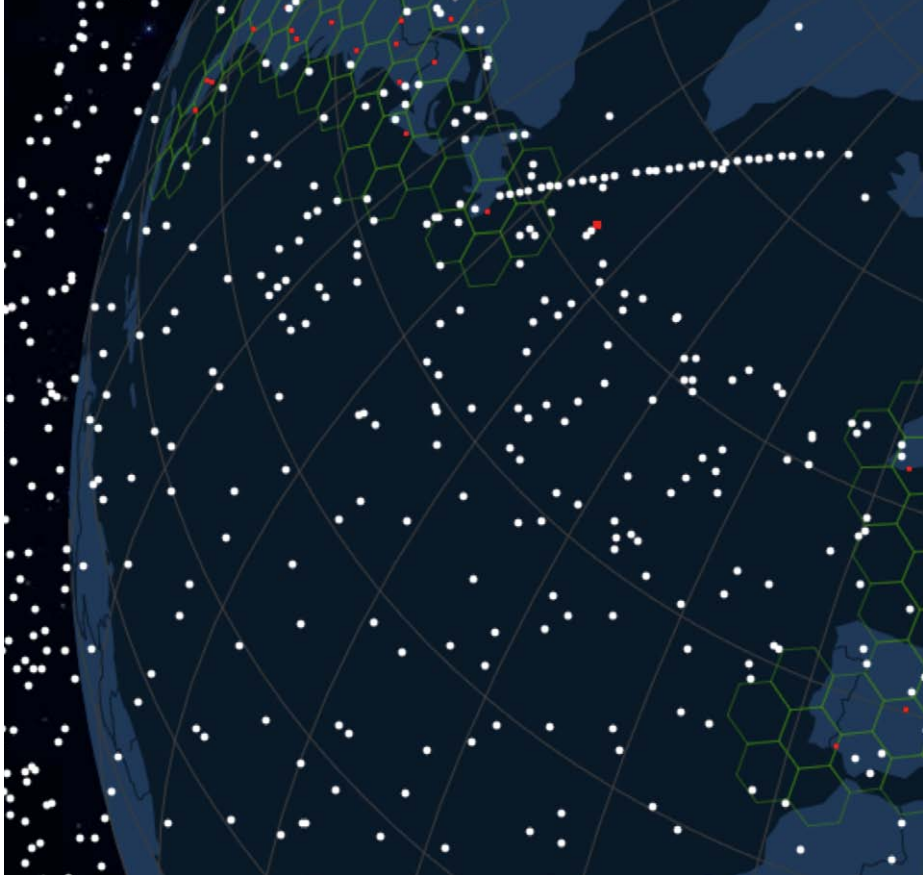
Mit ungefähr 5000 operationellen Satelliten in erdnahen Umlaufbahnen, Stand April 2024, dominiert Starlink aktuell den Markt für schnelles Internet aus dem Weltraum. Das wirtschaftliche Potenzial allein im Bereich der Telekommunikations-Anwendungen ist enorm, wie ein aktueller Bericht des World Economic Forum von 2024 belegt: mit jährlichen Wachstumsraten von prognostizierten 4 % speziell im Bereich des Breitband-Internets, des IoT, der Ergänzung terrestrischen Mobilfunks und der Direct-to-Device (D2D)-Kommunikation drängen weitere kommerzielle Player wie Oneweb, Amazon Kuiper und Rivada auf den Markt.

Satellitenkonstellationen: Rückgrat der neu entstehenden Infrastruktur im Weltraum

Satellitenkonstellationen können aus Hunderten oder Tausenden von Satelliten bestehen. Sie stellen den zentralen Pfeiler einer neuen weltraumgestützten Infrastruktur dar, die eine globale Abdeckung bieten bei schneller Verfügbarkeit von Daten, das heißt geringen Latenzzeiten. Aktuell wird die Entwicklung von Konstellationen insbesondere durch die steigende Nachfrage nach schnellem Internet und digitalen Netzwerken, Echtzeit-Erdbeobachtungsdaten und präziser Navigation vorangetrieben. Konstellationen von Satelliten sind aber auch unabdingbar für die Erforschung des Erdsystems und für ein besseres Verständnis des Klimawandels.

Durch die zunehmende Verzahnung zwischen NewSpace-Unternehmen mit der Non-Space-Wirtschaft entstehen auf der Basis der neuen Weltrauminfrastruktur neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle in vielen Sektoren, beispielsweise Telekommunikation, Landwirtschaft, Mobilität und Logistik, Katastrophenmanagement, urbane Entwicklung, zivile Sicherheit und Verteidigung. Der Aufbau von Satellitenkonstellationen ist die Voraussetzung für die Entstehung dieser Märkte und nimmt damit eine

Fotos: Fraunhofer EMI (using Midjourney), Fraunhofer EMI



Verteilung der Starlink-Satelliten auf der oberen Erdhalbkugel im März 2023. Mit einer Masse von ca. 300 kg zählen die Starlink-Satelliten der ersten Generation zur Klasse der Kleinsatelliten.

Schlüsselrolle für Wirtschaft, einen souveränen Staat und die Gesellschaft ein.

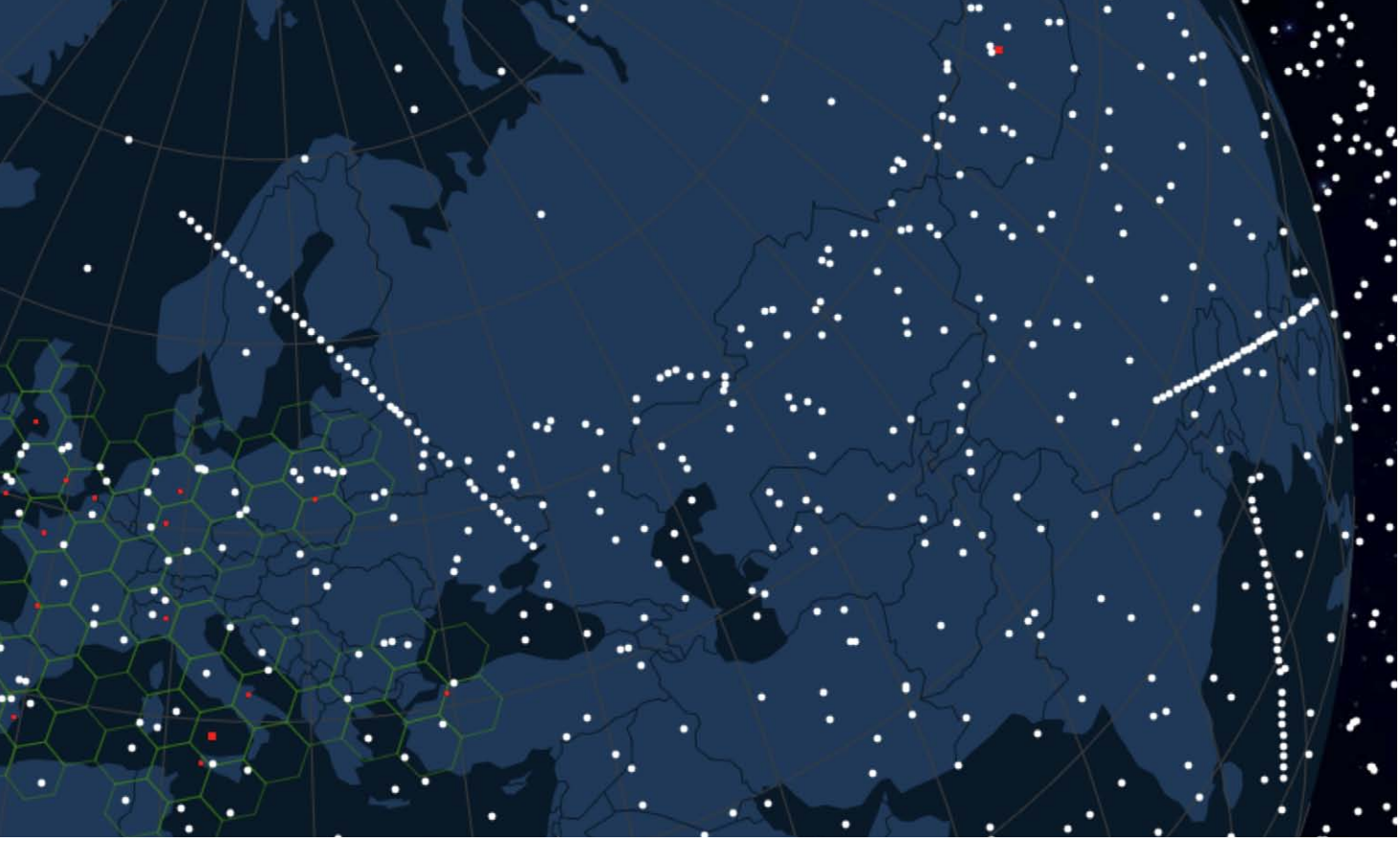
Der kommerzielle Markt für die Technologie der Satellitenkonstellationen und den dadurch ermöglichten Dienstleistungen wird allerdings momentan von wenigen wirtschaftlichen Akteuren hauptsächlich aus den USA und China dominiert. Europa und insbesondere Deutschland sind derzeit laut dem Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. unterrepräsentiert in diesem boomenden globalen Markt.

Kleinsatelliten für den Aufbau von Konstellationen: höchste Systemleistungen, minimales Volumen, günstige Fertigung

Kleinsatelliten spielen die entscheidende Rolle im NewSpace für den Aufbau großer Satellitenkonstellationen. Kleinsatelliten haben definitionsgemäß eine Masse von bis zu 500 kg, mit den folgenden Unterklassen: Minisats (100 – 500 kg), Microsats (10 – 100 kg), Nanosats (1 – 10 kg) und Picosats (0,1 – 1 kg). Signifikante technologische Innovationen bei Miniaturisierung, Fertigungsverfahren und Leistungsfähigkeit relevanter Technologien haben die Entwicklung kompakter, autonomer und kostengünstiger Kleinsatellitensysteme gefördert. Kleinsatelliten können hohe Systemleistungen bei minimalem Volumen liefern. Teure Weltraumkomponenten werden – wo immer möglich – durch zuverlässige und leistungsstarke kommerzielle Komponenten (COTS) ersetzt. Die Notwendigkeit zur Minimierung der Kosten wegen der benötigten hohen Stückzahlen ist Triebkraft für neue Produktionsverfahren. Innovationszyklen werden immer kürzer.

Kleinsatelliten sind Innovationstreiber: Zwei Microsats sind zum Mars geflogen, um von dort eine Kommunikationsverbindung zur Erde herzustellen (Mars Cube One). Eine Konstellation von Minisats liefert höchstaufgelöste optische Aufnahmen der Erde mit einer Auflösung von 50 Zentimetern pro Pixel (Skysat). Eine Konstellation von Nanosats verfolgt weltweit Schiffsbewegungen mit AIS und trackt Flugzeuge mit ADS-B (Lemur). Demnächst werden Microsatellites mit Thermalinfrarot-Kameras helfen, den Wasserverbrauch in der Landwirtschaft zu reduzieren (HiVE). Nanosatelliten werden bald demonstrieren, dass weltweit Raketenstarts hochempfindlich detektiert werden können (ERNST). Die Liste lässt sich fortführen.

Der Bedarf an Kleinsatelliten für die nächsten Jahre ist enorm. Eine Marktstudie von Euroconsult von 2023 geht beispielsweise von der Annahme aus, dass im jährlichen Mittel 2610 Kleinsatelliten bis 2032 benötigt werden. Die meisten dieser Kleinsatelliten werden Teil erdnaher Konstellationen im LEO sein und hauptsächlich für kommerzielle Anwendungen im Bereich Erdbeobachtung, Telekommunikation und Navigation zum Einsatz kommen.



Angewandte Forschung als Schlüssel für Innovationen im Bereich der Kleinsatellitentechnologien

Zur Überwindung inhärenter Limitierungen kleiner Satelliten bedarf es der intensiven Forschung und Entwicklung an intelligenten Lösungen für miniaturisierte Satellitenbussysteme, Nutzlasttechnologien und fortgeschrittene Softwarekonzepte.

Aufgrund der interdisziplinären Natur dieser technischen Herausforderungen können relevante Innovationen nur durch die koordinierte Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachrichtungen erreicht werden. Für die Fraunhofer-Gesellschaft mit ihrer breiten thematischen Aufstellung ist das ein spannendes Forschungsfeld. Mit ihrer anwendungsnahen Forschung bietet die Fraunhofer-Gesellschaft für diese Aufgabe nicht nur die ideale Struktur, sondern verfügt mit den zahlreichen Instituten der Fraunhofer Allianz AVIATION & SPACE auch über die notwendige Exzellenz in allen relevanten Fachdisziplinen.

Dazu zählen die verfügbaren modernen Produktentwicklungsmethoden und Fertigungsprozesse, allen voran die additive Fertigung: Sie ermöglicht die zukunftsweisende Herstellung von komplexen und robusten Bauteilen, digital, individuell, schnell und kosteneffizient. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen zudem ressourcensparend und damit nachhaltig zu fertigen, ein Aspekt, der im Bereich der Raumfahrt eine immer wichtigere Rolle spielt. Neben Beschichtungsverfahren zur Steigerung der Robustheit

Satellitenkonstellationen stellen den zentralen Pfeiler einer neuen weltraumgestützten Infrastruktur dar, mit denen sich eine globale Abdeckung bei schneller Verfügbarkeit von Daten realisieren lässt. Die konzeptionelle Abbildung zeigt einen Erdbeobachtungssatelliten und die Bodenspur der fiktiven Kamera.

Fotos: satellitemap.space, Fraunhofer EMI

von Oberflächen, etwa bei Optiken oder Antennen, oder zur magnetischen Schirmung empfindlicher Instrumente ergeben sich im Bereich multifunktionaler Oberflächen ganz neue Möglichkeiten für Raumfahrtsysteme. Beispielsweise kann durch die Integration von Antennen in nichtleitende Strukturelemente die Kompaktheit von Satelliten erhöht werden bei gleichzeitiger Reduzierung der Komplexität des Antennensystems. Außerdem sinken Herstellungskosten. Entfaltbare Strukturen und Nutzlastkomponenten werden benötigt, etwa um hochauflösende und adaptive Optiken auf Kleinsatelliten realisieren zu können.

Fraunhofer bietet Fachwissen und Fertigungsverfahren entlang der gesamten Wertschöpfungskette

Mit den hohen anfallenden Datenmengen in der multi- und hyperspektralen Erdbeobachtung sowie für Kommunikationsanwendungen werden an die Rechenleistung von Datenverarbeitungssystemen immer höhere Anforderungen gestellt. Zu den erfolgversprechendsten Ansätzen zur Überwindung aktueller Grenzen von Kleinsatelliten zählen leistungsfähige Onboard-Datenverarbeitungssysteme, die auf dem Satelliten auch die Anwendung von KI-Methoden erlauben. Damit stehen Anwendungen nahezu in Echtzeit Daten zur Verfügung und Linkkapazitäten können effizient genutzt werden. Die Möglichkeit, Datenverarbeitungssysteme im Flug rekonfigurieren zu können, wird zunehmend unerlässlich, damit zukünftige Anforderungen der Nutzer direkt an Bord des Satelliten umgesetzt werden können.

Für die Einsparung von Entwicklungszeit und zur Qualitätskontrolle in der Serienfertigung ist auch eine verstärkte Automatisierung beim Testen und für die Qualifizierung nötig.

Mit dem verfügbaren Know-How im Bereich der Fertigungsverfahren und der experimentellen, automatisierbaren Serienfertigung sowie den innovativen Technologien im Bereich digitaler Systeme und Nutzlasttechnologien kann Fraunhofer den Bedarf der Industrie entlang der gesamten Wertschöpfungskette abdecken.

Beispiele für Demonstratoren auf Systemebene, die am EMI, auch unter Mitwirkung von Fraunhofer- und Industriepartnern erforscht und entwickelt werden, sind:

- Die 2023 auf der Internationalen Raumstation ISS demonstrierten Thermal-Infrarotnutzlast LisR.
- Der 2024 startende Kleinsatellit ERNST.
- Ein neues Satellitensystemkonzept für Anwendungen auf extrem tiefliegenden Erdumlaufbahnen, sogenannten VLEOs – Very Low Earth Orbit.

Fraunhofer verfügt über umfassendes System-Know-How im Bereich der Raumfahrttechnologie zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und zur Entstehung von neuen Geschäftsmodellen. Dadurch können deutsche und europäische Unternehmen stärker und schneller am Zukunftsmarkt für Spacetechnologien und -produkten partizipieren.

Aktuelle Forschung dazu am Fraunhofer EMI

Kleinsatelliten-Systemtechnologien

12U CubeSat ERNST, gefördert durch die Bundeswehr.

VLEO-Demonstrator, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie.

Wissenschaftliche Nutzlast zur Erdbeobachtung im Thermalen Infrarot

Longwave infrared sensing demonstratoR (LisR), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Datenverarbeitungstechnologien

EMI Datenprozessierungseinheit (DPU), gefördert durch Industrieaufträge, Bundeswehr und BMVg.

Letzter Schliff vor der Auslieferung: Kleinsatellit ERNST startet im Sommer 2024 ins All.

ERNSTs Reise beginnt

Erster Forschungssatellit für Anwendungen der Bundeswehr vor dem Start

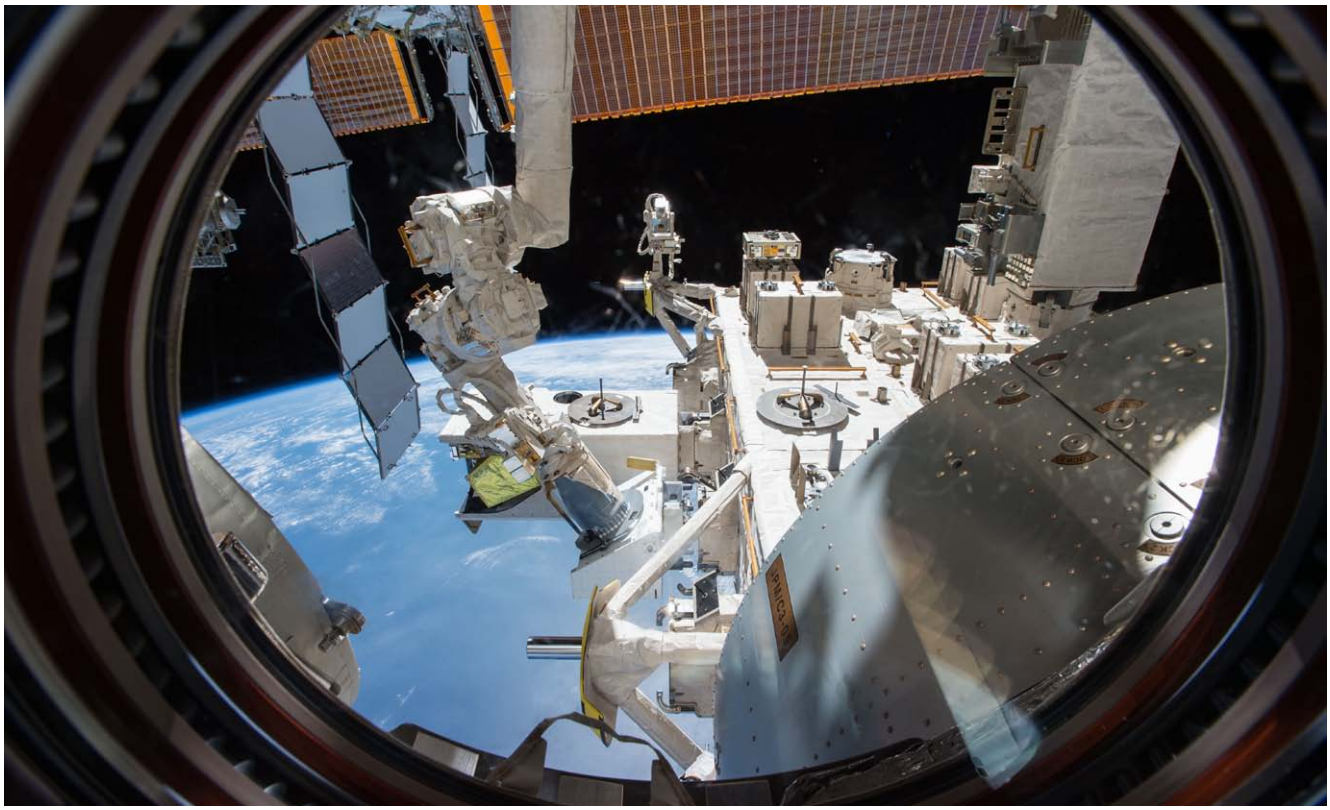
Die Mission des experimentellen Kleinsatelliten ERNST steht vor ihrem Start im Sommer 2024. ERNST ist ein leistungsstarker 12UXL-CubeSat, ein Technologiedemonstrator, der in einem kompakten Volumen von $24 \times 25 \times 37$ cm^3 mehrere technologische Neuheiten unterbringt, u. a. eine generativ designte und gefertigte optische Bank mit integriertem 3D-Radiator sowie eine autonomes De-Orbit-Bremssegel zur nachhaltigen Nutzung der Weltraumumgebung. Das Herzstück des Satelliten ist eine kryogen gekühlte Infrarotkamera, die Methoden der satellitengestützten Raketenfrühwarnung und Nachverfolgung demonstrieren wird. Diese Erkennung einer Bedrohung direkt nach dem Start ist essenziell für die Ergreifung von Abwehrmaßnahmen zu deren Abwehr.

Die Technologieentwicklungsarbeiten am Flugmodell des Satelliten ERNST wurden 2023 erfolgreich abgeschlossen. Der Satellit wurde aus einer sogenannten Flat-Sat-Konfiguration, in der die Satellitenkomponenten im Verbund testweise betrieben, aber für Änderungen leicht zugänglich sind, in den finalen Integrationszustand überführt. Nach der Kalibrierung der Sensorik wiesen wir in abschließenden Abnahmetests erfolgreich nach, dass der Satellit den Lasten beim Raketenstart und in der Orbitumgebung standhält. Durch die Beschaffung einer kommerziellen Satellitenstartdienstleistung konnte das EMI nach wiederholten Verzögerungen im ursprünglichen Startprogramm zudem einen zeitnahen Start in 2024 sicherstellen. Seit Ende April 2024 befindet sich der fertiggestellte ERNST in Obhut des Startdienstleisters. Planmäßig wird ERNST nach einem letzten Check-out Ende Mai 2024 durch EMI-Mitarbeiter auf einer Falcon-9-Rakete integriert und seine Reise in den Orbit beginnen.

Projekt »ERNST«
Dr. Martin Schimmerohn,
martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de,

Kompakt, aber leistungsstark: ERNST, der experimentelle Kleinsatellit.

Fotos: Fraunhofer EMI (2)



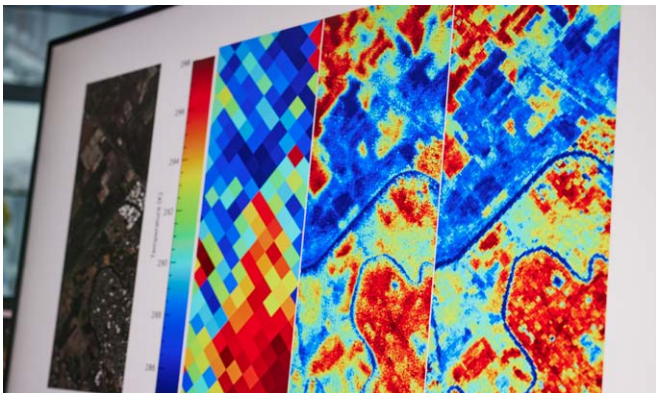
Montage auf der ISS: Die Plattform NREP wird im Außenbereich des japanischen Forschungsmoduls der ISS mit einem Roboterarm montiert.

Nachhaltige Wassernutzung durch Satellitentechnologie

Wie der »Longwave infrared sensing demonstratoR LisR« die Landwirtschaft bei der effizienten Nutzung der Ressource Wasser unterstützt.

Wasser ist ein knappes Gut und wird aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung künftig noch kostbarer werden. Es ist daher elementar, Pflanzen nicht mehr auf Grundlage von Schätzungen, sondern zielgerichtet nach ihrem jeweiligen Bedarf zu bewässern.
Möglich macht das eine neuartige Satellitentechnologie, die aus dem Orbit Wärmestrahlung detektiert und somit physikalisch die Landtemperatur misst. Über diese lassen sich Rückschlüsse auf den Bewässerungszustand der Pflanzen ziehen. Geleitet durch die Gründungsidee der constellr GmbH entwickelten Forschende des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF sowie der Unternehmen constellr GmbH und SPACEOPTIX GmbH – beides Ausgründungen dieser Institute – die Infrarotkamera »LisR«, kurz für »Longwave infrared sensing

Zurück auf der Erde: LisR nach erfolgreichem Einsatz im All. Die Technologie hat enormes Potenzial. Die Kamerasignale ermöglichen es, Über- oder Unterbewässerung zu erkennen und gezielte Maßnahmen zu ergreifen.



Ausgezeichnet: Preisträger des Fraunhofer-Preises »Technik für den Menschen und seine Umwelt« 2023

demonstratoR«. LisR wurde 2022 erfolgreich auf der Internationalen Raumstation ISS getestet. Basierend auf den Erkenntnissen der LisR-Mission plant constellr, eigene Satelliten in den Orbit zu bringen. Mithilfe der Satellitenkonstellation wäre es dann möglich, schon ab 2026 jährlich 180 Milliarden Tonnen Wasser und 94 Millionen Tonnen CO_2 einzusparen und die globale Ernte um bis zu vier Prozent zu steigern.

Die Jury überzeugte u. a. die hervorragende Zusammenarbeit von mehreren Instituten und zwei Ausgründungen zur weltweiten Erfassung des Wassergehalts in Pflanzen und der Oberflächentemperatur vom Weltraum aus.

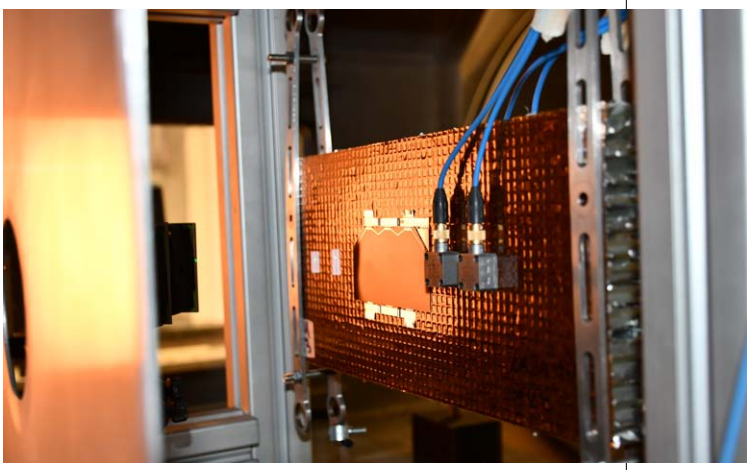
Projekt »LisR«
Clemens Horch, clemens.horch@emi.fraunhofer.de

Impaktforschung bei orbitalen Geschwindigkeiten

Verifikation von neuer Raumfahrttechnik an der Space Gun

Im Jahr 2023 hat das Fraunhofer mit seinen einzigartigen Beschleunigeranlagen zahlreiche Experimente zur Erforschung der Effekte auf Raumfahrtkomponenten durchgeführt. Für Airbus DS untersuchte das Institut die Robustheit von neuen Dünnschichtsolargeneratoren und externen Kabelbündeln gegenüber dem Einschlag von Mikrometeoroiden und Space-Debris-Partikeln mit orbitalen Geschwindigkeiten.

Die Universität der Bundeswehr in München unterstützte das Fraunhofer EMI mit Experimenten zur Entwicklung von Sensorik zur Detektion dieser Hochgeschwindigkeitseinschläge. Dazu wurde die Charakteristik der Vibrationen beim Einschlag auf externe Satellitenkomponenten untersucht, die zur Detektion und Lokalisierung der Impaktereignisse dienen können.



Hypervelocity Impact Testing
Robin Putzar, robin.putzar@emi.fraunhofer.de

Fotos: NASA, Piotr Banczerowski/Fraunhofer (2), Fraunhofer EMI (2)

Höchste On-Board-Rechenleistung für Kleinsatelliten

Das Fraunhofer EMI liefert das Datenverarbeitungssystem für die kommende HiVE-Satellitenmission der constellr GmbH.

HiVE-Mission: Ein Satellitenkonstellationsprojekt für präzise Erdbeobachtung

Anknüpfend an die erfolgreiche LisR-Mission bereitet die constellr GmbH derzeit die »High precision Versatile Ecosphere« (HiVE) Mission vor. Der Aufbau der Konstellation aus Mikrosatelliten beginnt mit dem Start des ersten Satelliten Ende 2024. Bis 2032 sollen 30 Satelliten die Erde im sichtbaren und nahinfraroten sowie insbesondere im thermalinfraroten Spektrum abbilden.

Constellr wird auf Basis der mit HiVE gewonnenen Daten ein sogenanntes Land-Surface-Temperature (LST) Datenprodukt mit einer Bodenauflösung von 30 m pro Pixel anbieten. Ziel ist die verbesserte Analyse von Pflanzenwachstum, Wassereinsatz und Kohlenstoffzyklen für Nutzer im landwirtschaftlichen Sektor.

Constellr wird bei der Entwicklung der HiVE-Satelliten von einem Konsortium bestehend aus der OHB System AG, Kongsberg NanoAvionics sowie des Fraunhofer EMI unterstützt. OHB liefert die multispektrale Nutzlast, NanoAvionics ist für die Satellitenplattform verantwortlich. Die Arbeiten werden von der Europäischen Weltraumorganisation ESA gefördert.

Datenverarbeitung und Redundanz

Neben der am Fraunhofer EMI entstandenen und patentierten Technologie zur kostengünstigeren Kalibration kommt das Knowhow des EMI im Bereich der On-Board-Datenverarbeitung bei der HiVE-Mission zum Einsatz. Das EMI trägt seine Data Processing Unit (DPU) als zentralen Computer für die Nutzlast der HiVE-Satelliten bei.

Die DPU ist ein kompaktes System, das auf kostengünstigen kommerziellen Elektronikkomponenten (Commercial off-the-shelf, COTS) basiert. Alle Bilddaten werden von der DPU vorverarbeitet und bis zur Übertragung auf die Erde dort zwischengespeichert. Auch die Steuerung und Überwachung der Nutzlast gehört zu den Aufgaben der DPU. Die Software der DPU ist während der Mission rekonfigurierbar und auf einen hohen Automatisierungsgrad einerseits und größtmögliche Flexibilität im Betrieb andererseits ausgelegt.

Die DPU für HiVE basiert auf der erfolgreichen Entwicklung für die LisR-Mission. Um den hohen Anforderungen einer kommerziellen Mission Rechnung zu tragen, wurde das Design der DPU überarbeitet und ist nunmehr vollständig redundant ausgelegt. Alle internen Komponenten sind nun mindestens doppelt vorhanden, um im Fehlerfall auf die redundante Einheit umschalten zu können. Ergänzt wird die Redundanz der Hardware um Softwaremaßnahmen zur weiteren Erhöhung der Zuverlässigkeit. So wird beispielsweise die gesamte Software der DPU in insgesamt 18-facher Kopie auf sechs verschiedenen Speicherbausteinen abgelegt.

Ausgründung schreibt Erfolgsgeschichte

Im Rahmen der HiVE-Mission wurde die DPU des EMI auch erstmals hinsichtlich Vibrationen und Thermalvakuumumgebung gemäß der europäischen Raumfahrtnormen ECCS qualifiziert. Die dafür notwendigen Qualifikationstests wurden im Satellitenlabor des EMI durchgeführt. Das erste Flugmodell der Data Processing Unit für HiVE wurde Anfang 2024 an constellr geliefert und wird derzeit in den Satelliten integriert. Am EMI begannen anschließend die Arbeiten für die nachfolgenden DPU-Modelle für die HiVE-Konstellation.

Die Erfolgsgeschichte von constellr als Ausgründung des EMI steht kurz vor der nächsten Stufe. Das Fraunhofer EMI ist stolz, diese Entwicklung weiterhin begleiten zu dürfen und in Form des Transfers von Fraunhofer-Technologie unterstützen zu können.

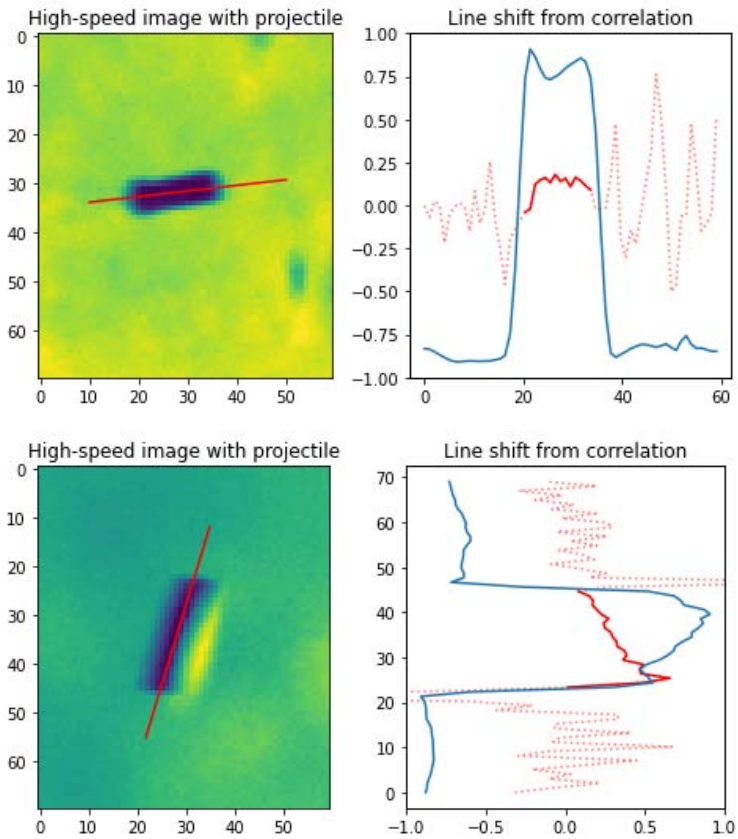
Projekt »HiVE DPU«

Clemens Horch, clemens.horch@emi.fraunhofer.de

Formeffekte beim Hypervelocity Impakt

Experimente mit zylindrischen Impaktoren

Die kugelförmige Kuh ist eine verbreitete Metapher für vereinfachte wissenschaftliche Modelle, die zwar eine einfachere Modellierung erlauben, aber die Realität offensichtlich weniger gut abbilden. Auch zur Analyse des Risikos, das durch Hochgeschwindigkeitseinschläge von Space-Debris-Objekten für Raumfahrtsysteme besteht, werden experimentelle Daten herangezogen, die nahezu ausschließlich mit kugelförmigen Objekten durchgeführt wurden. Dieses Vorgehen ist praktischer Natur, da Kugeln in zweistufigen Leichtgasbeschleunigern einfacher zu beschleunigen sind und als idealisierter Mittelwert betrachtet werden. Ebenso wie bei der Kuh ist die Annahme einer Kugelform von Weltraummüll eine starke Vereinfachung. In einem Projekt für die europäische Raumfahrtagentur ESA erforscht das EMI derzeit die Effekte bei der Verwendung nicht-kugelförmiger Impaktoren. Dazu wurden in 2023 Experimente mit verschiedenen Zylinderformen, von der Scheibe bis zum Stab, durchgeführt, denen derzeit umfangreiche numerische Simulationen folgen.



Untersuchung der Auswirkungen nicht-kugelförmiger Impaktoren in der Raumfahrt: Stab und Scheibe bei 7 km/s an der Space Gun.

Projekt »Sheers«
Dr. Martin Schimmerohn,
martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de

Geschäftsfeld Raumfahrt
Prof. Dr. Frank Schäfer, frank.schaefer@emi.fraunhofer.de
→ emi.fraunhofer.de/raumfahrt

Fotos: Fraunhofer EMI (4)

Geschäftsfeld Luftfahrt

Wie gefährlich sind Handy und Laptop im Flugzeug?

Fraunhofer und Airbus untersuchen Risiken von Lithiumbatterien in Flugzeugen. Dazu wurden im Batterieprüfzentrum des Fraunhofer EMI verschiedene Laptops, Tablets und Smartphones kontrolliert erhitzt, um Daten für die Untersuchung der Rauchausbreitung zu sammeln. Diese Daten dienen zur Simulation von Brand- und Rauchausbreitung in realistischen Flugzeugumgebungen.

Mehr dazu im Projektbericht »Loki-PED«.

Foto: Irina Schmidt / stock.adobe.com

Auf dem Weg zu nachhaltiger und zugleich wettbewerbsfähiger Luftfahrt

Im weltweiten Personen- und Güterverkehr übernimmt die Luftfahrt eine wichtige Rolle. Zugleich ist sie für etwa drei Prozent der weltweiten CO_2-Emissionen verantwortlich. Im Vergleich zu anderen Sektoren wie Energiebranche oder Straßenverkehr ist das relativ gering.

Leider ist zu erwarten, dass die CO_2-Emissionen der Luftfahrtindustrie in den nächsten Jahren aufgrund des zunehmenden Luftverkehrs weiter steigen werden.

Von **Dr. Michael May**

Zukunftsfähige Luftfahrt
Durch Innovationen in Technologie und Design können Flugzeuge umweltfreundlicher werden und gleichzeitig die steigende Nachfrage nach Luftverkehr bedienen.

Foto: Pascal Meier / unsplash.com

Langfristige Ziele für nachhaltige und wettbewerbsfähige Luftfahrt

Flightpath 2050, ein strategisches Konzept der Europäischen Kommission, definiert langfristige Ziele und eine Vision für eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Luftfahrt bis 2050. Dieses Konzept legt den Grundstein für die Entwicklung von Technologien, Verfahren und Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltauswirkungen der Luftfahrt. Die Ziele von Flightpath 2050 umfassen unter anderem die Reduzierung von CO_2-Emissionen um 75 % pro Passagierkilometer bis 2050, die Reduzierung der NO_x-Emissionen um 90 % pro Passagierkilometer bis 2050 und die Reduktion der Lärmemissionen 65 %, jeweils zur Referenz des Jahres 2000. Die Luftfahrtindustrie forscht intensiv an verbesserter Aerodynamik, leichteren Materialien, effizienteren Triebwerken und an neuen Antriebskonzepten, um die Ziele von Flightpath 2050 zu erreichen. Hierbei spielen insbesondere Nachhaltige Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuel, SAF), Wasserstoffantriebe (Direktverbrennung und Brennstoffzelle) und batterieelektrisches Fliegen eine besondere Rolle.

Neue Kraftstoffe und Energieträger

SAF ist ein alternativer Kraftstoff, der aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird und dazu beiträgt, den CO_2-Fußabdruck von Flügen zu reduzieren. SAF kann in herkömmlichen Flugzeugen ohne größere Modifikationen verwendet werden und mischt sich problemlos mit konventionellem Kerosin. Dies ermöglicht eine schrittweise Einführung von nachhaltigem Flugkraftstoff in die Luftfahrtindustrie, während gleichzeitig die CO_2-Emissionen reduziert werden. Allerdings gibt es noch Herausforderungen bei der großflächigen Einführung von SAF. Dazu gehören unter anderem die begrenzte Verfügbarkeit und die höheren Kosten im Vergleich zu konventionellem Kerosin.

Wasserstoff als Hoffnungsträger

Wasserstoff gilt als vielversprechender Energieträger für die Luftfahrtindustrie, um den CO_2-Ausstoß zu reduzieren und eine klimafreundlichere Zukunft zu ermöglichen. Wasserstoff kann sowohl in Brennstoffzellen als auch in Verbrennungsmotoren verwendet werden, um elektrische Energie zu erzeugen und Flugzeuge anzutreiben. Es gibt jedoch auch Herausforderungen bei der Nutzung von Wasserstoff in der Luftfahrt, so mangelt es derzeit noch an Wasserstoffinfrastruktur. Es müssten umfangreiche Investitionen in die Wasserstoffproduktion, -speicherung und -verteilung getätigt werden, um eine ausreichende Infrastruktur für den Einsatz von Wasserstoff in der Luftfahrt zu schaffen. Zudem benötigt Wasserstoff ein höheres Volumen im Vergleich zu konventionellen Flugkraftstoffen, wodurch die Zahl der Passagiere pro Flugzeug reduziert wird. Folglich werden wasserstoffbetriebene Flugzeuge zunächst nur auf Kurz- oder Mittelstrecken eingesetzt werden können. Ein weiterer Aspekt bei der Betrachtung von Wasserstoff ist die Sicherheit. Wasserstoff ist hochentzündlich und erfordert spezielle Sicherheitsvorkehrungen. Die Entwicklung von sicheren Speichermethoden und -systemen ist von entscheidender Bedeutung, um die Sicherheit der Passagiere und der Flugzeugbesatzung zu gewährleisten. Hier können EMI-Wissenschaftler ihre jahrelange Expertise aus anderen Branchen in die Luftfahrtindustrie einfließen lassen.

Innovative Antriebe

Vollelektrische, batteriegetriebene Antriebe gelten als vielversprechendster Ansatz, um die Luftfahrt klimafreundlicher zu gestalten. Elektrische Antriebe haben das Potenzial, Flugzeuge vollständig emissionsfrei zu betreiben. Es gibt jedoch noch Herausforderungen zu bewältigen, wie die begrenzte Energiedichte von Batterien, die Reichweite, die Ladeinfrastruktur und das Gewicht der Batterien.

Trotz der Herausforderungen wird erwartet, dass elektrische Antriebe in der Luftfahrtindustrie in den kommenden Jahren eine immer wichtigere Rolle spielen werden. Die kontinuierliche Entwicklung und Forschung in diesem Bereich, die unter anderem auch am Fraunhofer EMI betrieben wird, wird dazu beitragen, die Effizienz und Leistungsfähigkeit elektrischer Antriebe weiter zu verbessern und somit einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele in der Luftfahrt zu leisten.

Vielfältige Ansätze

Generell scheint jede der drei Routen (SAF, Wasserstoff, Batterieelektrisch) eine Berechtigung in der zukünftigen Luftfahrt zu haben, da jede Technologie für einen bestimmten Anwendungsbereich optimal sein wird. So ist davon auszugehen, dass sich SAF auf Langstreckenflügen durchsetzen wird; Wasserstoff hat hohes Potential auf Kurz- und Mittelstrecken; batteriegetriebene, vollelektrische Konzepte werden auf Kurzstrecken erfolgreich eingesetzt werden können.
Im Jahr 2023 startete das europäische Großforschungsvorhaben Clean Aviation, welches den Weg zur klimaneutralen Luftfahrt vorbereiten soll. Neben vielen anderen Partnern engagieren sich hier auch Wissenschaftler des Fraunhofer EMI, um dem Ziel der klimaneutralen Luftfahrt näherzukommen.

Aktuelle Forschung dazu am EMI

Ultraeffiziente Flügelstrukturen
Projekt UpWing

Teil des EU-Forschungsprogramms »Clean Aviation«

Batteriesicherheit in der Kabine
Projekt LOKI-PED

gefördert von EASA – European Union Aviation Safety Agency

Batteriesicherheit
Projekt BATTcopter

Sichere Nutzung von Laptops, Tablets und Smartphones im Flugzeug

Probleme mit Lithium-Ionen-Akkus in Flugzeugen sind relativ selten. Doch wenn sie eintreten, können sie gravierende Folgen haben – bis hin zu Feuer oder Explosionen.

Im Rahmen des Projekts »LOKI-PED« (Lithium batteries in pOrtable electronic devices – risK of fIre and smoke) arbeiten das Fraunhofer EMI und das Fraunhofer IBP mit Airbus zusammen.

Untersucht und bewertet werden die Rauch- und Brandrisiken, die mit Lithiumbatterien in tragbaren elektronischen Geräten (PEDs) in Kabinen und Cockpits verbunden sind. Unterstützt wird das Projekt von der Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit (EASA). Es wird finanziert durch das Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe der Europäischen Union.

Im vergangenen Jahr wurden die Gefahren charakterisiert, die von PEDs beim thermischen Durchgehen ausgehen. Zu diesem Zweck wurden im Batterieprüfzentrum TEVLIB des Fraunhofer EMI in Efringen-Kirchen verschiedene PEDs wie Laptops, Tablets, Smartphones und Powertool-Batterien kontrolliert und sicher aufgeheizt. Optische und thermische Kameras sowie Druck-, Temperatur- und Durchflusssensoren wurden eingesetzt, um ein Maximum an Informationen und qualitativ hochwertige Testergebnisse zu gewährleisten. Diese Daten werden zur Ableitung künstlicher Rauchquellen für unsere Kollegen am Fraunhofer IBP verwendet. Sie führen die experimentellen Untersuchungen zur Rauchausbreitung in einer realistisch belüfteten A321-Kabine im Fluglabor in Holzkirchen durch.

Simulation und reale Brandversuche
Basierend auf diesen Validierungsversuchen können mit dem Zonenmodell des Fraunhofer IBP numerische Simulationen beliebiger Flugzeugkabinen sowie Parameterstudien durchgeführt werden. So lassen sich die Auswirkungen der Rauchausbreitung auf einzelne Passagiere sowie die sichere Durchführung des Fluges abschätzen. Zudem werden Brandversuche mit realen PEDs beim thermischen Durchgehen in einer realistischen Kabinenumgebung durchgeführt. Das Fraunhofer IBP und das EMI kombinieren dafür ihre Expertise in den Bereichen Kabinenbelüftung und Batteriebrand.

Abschließende Risikobewertung
Alle Ergebnisse fließen in die anschließende Risikobewertung ein, die von der Gruppe Gefährdungs- und Risikoanalyse am Fraunhofer EMI durchgeführt wird. Experten von Airbus unterstützen alle Aspekte des Projekts mit ihrem Fachwissen in den Bereichen Vorschriften, Flugzeugbelüftung, Batteriebrand und Brandsicherheit.

Das Projektteam steht in engem Kontakt mit Mitgliedern der Luftfahrtindustrie. Ein Austausch zum Thema thermisches Durchgehen von Batterien in Kabine und Cockpit fand im Rahmen einer Podiumsdiskussion auf der IATA World Safety & Operations Conference 2023 statt.

Projekt LOKI-PED
Simon Holz,
simon.holz@emi.fraunhofer.de

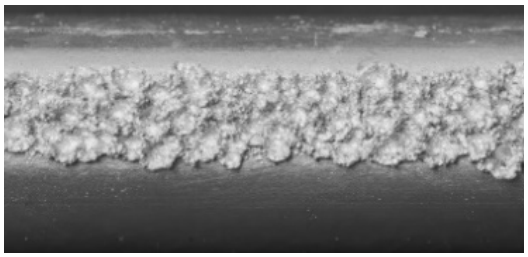
Fotos: Douglas Bagg / unsplash.com, Marek Levak / unsplash.com, Fraunhofer EMI (using Midjourney)

Ultraeffiziente Flügelstrukturen

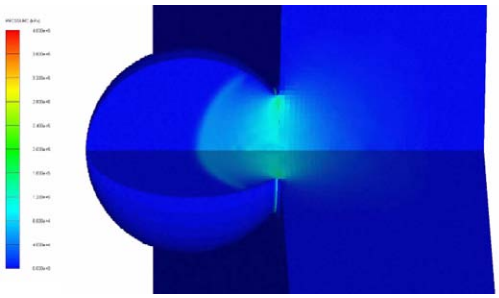
Das Fraunhofer EMI erforscht, wie neue Flügelbeschichtungen die Widerstandsfähigkeit gegen Regen-, Sand- und Hagelschäden erhöhen und zugleich den Treibstoffverbrauch reduzieren können.

Das Projekt UP Wing (Ultra Performance Wing) ist Teil des von der Europäischen Union geförderten Forschungsprogramms »Clean Aviation«. In UP Wing werden in einem interdisziplinären Konsortium aus Industrie, Forschungsreinrichtungen und Universitäten wichtige Basistechnologien für Tragflächenkonzepte mit höchster Leistung für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge entwickelt. Das Ziel ist eine signifikante Reduktion des Treibstoffverbrauchs. Das EMI ist zusammen mit dem für Fraunhofer federführenden IFAM an zwei Teilprojekten beteiligt, in denen die Widerstandskraft neuer Beschichtungen gegen Regen- und Sanderosion sowie die Robustheit einer neuen Flügelstruktur gegen Hagelschlag untersucht werden. Im Bereich Regen- und Sanderosion setzt das EMI seine Kompetenz in der numerischen Simulation von Impaktvorgängen und der Fluid-Struktur-Kopplung ein. Hagelschlag soll sowohl in der Simulation als auch in Impaktversuchen auf Demonstratorstrukturen untersucht werden.

Momentan wird die Simulationsmethodik erweitert, um die Wirkung einer größeren Zahl von Aufschlägen simulieren zu können. Die Bildung von Kratern erfordert dabei eine Fluid-Struktur-Interaktion für sich stark verändernde Oberflächen, wie sie für dreidimensionale Simulationen besonders effizient in der EMI-Software APOLLO durch die Kopplung mit einem Struktursolver realisiert werden kann. So kann der Verstärkungseffekt berücksichtigt werden, der durch die Geometrieänderung auftritt. Mit derartigen Modellen können die Einflüsse von Materialeigenschaften und Beschichtungen im Detail untersucht werden. Diese Untersuchungen unterstützen die Entwicklung neuer, treibstoffsparender und langlebiger Beschichtungen.



Extreme Regenerosion an einem Aluminiumprofil
Kalibrierungstest für eine Erosionstestanlage, durchgeführt von R&D Test Systems, Hinnerup, Dänemark. Die Geschwindigkeit am Profilende betrug 160 m/s, Testzeit 10 Stunden.



Simulation des Impakts eines Wassertropfens
Durchmesser von 2 mm und Anfangsgeschwindigkeit 225 m/s auf ein Aluminiumblech in einer Schnittdarstellung. Eine Stoßwelle breitet sich in den Tropfen aus. Kurzzeitig und lokal treten an der Kontaktfläche Druckspitzen über 300 MPa auf.

Projekt UP Wing
Dr.-Ing. Martin Sauer,
martin.sauer@emi.fraunhofer.de

2023 im Rückblick

Brüssel: Wege zu einer umweltfreundlicheren Luftfahrt

Im Rahmen der Veranstaltung »The research road to net-zero industry« nahm Michael May an einer einstündigen Podiumsdiskussion teil. Das Thema lautete: »Navigating towards a more sustainable future for aviation«. Auf großer Bühne diskutierte er mit Vertretern aus Industrie und EU-Kommission über die Zukunft einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Luftfahrt.

Gesprächsrunde aus Politik, Industrie und Forschung
Michael May (Fraunhofer EMI), Damien Meadows (DG CLIMA, EU-Kommission), Riccardo Procacci (CEO Avio Aero), Rosalinde van der Vlies (DG RTD, EU-Kommission), Brandon Mitchener (Moderator)

AIAA SciTech in Orlando

Im Januar 2024 veranstaltete das American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) das AIAA SciTech Forum in Orlando, Florida. Das SciTech Forum ist die weltweit größte wissenschaftliche Tagung im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik. EMI-Wissenschaftler stellten einen Beitrag zur Simulation der Kollision von Drohnen mit Hubschraubern vor und machten im Rahmen ihres Beitrags auf mögliche Gefahren für die Luftfahrt durch unbeabsichtigte Kollisionen zwischen Drohnen und Hubschraubern aufmerksam.

Paris Air Show: Kleinsatellit und additiv gefertigtes Bauteil

Das Fraunhofer EMI war auf der vergangenen Paris Air Show (19.-25. Juni 2023) an einem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer Allianz AVIATION und SPACE beteiligt und stellte dem interessierten Fachpublikum neben dem Kleinsatelliten ERNST auch ein 3D-gedrucktes metallisches Strukturbauteil für eine Cargotür vor, welches im Rahmen von Clean Sky 2 in Zusammenarbeit mit SAAB entwickelt worden ist.

Geschäftsfeld Luftfahrt
Dr.-Ing. Michael May, michael.may@emi.fraunhofer.de
→ emi.fraunhofer.de/luftfahrt

Fotos: Ross Rarmly / unsplash.com, Fraunhofer EMI (3)

Leistungszentrum Nachhaltigkeit

Leistungszentrum Nachhaltigkeit

Rückgewinnung von Carbonfasern

Bisherige Recyclingverfahren von Faserverbünden schreddern das Material und führen somit zum Downcycling des Materials.

Durch ein innovatives Trennverfahren können jetzt Carbonfasern ohne wesentliche Verkürzung rückgewonnen werden.

Das Projekt ist eines von aktuell vier nationalen Projekten, die vom LZN finanziert sind.

Foto: Fraunhofer EMI

Nachhaltigkeitsforschung zur Anwendung bringen

LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT FREIBURG

Das Leistungszentrum Nachhaltigkeit (LZN) forscht und fördert Projekte in den Bereichen nachhaltige Materialien, Energiesysteme, Resilienz sowie ökologische und gesellschaftliche Transformation.

Das Leistungszentrum
Das LZN ist eine Kooperation der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute EMI, IAF, IPM, ISE und IWM, der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und weiterer außeruniversitärer Forschungseinrichtungen und Partner. Ziel ist es, Lösungen für eine nachhaltige Zukunft zu erforschen und in die Anwendung zu bringen. Dazu kooperiert das LZN mit Unternehmen, Verbänden und weiteren wichtigen regionalen Partnern.

Transfer von Technologien und Innovationen
Das LZN bringt Technologien und Innovationen auf verschiedensten Wegen in die Praxis. Diese Transferpfade umfassen unter anderem Technologielizenzierung, Auftragsforschung, Ausgründungen und die Wissenschaftskommunikation. Sie entsprechen den Fraunhofer-Transferpfaden.

Gründungsunterstützung für nachhaltige und innovative Ideen
Seit vielen Jahren arbeitet das LZN im Transferpfad Ausgründungen mit der lokalen und regionalen Gründungsszene zusammen. Es vernetzt Wissenschaft mit unternehmerischen Ideen. Zudem bietet es ein eigenes, jährliches Förderformat zur Unterstützung von gründungswilligen Fraunhofer-Mitarbeitenden. Ziel ist, nachhaltige, technologische Ideen in die Anwendung zu bringen und den Innovationsstandort Freiburg für Gründende zu stärken.

Entwicklung effizienterer Solarzellen am INATECH: Erforschung neuer Ansätze, die auf völlig anderen Materialien beruhen als bisherige Zellen.

Das INATECH: nachhaltige Lösungen der Zukunft heute entwickeln

Fünf Fraunhofer-Institute, die Universität Freiburg und ein gemeinsames Ziel: Nachhaltigkeit als Leitgedanken bei der Entwicklung technischer Systeme etablieren.

Ingenieurwissenschaft für mehr Nachhaltigkeit
Das »Institut für Nachhaltige Technische Systeme« (INATECH) erforscht und entwickelt nachhaltige ingenieurwissenschaftliche Lösungen. Im Mittelpunkt stehen dabei nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz. Es ist der ingenieurwissenschaftliche Kern des LZN.

Bedürfnisse heutiger und künftiger Generationen im Fokus
Gemeinsam mit Forschungspartnern aus dem öffentlichen Bereich und der Industrie forscht das INATECH an Methoden, Modellen, Materialien, Technologien und Demonstratoren. Es entwickelt nachhaltige technische Systeme, die Bedürfnisse mit möglichst geringem ökologischem Fußabdruck befriedigen.

Von Grundlagenforschung bis zur industriellen Anwendung
Durch die Kooperation von Fraunhofer und Universität werden wissenschaftliche und technologische Kompetenzen gebündelt: die gesamte Bandbreite von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Anwendung wird dabei abgedeckt. Das INATECH ist als Institut an der Technischen Fakultät der Universität Freiburg beheimatet.

Kooperation von Fraunhofer und Universität Freiburg: Das INATECH ist auf dem Campus der Technischen Fakultät beheimatet. 260 Studierende belegen hier die Bachelor- und Masterstudiengänge in »Sustainable Systems Engineering«.

Fotos: INATECH / Universität Freiburg (2)

Forschungsprojekte am LZN

Wasserstoff-Druckbehälter effizient nutzen und recyceln

Projekt WEiTeR – Strategie für Wasserstoffbehälter bei End-of-Usage: Von erweiterter Nutzung bis zur hochwertigen Carbonfasertape-Rückgewinnung

Wasserstoff als Energieträger ist zentraler Bestandteil der Strategie zur Reduktion des CO_2-Ausstoßes in Deutschland. Besonders in der Verkehrs- und Transportbranche bietet dieser Energieträger die Möglichkeit, fossile Treibstoffe zu ersetzen. In Bezug auf die Lagerung von Wasserstoff haben sich gewickelte carbon-faserverstärkte Druckbehälter (CFK-Tanks) durchgesetzt. Wegen des energieaufwendigen Herstellungsverfahrens der Carbonfasern muss schon heute eine nachhaltige Strategie für das End-of-Usage der Wasserstoffbehälter entwickelt werden.

Ziel des Projektes WEiteR ist es, ein Freiburger Kompetenzzentrum für die Bewertung von CFK-Wasserstofftanks während des Betriebs und bei End-of-Usage zu etablieren. Hierbei sind das Fraunhofer EMI und IWM sowie das INATECH beteiligt. Im Rahmen des Projektes werden Lösungen zur Erweiterung der Nutzungszeit, der Wiederverwendung bis hin zur hochwertigen Rückgewinnung der eingesetzten Carbonfasern – unter Berücksichtigung der Alterung der eingesetzten Werkstoffe – entwickelt und der Industrie zur Verfügung gestellt.
Während der Nutzungszeit werden basierend auf einem Monitoring der Tanks innovative Methoden für die Nachverfolgung und Vorhersage der Materialeigenschaften entwickelt. Je nach Szenario soll so eine Erweiterung der Nutzungszeit oder eine Qualifizierung für eine andere Anwendung ermöglicht werden.

Neues Recyclingverfahren
Zudem wird ein innovatives Peel-Verfahren zur Rückgewinnung der Carbonfaser-Tapes ohne wesentliche Verkürzung der Fasern untersucht und numerisch modelliert. Diese Strategie grenzt sich stark von den aktuellen Faserverbund-Recyclingverfahren ab, die systematisch eine Schredder-Etappe beinhalten und somit zum Downcycling des Werkstoffs führen. Die Projektergebnisse haben hingegen gezeigt, dass unter geeigneten thermo-mechanischen Peel-Bedingungen die Tapes als gestreckte Endlosfaserstreifen mit erhaltenen mechanischen Eigenschaften zurückgewonnen werden können. Sie stehen entsprechend, nach dem Recycling, für eine hochwertige Wiederverarbeitung zur Verfügung.

Hochwertig recycelte Carbonfasern:
Durch das innovative Peel-Verfahren können Carbonfasern viel besser wiederverwertet werden. Oben ein neues Carbonfaser-Tape, unten nach dem Recycling.

Fotos: Fraunhofer EMI (2), Fraunhofer EMI (using Midjourney)

Monitoring von kritischer Unterwasserinfrastruktur

Projekt CoLiBri – Collaborative LiDAR to Monitor Infrastructure in the Water and at the Shoreline

Kritische Infrastruktur ist für die Gewährleistung der Sicherheit und Existenz unseres gesellschaftlichen Lebens elementar. Deshalb muss sie kontinuierlich geprüft und überwacht werden.

Um gemeinsam wissenschaftlichen Mehrwert zu generieren, arbeiten bei den internationalen Projekten des LZN Forscher aus den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten mit internationalen Kooperationspartnern zusammen. Hier arbeiten das Fraunhofer IPM mit dem Finnish Geospatial Research Institute FGI an einer besonders kompakten Sensorplattform für die laserbasierte Inspektion kritischer Unterwasser-Infrastruktur wie z. B. Offshore-Windenergieanlagen.

Effizientes Monitoring

Im Zuge des Projektes wird dabei ein Kern-Sensormodul sowohl in einen Unterwasserscanner als auch einen leichtgewichtigen, luftgetragenen Drohnenscanner integriert. Zudem werden die Systeme um eine Navigations- und Positionierungslösung erweitert und durch eine umfassende Bearbeitungs- und Auswertesoftware ergänzt.

So entsteht ein einheitlicher Prozess zum einfachen, kostengünstigen und effizienten Monitoring. Zugleich profitieren auch weitere Bereiche durch die Technologie: Kartographie, Küstenschutz, Hochwasserschutz, Inspektion, Offshore-Konstruktion und Hydrologie.

2023 im Rückblick

Science Day mit Züblin

Beim Science Day mit dem LZN geht es um eine individuell angepasste, sehr spezifische Ansprache von Unternehmen. Dazu werden im Vorfeld relevante Fragestellungen und Fachleute identifiziert. Im Jahr April 2023 fand ein Science Day mit der Firma Züblin statt. Hier konnten Vertreter des INATECH ihre Kompetenzen im Bereich Circularity Engineering zum Thema nachhaltigen Bauen mit Vertretern von Züblin diskutieren.

Innovation Bar: Unterstützung der Gründerszene

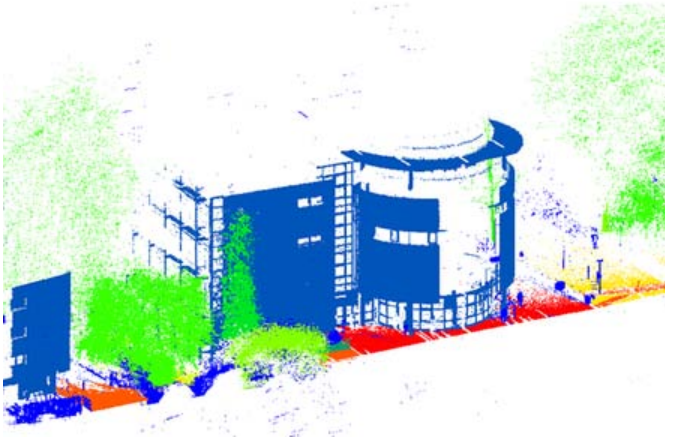
Im Mai fand die Innovation Bar statt. Das LZN und seine Kooperationspartner BadenCampus, Grünhof, Gründungsbüro der Uni Freiburg und Startinsland informierten dabei über die Förder- und Beratungsangebote für Nachwuchsforschende in Freiburg und Umgebung.

Seit 2019 konnten insgesamt sechs Start-ups unterstützt werden, darunter auch die erste Ausgründung aus dem Fraunhofer EMI: ConstellR. ConstellR ist durch den Einsatz einer eigenen Weltrauminfrastruktur führend bei der Erdoberflächen-Messung von Wasser, Temperatur und Kohlenstoff. Die Daten werden eingesetzt, um die Gesundheit von Vegetation und Boden zu bewerten. Dadurch können fundierte Entscheidungen für die Lebensmittel- und Wassersicherheit getroffen werden.

MobiLab

Im Juni beteiligte sich das LZN gemeinsam mit der Universität Freiburg und den Freiburger Fraunhofer-Instituten an der MobiLab Roadshow. Das MobiLab ist ein als Partizipationslabor ausgebautes Tinyhouse, das Spitzenforschung zum Thema Nachhaltigkeit in der Oberrheinregion in einer Roadshow auf einem Freiburger Platz sichtbar machte.

Ergebnisse des gemeinsamen Projektes I4C – Intelligence for Cities wurden hier für die breite Öffentlichkeit aufbereitet und zugänglich gemacht: eine interaktive Klimakarte von Freiburg zeigte die Effekte des Klimawandels vor der eigenen Haustüre.



Pop-Up DATEN:RAUM:FREIBURG

»Smarte und digitale Stadt« war das Thema des DATEN:RAUM:Freiburg. Die Ausstellung der Stadt Freiburg ermöglichte den Austausch und die Vernetzung mit Akteuren der Stadtgesellschaft und Vertretern von Kommunen. Das LZN stellte gemeinsam mit der Universität und Fraunhofer-Instituten das Projekt I4C– Intelligence for Cities vor. Bei diesem werden Daten der städtischen Geometrie sowie Klima- und Wetterdaten mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) bearbeitet, um damit eine verbesserte Klimaanpassung für Städte zu ermöglichen.

Sustainability Talks an der Technischen Fakultät

Das LZN und das INATECH präsentieren jedes Wintersemester die Sustainability Talks. Es ist eine interdisziplinäre Vorlesungsreihe, bei der renommierte Wissenschaftler aus verschiedenen Bereichen der Nachhaltigkeit referieren. (Archivbild: Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker)

Umfangreiche Informationen zur Veranstaltung finden Sie auf der Webseite → www.inatech.de/talks

Leistungszentrum Nachhaltigkeit
Christiane Felder, christiane.felder@emi.fraunhofer.de
Dr. Juri Lienert, juri.lienert@emi.fraunhofer.de
→ www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de

Fotos: Fraunhofer EMI (using Midjourney), LZN, I4C, LZN, Andree Kaiser

PREPARE-PROJEKT

Verbesserte Diagnostik in Krebserkennung und -therapie

Bei der Krebserkennung spielt Computertomographie (CT) basierend auf Röntgenstrahlung eine zentrale Rolle. Leider kann das Verfahren durch die hohe Strahlenexposition selbst zum Gesundheitsrisiko werden. Ein innovativer Ansatz eröffnet neue Möglichkeiten durch die Ergänzung mittels gesundheitsunschädlicher Radarstrahlen.

Bildgebende Verfahren sind in der Medizin für die Diagnostik von Krankheiten, aber auch für das Monitoring von Behandlungen nicht mehr wegzudenken. Bei der Diagnostik von Krebserkrankungen spielt Computertomographie (CT) mittels Röntgen eine zentrale Rolle. Allerdings ist das Verfahren auch mit dem Nachteil verbunden, selbst ein Gesundheitsrisiko darzustellen.

Radar als neues Verfahren

Deshalb bietet sich die Ergänzung des reinen Röntgens mit weiteren bildgebenden Verfahren an. So liefert auch Radar-Bildgebung 3D-Daten. In Sicherheitsanwendungen ist das Verfahren bereits Standard, im medizinischen Bereich ist es, obwohl gesundheitlich unbedenklich, ein Außenseiter.
Für medizinische Anwendungen besteht die Herausforderung, eine ausreichend hohe Auflösung zu erreichen. Sie bietet aber im Vergleich zu anderen Methoden die Möglichkeit direkte Materialinformationen abzuleiten.

Die Vorteile der Mammographie in der Früherkennung von Brustkrebs überwiegen das Risiko der Strahlenbelastung. Dennoch beträgt die Exposition bei einer Untersuchung rund ein Viertel der jährlichen Grundstrahlung. Ein am Fraunhofer EMI mitentwickeltes Verfahren soll helfen, die Strahlungsexposition zu reduzieren.

Ziel von »Multi-Med« ist es, den nutzbringenden medizinische Einsatz der Kombination von Röntgen- und Radar-CT aufzuzeigen. Dafür werden Methoden zur Co-Registrierung bildgebender Systeme entwickelt, um die Radardaten mit den Röntgendaten in Einklang zu bringen. Die Radar-Rekonstruktionsalgorithmik wird erweitert und durch A-Priori-Informationen Auflösungsvermögen und Bildqualität erhöht. Hand in Hand dazu wird die Röntgen-CT-Rekonstruktion durch die mit Radar gewonnenen, materialspezifischen Informationen erweitert und so eine multimodale CT-Algorithmik erarbeitet, um die Qualität und Informationsdichte der 3D-Daten zu erhöhen, Artefakte zu reduzieren und die eingebrachte Strahlungsdosis zu verringern. Um die Fähigkeiten des Multimodalsystems aufzuzeigen, werden spezifische Messphantome entwickelt, die auf beiden Messmodalitäten realistische Signale ergeben und die reproduzierbare Validierung der Methoden ermöglichen, ohne mit echtem Gewebe arbeiten zu müssen. Am Ende steht ein multimodales Laborsystem, das die Fusion der beiden Bildgebungsmodalitäten demonstriert.

Foto: Gorodenkoff / stock.adobe.com

Was ist ein PREPARE-Projekt?

PREPARE-Projekte dienen der institutsübergreifenden, anspruchsvollen Vorlaufforschung zur Vorbereitung neuer Geschäftsfelder. Damit soll der Grundstein für eine längerfristige Allianz zwischen den Instituten gelegt werden. Die Fördersumme der Verbundforschungsprojekte beträgt zwischen 1,5 bis 3,5 Mio. Euro bei einer maximalen Projektlaufzeit von 3 Jahren. Dabei muss jedes Projekt bis spätestens 3 Jahre nach Projektende mindestens einen Return-on-Investment (RoI) von 100 % der Fördersumme nachweisen.

Das Projekt »Multi-Med« ist ein durch die FhG gefördertes Prepare-Projekt mit dem Ziel der verbesserten Diagnostik in der Krebserkennung und -therapie mit einer Laufzeit von 06/2023 – 05/2026. Unter der Leitung des Fraunhofer EMI sind auch das Fraunhofer MEVIS und das Fraunhofer FHR beteiligt.

PREPARE-Projekt »Multi-Med«
victoria.heusinger-hess@emi.fraunhofer.de

Das Institut im Profil

Verwaltung, Personal, Publikationen im Überblick

96 Das Institut in Zahlen

98 Personal & Finanzen

100 Kuratorium

102 Kontakt

103 Impressum

104 Publikationen

← **Ausbildung am Fraunhofer EMI**
Feinwerkmechanik, Elektronik, Mediengestaltung, und Duales Studium: das EMI bietet zahlreiche Ausbildungsmöglichkeiten. Aktuell werden 21 Personen ausgebildet.

Fotos: Fraunhofer EMI (2)

Das Institut in Zahlen

395
Mitarbeiterinnen
und Mitarbeiter

- 40 % Wissenschaftliche Mitarbeitende in Fachabteilungen
- 13 % Nichtwissenschaftliche Mitarbeitende in Fachabteilungen
- 26 % Leitung und Infrastruktur
- 16 % Hiwi, Praktikantinnen und Praktikanten
- 5 % Auszubildende, DHBW-Studierende

Personal gesamt alle Standorte

Personal nach Standorten

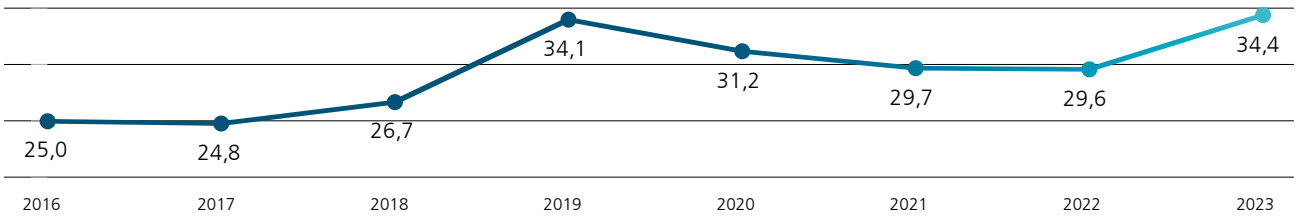
222	130	32	11
Freiburg	Efringen-Kirchen	Kandern	Berlin

5 Geschäftsfelder: Verteidigung, Sicherheit & Resilienz, Automotive, Raumfahrt, Luftfahrt

Finanzen

34,4 Mio. € Gesamthaushalt	**18,4** Mio. € externe Finanzierung	**95** extern finanzierte Projekte (Stand: 31.3.24)

Gesamthaushalt in Mio. €



Wissenschaft

101 Veröffentlichungen mit Peer-Review	**57** Vorträge	**38** Lehrveranstaltungen
5 Patente	**2** Promotionen	**34** Bachelor- und Masterarbeiten

Wissenschaftliche Kooperationen

- Universität Freiburg
- University of Oxford
- NTU Singapore
- Cranfield University
- MIT
- Cluster Micro TEC Südwest
- Centre for Security
- Cluster Elektromobilität Südwest

Personal

Ende 2023 waren am Fraunhofer EMI insgesamt 395 Personen beschäftigt: 310 Mitarbeitende als Stammpersonal, 21 Auszubildende und DHBW-Studierende und 64 wissenschaftliche Hilfskräfte, Praktikantinnen und Praktikanten. Vom Stammpersonal waren 204 Mitarbeitende direkt in der Forschung und 106 Mitarbeitende im Bereich Leitung und Infrastruktur tätig.

Der Anteil der weiblichen Beschäftigten des Stammpersonals betrug 25,8 Prozent. Vom Stammpersonal waren 56,1 Prozent am Standort Freiburg, 32,9 Prozent am Standort Efringen-Kirchen, 8,1 Prozent am Standort Kandern und 2,9 % am Standort Berlin beschäftigt.

Von den insgesamt 21 Auszubildenden waren 13 in den Bereichen Feinwerkmechanik, Elektronik und Mediengestaltung tätig. 8 Mitarbeitende wurden zum Zweck ihrer Berufsausbildung oder im Rahmen ihres Studiums an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg am Fraunhofer EMI beschäftigt.

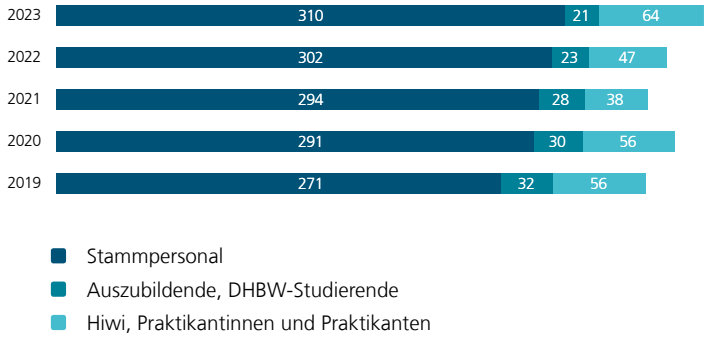
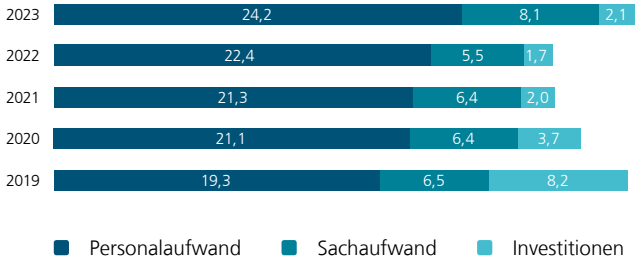


Foto: Fraunhofer EMI

Finanzen

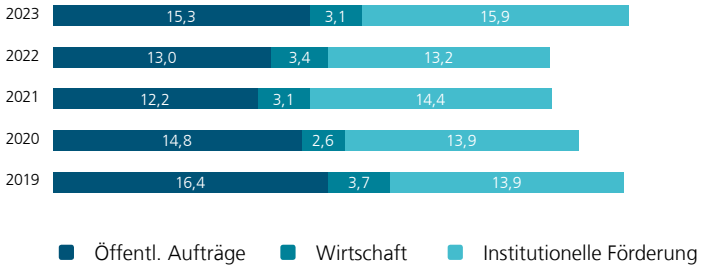
Aufwendungen Gesamthaushalt

in Millionen Euro

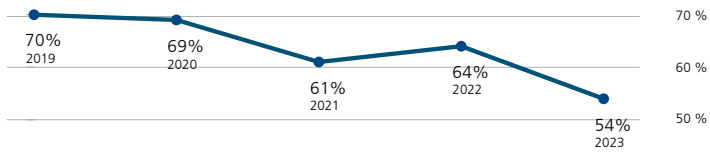


Erträge Gesamthaushalt

in Millionen Euro



Der Gesamthaushalt des Fraunhofer EMI ist im Vergleich zum Vorjahr um 16 % gestiegen (von 29,6 auf 34,4 Mio. Euro). Ebenso ist der Betriebshaushalt angestiegen (von 27,9 auf 32,2 Mio. Euro. Einen Zuwachs gibt es auch bei den EU-Erträgen. Sie sind von 0,9 Mio. auf 1,2 Mio. Euro angestiegen. Ebenfalls gibt es im zivilen Anteil einen Zuwachs. Der Anteil der BMVg-Förderung beträgt 54 % (Vorjahr: 64 %).



BMVg-Anteil im Verhältnis zum Gesamthaushalt, in Prozent.

Kuratorium

Das Kuratorium steht der Institutsleitung beratend zur Seite. Es fördert die Kontakte des Instituts zu Organisationen und zur Industrie.

Hanna Böhme
Geschäftsführerin Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe GmbH & Co. KG, FWTM, Freiburg

Dipl.-Ing. Thomas Gottschild (Vorsitz)
Geschäftsführer MBDA Deutschland GmbH,
Schrobenhausen

Ministerialrätin Sabine ten Hagen-Knauer
Referatsleiterin 524: Zivile Sicherheitsforschung, Bundesministerium für Bildungund Forschung (BMBF), Bonn

Rainer Hoffmann
Geschäftsführer carhs.training GmbH, Alzenau

Univ.-Prof.in Dr.-Ing. habil. Dr. mont. Eva-Maria Kern
Präsidentin Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

Ministerialrat Dipl.-Phys. Claus Mayer
Leiter des Referats 33: Automobil- und Produktionsindustrie, Logistik, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg, Stuttgart

Brigadegeneral Michael Meinl
Direktor Deutsch-Französisches Forschungs-
institut Saint-Louis ISL, Binzen

Michael Schätzle
Geschäftsleitung Baureihe Cayenne, Porsche AG, Weissach

Brigadegeneral Jürgen Schmidt
Abteilungsleiter Kampf, Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw), Koblenz

Dr. Tobias Schmidt
Abteilungsleiter Systementwicklung Großkaliber, Rheinmetall Waffe und Munition GmbH, Unterlüß

Prof. Dr.-Ing. Rodolfo Schöneburg
Road Safety Counselor, RSC Safety Engineering, Hechingen

Dr. Isabel Thielen
Geschäftsführerin, Thielen Business Coaching GmbH, München

Ministerialrat Dr. Dirk Tielbürger
Referatsleiter A III 6, Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), Bonn

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Mit über 30 000 Mitarbeitenden in 76 Instituten ist die Fraunhofer-Gesellschaft die weltweit führende Organisation für angewandte Forschung.

Fraunhofer fokussiert sich auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien und auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie. Dadurch spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess. Sie ist Wegweiser und Impulsgeber für innovative Entwicklungen und wissenschaftliche Exzellenz. Mit inspirierenden Ideen und nachhaltigen wissenschaftlich-technologischen Lösungen fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft und Wirtschaft und wirkt an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft mit.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 76 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 30 000 Mitarbeitende, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,9 Milliarden Euro. Davon fallen 2,5 Milliarden Euro auf den Bereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

»Approximavit sidera« (»Er hat uns die Sterne näher gebracht«), lautete die Grabinschrift von Namensgeber Joseph Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich. Die Qualität seiner optischen Linsen war über Jahrzehnte unerreicht. Fraunhofer verband exakteste wissenschaftliche Arbeit mit praktischer Anwendung und schuf dadurch neue innovative Produkte. Heute gilt er als ein Wegbereiter der modernen Weltraumerkundung.

Im Gemälde: Fraunhofer demonstriert seinen Spektrometer (stehend, mit schwarzem Mantel).

Fotos: Fraunhofer EMI, Fraunhofer-Gesellschaft

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier
Institutsleiter

+49 761 2714-101
stefan.hiermaier@emi.fraunhofer.de

Dr. Matthias Wickert

Stellvertretender Institutsleiter

+49 761 2714-120
matthias.wickert@emi.fraunhofer.de

Prof. Dr. Frank Schäfer

Stellvertretender Institutsleiter,
Geschäftsfeldleiter Raumfahrt

+49 761 2714-421
frank.schaefer@emi.fraunhofer.de

Daniel Hiller

Geschäftsfeldleiter Verteidigung
Geschäftsfeldleiter Sicherheit &
Resilienz

+49 761 2714-488
daniel.hiller@emi.fraunhofer.de

Dr. Michael May

Geschäftsfeldleiter Luftfahrt

+49 761 2714-337
michael.may@emi.fraunhofer.de

Dr. Michael Dlugosch

Geschäftsfeldleiter Automotive

+49 761 2714-324
michael.dlugosch@emi.fraunhofer.de

Bibiana Cortés

Verwaltungsleiterin

+49 761 2714-115
bibiana.cortes@emi.fraunhofer.de

Diana Zeitler

Abteilungsleiterin Infrastruktur

+49 761 2714-370
diana.zeitler@emi.fraunhofer.de

Dr. Uwe Kerat

Stab Institutsleitung

+49 7628 9050-795
uwe.kerat@emi.fraunhofer.de

Stephan Engemann

Abteilungsleiter Rechenzentrum

+49 761 2714-380
stephan.engemann@emi.fraunhofer.de

Dr. Kilian Kreb

Abteilungsleiter Kommunikation

+49 761 2714-118
kilian.kreb@emi.fraunhofer.de

Impressum
Fraunhofer EMI Jahresbericht 2023/2024

Redaktion und Layout:
Dr. Kilian Kreb (verantwortlich)

Lektorat:
Johanna Holz, Richard Ohren

Herausgegeben von:
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI
Ernst-Zermelo-Straße 4
79104 Freiburg

Telefon 0761 2714-118
kilian.kreb@emi.fraunhofer.de

Publikationen, Vorträge, wissenschaftlicher Austausch

Zeitraum:
1.4.23 – 31.3.24

Publikationen (mit Peer Review)

Albert, K.; Krivova, N. A.; Hirzberger, J.; Solanki, S. K.; Moreno Vacas, A.; Orozco Suárez, D. et al. (2023): **Intensity contrast of solar network and faculae close to the solar limb, observed from two vantage points.** In: Astronomy & Astrophysics 678, A163. DOI: 10.1051/0004-6361/202346037.

Bagusat, F.; Sauer, M.; Bauer, S.; Hiermaier, S. (2024): **High pressure and shock loading experiments.** In: M. Hokka (Hg.): Dynamic Behavior of Materials. Fundamentals, Material Models, and Microstructure Effects, Bd. 429: Elsevier, S. 269–294.

Becker, M.; Imbert, M.; May, M. (2023): **An inverse model for the peeling-based recovery of unitary layers from laminated structures.** In: Proceedings of the 11th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences. Belgrad, 05.-08.09.2022 (AIP Conference Proceedings), Art. No. 020018.

Böhringer, P.; Sommer, D.; Haase, T.; Barteczko, M.; Sprave, J.; Stoll, M. et al. (2023): **A strategy to train machine learning material models for finite element simulations on data acquirable from physical experiments.** In: International Journal of Solids and Structures 406 (3), Art. No. 115894. DOI: 10.1016/j.cma.2023.115894.

Boljen, M.; Jenerowicz, M.; Bauer, S.; Straßburger, E. (2023): **Combining protective clothes with human body models for finite element ballistic impact simulations.** In: Communications in Development and Assembling of Textile Products 4 (2), S. 141–150. DOI: 10.25367/cdatp.2023.4.p141-150.

Boyadzhieva, S.; Kollmannsperger, L.; Gutmann, F.; Straub, T.; Fischer, S. (2024): **Acoustic nondestructive characterization of metal pantographs for material and defect identification.** In: S. et al. Kramer (Hg.): Additive and Advanced Manufacturing, Inverse Problem Methodologies and Machine Learning and Data Science, Volume 4. SEM 2023. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series: Springer, S. 47–53.

Busch, S.; Koss, P. A.; Horch, C.; Schäfer, K.; Schimmerohn, M.; Schäfer, F.; Kühnemann, F. (2023): **Magnetic cleanliness verification of miniature satellites for high precision pointing.** In: Acta Astronautica 210 (11), S. 243–252. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.05.017.

Butter, A.; Heimel, T.; Martini, T.; Peitzsch, S.; Plehn, T. (2023): **Two invertible networks for the matrix element method.** In: SciPost Physics 15 (3). DOI: 10.21468/SciPostPhys.15.3.094.

Denefeld, V.; Aurich, H. (2023): **Experimental and numerical investigation on alternatives to sandy gravel.** In: Ballistics 2023. Proceedings of the 33rd International Symposium on Ballistics. Unter Mitarbeit von Frederik (ed.) Coghe. Bruges, 16.-20.10-2023: DEStech Publications, S. 481–483.

Denefeld, V.; Aurich, H. (2023): **Experimental and numerical investigation on alternatives to sandy gravel.** In: Defence Technology 31, S. 130–141. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.016.

Eisemann, L.; Fehling-Kaschek, M.; Gommel, H.; Hermann, D.; Klemp, M.; Lauer, M. et al. (2023): **An approach to systematic data acquisition and data-driven simulation for the safety testing of automated driving functions.** In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2023). Bilbao, 24.-28.09.2023.

Elles, A.; Meinders, L.; Mauermann, M.; Weber, P.; Eisenrauch, V.; Finger, J.; Stolz, A. (2023): **Tool für mehr Resilienz.** Wie sich Unternehmen gegen Krisen absichern können. In: Agrarzeitung 34. Online verfügbar unter https://www.agrarzeitung.de/nachrichten/wirtschaft/krisenmanagement-ein-tool-fuer-mehr-resilienz-108495.

Fischer, G. K. J.; Thiedecke, N.; Gabbrielli, A.; Schaechtle, T.; Höflinger, F.; Stolz, A.; Rupitsch, S. J. (2023): **A measurement platform for the evaluation of sparse acoustic array geometries.** In: Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Nürnberg, 25.-28.09.2023, S. 1–6.

Fischer, K. (2023): **Experimental and numerical investigation of the interaction of blast waves with buildings facades.** In: Proceedings of the 6th International Conference on Protective Structures (ICPS6). Auburn, USA, 14.-17.05.2024, S. 273–280.

Fleig, L.; Hoschke, K. (2023): **An automated parametric surface patch-based construction method for smooth lattice structures with irregular topologies.** In: Applied Sciences 13 (20), Art. No. 11223. DOI: 10.3390/app132011223.

Fransson, M.; Broche, L.; Buckwell, M.; Pfaff, J.; Reid, H.; Kirchner-Burles, C. et al. (2023): **Sidewall breach during lithium-ion battery thermal runaway triggered by cell-to-cell propagation visualized using high-speed X-ray imaging.** In: Journal of Energy Storage 71, Art. No. 108088. DOI: 10.1016/j.est.2023.108088.

Gabbrielli, A.; Fischer, G. K. J.; Schaechtle, T.; Xiong, W.; Schott, D. J.; Bordoy, J. et al. (2023): **Airborne acoustic chirp spread spectrum communication system for user identification in indoor localization.** In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 72, Art. No. 9507415. DOI: 10.1109/TIM.2023.3273693.

Ganter, S.; Martini, T.; Kopustinskas, V.; Zalitis, I.; Vamanu, B.; Finger, J. et al. (2024): **A highly robust gas network simulation approach through an inherently solvable problem formulation for network states far from intended design points.** In: Applied Mathematical Modelling 127 (1), S. 297–326. DOI: 10.1016/j.apm.2023.12.009.

Gebhardt, J.; Schlamp, M.; Ehrlich, I.; Hiermaier, S. (2023): **Low-velocity impact behavior of elliptic curved composite structures.** In: International Journal of Impact Engineering 180 (1), Art. No. 104663. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104663.

Geist, H.; Balle, F. (2024): **A circularity engineering focused empirical status quo analysis of automotive remanufacturing processes.** In:

Resources, Conservation and Recycling 201, Art. No. 107328. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107328.

Gómez-Rosal, D. A.; Bergau, M.; Fischer, G. K.J.; Wachaja, A.; Grater, J.; Odenweller, M. et al. (2023): **A smart robotic system for industrial plant supervision.** In: 2023 IEEE SENSORS. Wien, 29.10.-01.11.2023, S. 1–4.

Grunwald, C.; Riedel, W.; Sauer, M.; Stolz, A.; Hiermaier, S. (2024): **Modeling the dynamic fracture of concrete — A robust, efficient, and accurate mesoscale description.** In: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 424, Art. No. 116886. DOI: 10.1016/j.cma.2024.116886.

Gutmann, F.; Hoschke, K.; Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (2023): **Functionality and mechanical performance of miniaturized non-assembly pin-joints fabricated in Ti6Al4V by laser powder bed fusion.** In: Materials 16 (21). DOI: 10.3390/ma16216992.

Häring, I.; Mopuru, S. K. R.; Walz, T. P.; Dhanani, M.; Sandela, N.; Finger, J. et al. (2023): **Overall Markov diagram design and simulation example for scalable safety analysis of autonomous vehicles.** In: Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.-08.09.2023, S. 104–111.

Häring, I.; Rosin, J.; Ganter, S.; Finger, J.; Fehling-Kaschek, M.; Schroven, K. et al. (2023): **Analytical resilience quantification approaches (resilience analytics) to classify and rank first principle risk and resilience modelling and simulation methods.** In: 63rd ESReDA Seminar. Ispra, 25.-26.10.2023.

Häring, I.; Sandela, N.; Walz, T. P.; Vogelbacher, G.; Richter, A.; Jain, A. K. et al. (2023): **Dynamically resolving and abstracting Markov models for system resilience analysis.** In: Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.-08.09.2023.

Helmerich, J.; Schaechtle, T.; Wich, M.; Szabo, B.; Stieglitz, T.; Rupitsch, S. J. (2023): **Implementation of an ultrasonic-based link for percutaneous communications.** In: Current Directions in Biomedical Engineering 9 (1), S. 170–173. DOI: 10.1515/cdbme-2023-1043.

Hess, K.; Bessler, S.; Schneider, J. M.; Ramin, M. von (2023): **Abstraction and simulation of EV battery systems-resilience engineering by biological transformation.** In: Bioinspiration & biomimetics 18 (5). DOI: 10.1088/1748-3190/ace8da.

Holler, M.; Mußbach, G.; Weigand, A.; Putzar, R.; Valencia Bel, F.; Karl Wieland, N. (2023): **Coping with space environment – testing solid propellants for use with in-orbit propulsion.** In: International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion 22 (5), S. 45–66. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2023047114.

Hoschke, K.; Kappe, K.; Patil, S.; Kilchert, S.; Kim, J.; Pfaff, A. (2024): **Sustainability-oriented topology optimization towards a more holistic design for additive manufacturing.** In: Klahn, C., Meboldt, M., Ferchow, J. (Hg.): Industrializing Additive Manufacturing. AMPA 2023, Bd. 9. Cham: Springer, S. 77–88.

Imbert, M.; Kilchert, S.; Maurer, M.; May, M. (2023): **Experimental investigation of hail impacts over a wide range of high velocities.** In: International Journal of Impact Engineering 178 (20), Art. No. 104627. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104627.

Jain, A. K.; Ruiter, J. de; Häring, I.; Fehling-Kaschek, M.; Stolz, A. (2023): **Design, simulation and performance evaluation of a risk-based border management system.** In: Sustainability 15 (17), Art. No. 12991. DOI: 10.3390/su151712991.

Jain, A. K.; Srivastava, K.; Walz, T. P.; Häring, I.; Vogelbacher, G.; Höflinger, F.; Finger, J. (2023): **Deep behavioral replication of Markov models for autonomous cars using neural networks.** In: Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.-08.09.2023, S. 3074–3079.

Jakkula, P.; Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (2023): **A direct impact tension bar setup for testing low-impedance materials at intermediate rates of strain.** In: Materials Letters 352, Art. No. 135082. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.135082.

Jenerowicz, M.; Bauer, S.; Thoma, O.; Boljen, M.; Riedel, W.; Straßburger, E. (2023): **Evaluation of behind armor blunt trauma (BABT) – Numerical investigation with GHBMC M50 and dummy tests with CTS-Primus breakable thorax.** In: Ballistics 2023. Proceedings of the 33rd International Symposium on Ballistics. Unter Mitarbeit von Frederik (ed.) Coghe. Bruges, 16.-20.10-2023: DEStech Publications, S. 1176–1187.

Jenerowicz, M.; Haase, T.; Linnenberg, M.; Musienko, E.; Hoschke, K.; Boljen, M.; Hiermaier, S. (2024): **Developing rib bone surrogates for high dynamic impact assessment with additive manufacturing and post-mortem human subjects (PMHS)-based evaluation.** In: Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety 8 (2). DOI: 10.1007/s41314-024-00065-y.

Kappe, K.; Hoschke, K.; Riedel, W.; Hiermaier, S. (2024): **Multi-objective optimization of additive manufactured functionally graded lattice structures under impact.** In: International Journal of Impact Engineering 183 (1838), Art. No. 104789. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104789.

Kar, B.; Schaechtle, T.; Rupitsch, S.; Wallrabe, U. (2023): **Transfer of acoustic wireless power and data through a metal wall using a common link with higher resonance modes.** In: 21st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS). Salt Lake City, UT, USA, 12.-15.12.2022, S. 303–306.

Köpke, C.; Mielniczek, J.; Roller, C.; Lange, K.; Torres, F. S.; Stolz, A. (2023): **Resilience management processes in the offshore wind industry: schematization and application to an export-cable attack.** In: Environment Systems and Decisions 43 (2), S. 161–177. DOI: 10.1007/s10669-022-09893-9.

Köpke, C.; Mielniczek, J.; Stolz, A. (2023): **Testing resilience aspects of operation options for offshore wind farms beyond the end-of-life.** In: Energies 16 (12), Art. No. 4771. DOI: 10.3390/en16124771.

Köpke, C.; Schroven, K.; Stolz, A. (2023): **Hybrid threats on air traffic.** In: Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.-08.09.2023, S. 2148–2154.

Köpke, C.; Walter, J.; Cazzato, E.; Linguraru, C.; Siebold, U.; Stolz, A. (2023): **Methodology for resilience assessment for rail**

infrastructure considering cyber-physical threats. In: S. et al. Katsikas (Hg.): Computer Security. ESORICS 2022 International Workshop. ESORICS 2022, Bd. 13785: Springer (Lecture Notes in Computer Science), S. 346–361.

Lewetag, R. D.; Nimani, S.; Alerni, N.; Hornyik, T.; Jacobi, S. F.; Moss, R. et al. (2023): **Mechano-electrical interactions and heterogeneities in wild-type and drug-induced long QT syndrome rabbits.** In: The Journal of physiology. DOI: 10.1113/JP284604.

Li, J.; Balle, F. (2023): **In-situ observation of the bond formation process during ultrasonic metal welding of Al/Cu joints using Laser Doppler Vibrometry.** In: Journal of Manufacturing Processes 106, S. 1–11. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.09.077.

Li, J.; Rienks, M.; Balle, F. (2023): **Development of a high-frequency test system to study the wear of ultrasonic welding tools.** In: Metals 13 (12), Art. No. 1935. DOI: 10.3390/met13121935.

Li, J.; Zillner, J.; Balle, F. (2023): **In-depth evaluation of ultrasonically welded Al/Cu joint: plastic deformation, microstructural evolution, and correlation with mechanical properties.** In: Materials 16 (8). DOI: 10.3390/ma16083033.

Lüttner, F. (2023): **A joint approach towards data-driven virtual testing for automated driving – the AVEAS project.** In: Proceedings of the FAST-zero ,23. Kanazawa, 08.-11.11.2023.

Lüttner, F. (2023): **An approach to systematic data acquisition and data driven simulation for the safety testing of automated driving functions.** In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2023). Bilbao, 24.-28.09.2023.

Makur, K.; Ramakrishna, B.; Krishnamurthy, S.; Kakolee, K. F.; Kar, S.; Cerchez, M. et al. (2023): **Probing bulk electron temperature via X-ray emission in a solid density plasma.** In: Plasma Physics and Controlled Fusion 65 (4), Art. No. 045005. DOI: 10.1088/1361-6587/acb79c.

Martini, T.; Nuraliyev, T.; Uwer, P. (2023): **Determination of the top-quark mass from top-quark pair events with the matrix element method at next-to-leading order: Potential and prospects.** In: Physical Review D 107 (7). DOI: 10.1103/PhysRevD.107.076013.

May, M.; Schneider, N.; Schaufelberger, B.; Jung, M.; Pfaff, J.; Altes, A. et al. (2024): **Collisions between drones and rotorcraft: modeling of the crash response of battery packs.** In: Journal of the American Helicopter Society 69 (1), S. 1–8. DOI: 10.4050/JAHS.69.012004.

May, M.; Schopferer, S. (2023): **On the relationship between lightning strike parameters and measured free surface velocities in artificial lightning strike tests on composite panels.** In: Journal of Composites Science 7 (7), Art. No. 268. DOI: 10.3390/jcs7070268.

Medina, S. A.; González, E. V.; Blanco, N.; Maimí, P.; Pernas-Sánchez, J.; Artero-Guerrero, J. A. et al. (2023): **Rate-dependency analysis of mode I delamination by means of different data reduction strategies for the GDCB test method.** In: Engineering Fracture Mechanics 288 (17), Art. No. 109352. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109352.

Menges, J.; Walter, J.; Bächle, J.; Schnattinger, K. (2023): **Speech detection of real-time MRI vocal tract data.** In: Proceedings of the 15th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. Rom, 13.-15.11.2023 (Vol. 1), S. 182–187.

Merkle, D.; Solass, J.; Schmitt, A.; Rosin, J.; Reiterer, A.; Stolz, A. (2023): **Semi-automatic 3D crack map generation and width evaluation for structural monitoring of reinforced concrete structures.** In: Journal of Information Technology in Construction 28, S. 774–805. DOI: 10.36680/j.itcon.2023.040.

Meyer, R.; Schmidt-Colberg, A.; Kruse, A.; Eberhardt, D.; Köpke, C. (2023): **Towards a specification of behaviour models for crowds.** In: 18th Proceedings of the Social Simulation Conference 2023. Glasgow, UK, 04.-08.09.2023.

Moonen, J.; Ryan, S.; Kortmann, L.; Putzar, R.; Forrester, C.; Barter, S. et al. (2023): **Evaluating UHMWPE-stuffed aluminium foam sandwich panels for protecting spacecraft against micrometeoroid and orbital debris impact.** In: International Journal of Impact Engineering 180, Art. No. 104668. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104668.

Nölke, J. D.; Solanki, S. K.; Hirzberger, J.; Peter, H.; Chitta, L. P.; Kahil, F. et al. (2023): **Coronal voids and their magnetic nature.** In: Astronomy & Astrophysics 678, Art. No. A196. DOI: 10.1051/0004-6361/202346040.

Oliveira, P. R.; Virgen, G. P. G.; Imbert, M.; Beisel, S.; May, M.; Panzera, T. H. et al. (2023): **Ultrasonically welded eco-friendly sandwich panels based on upcycled thermoplastic core: An eco-mechanical characterisation.** In: Resources, Conservation & Recycling Advances 20, Art. No. 200187. DOI: 10.1016/j.rcradv.2023.200187.

Patil, S.; Ganzenmüller, G.; Gutmann, F.; Hoschke, K.; Hiermaier, S. (2023): **The auxetic friction cell: towards programming strain rate dependency and energy dissipation into mechanical metamaterials.** In: Materials Today Communications 36 (11), Art. No. 106725. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106725.

Pfaff, A.; Linnenberg, M.; Hoschke, K.; Balle, F. (2023): **Generating functionally graded steel microstructures by laser powder bed fusion.** In: Journal of Materials Science. DOI: 10.1007/s10853-023-09086-y.

Pfaff, A.; Schäffer, S.; Jäcklein, M.; Balle, F. (2023): **Measuring the cooling behavior of melt pools in L-PBF by pyrometry.** In: Materials 16 (10). DOI: 10.3390/ma16103647.

Philippi, M.; Heusinger-Heß, V.; Ari, M.; Krüger, E. (2022): **KI im Einsatz: Interdisziplinäre Herausforderungen im Projekt UAV-Rescue.** In: Mensch und Computer. DOI: 10.18420/muc2022-mci-ws10-332.

Premanand, A.; Prescher, M.; Rienks, M.; Kirste, L.; Balle, F. (2024): **Online and ex situ damage characterization techniques for fiber-reinforced composites under ultrasonic cyclic three-point bending.** In: Polymers 16 (6). DOI: 10.3390/polym16060803.

Premanand, A.; Rienks, M.; Balle, F. (2024): **Accelerated estimation of the very high cycle fatigue strength and life of polymer composites under ultrasonic**

cyclic three-point bending. In: Materials & Design 240, Art. No. 112872. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112872.

Premanand, A.; Rienks, M.; Balle, F. (2024): **Damage assessment during ultrasonic fatigue testing of a CF-PEKK composite using self-heating phenomenon.** In: International Journal of Fatigue 180 (4), Art. No. 108084. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.108084.

Premanand, A.; Rogala, T.; Wachla, D.; Amraei, J.; Katunin, A.; Khatri, B. et al. (2023): **Fatigue strength estimation of a CF/PEKK composite through self-heating temperature analysis using cyclic bending tests at 20 kHz.** In: Composites Science and Technology 243 (1), Art. No. 110218. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110218.

Ragupathi, B.; Bacher, M. F.; Balle, F. (2023): **First efforts on recovery of thermoplastic composites at low temperatures by power ultrasonics.** In: Cleaner Materials 8, Art. No. 100186. DOI: 10.1016/j.clema.2023.100186.

Ragupathi, B.; Bacher, M. F.; Balle, F. (2023): **Separation and reconsolidation of thermoplastic glass fiber composites by power ultrasonics.** In: Resources, Conservation and Recycling 198, Art. No. 107122. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107122.

Ramin, M. von; Schneider, J.; Eberhardt, D.; Stolz, A. (2023): **Quantifying the debris hazard from explosions.** In: Proceedings of the 6th International Conference on Protective Structures (ICPS6). Auburn, USA, 14.-17.05.2024, S. 259–271.

Rehak, D.; Lovecek, T.; Hromada, M.; Walker, N.; Häring, I.: **Critical infrastructures resilience in the context of a physical protection system.** In: Advances in Engineering and Information Science Toward Smart City and Beyond, Bd. 5, S. 1–33.

Reich, S.; Goesmann, M.; Heunoske, D.; Schäffer, S.; Lück, M.; Wickert, M.; Osterholz, J. (2023): **Change of dominant material properties in laser perforation process with high-energy lasers up to 120 kilowatt.** In: Scientific reports 13 (1), Art. No. 21611. DOI: 10.1038/s41598-023-48511-9.

Reich, S.; Goesmann, M.; Lück, M.; Osterholz, J. (2023): **Laser penetration of metal targets with high powers of up to 120 kW.** In: High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects VI. Proceedings Volume 12739. SPIE Security + Defence. Amsterdam.

Richter, A.; Walz, T. P.; Dhanani, M.; Häring, I.; Vogelbacher, G.; Höflinger, F. et al. (2023): **Components and their failure rates in autonomous driving.** In: Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.-08.09.2023.

Rietkerk, R.; Heine, A.; Riedel, W. (2023): **Physics-informed machine learning model for prediction of long-rod penetration depth in a semi-infinite target.** In: International Journal of Impact Engineering 173 (1–4), Art. No. 104465. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104465.

Rietkerk, R.; Riedel, W.; Heine, A. (2023): **Testing a machine learning model for long-rod penetration.** In: Ballistics 2023. Proceedings of the 33rd International Symposium on Ballistics. Unter Mitarbeit von Frederik (ed.) Coghe. Bruges, 16.-20.10-2023: DEStech Publications.

Rosin, J.; Roller, C.; Solass, J.; Stocchi, A.; Stolz, A. (2023): **»Multischutz« – A multifunctional component system to protect people from the effects of explosion events.** In: Proceedings of the 6th International Conference on Protective Structures (ICPS6). Auburn, USA, 14.-17.05.2024, Art. No. 1029.

Sauer, C.; Burtsche, J.; Heine, A.; Roller, C.; Riedel, W. (2023): **High-velocity impact experiments and quantitative damage evaluation for finite ultra-high-performance concrete targets.** In: International Journal of Protective Structures. DOI: 10.1177/20414196231216751.

Schaechtle, T.; Heim, C.; Reindl, L.; Rupitsch, S.; Bruckner, G.; Binder, A. (2023): **Energy-Autonomous Wireless Sensor Node for Monitoring of Wind Turbine Blades.** In: SMSI 2023 Conference – Sensor and Measurement Science International, S. 106–107.

Schaechtle, T.; Höflinger, F.; Fischer, G. K. J.; Helmerich, J.; Häring, I.; Rupitsch, S. J. (2023): **Low-power ultrasonic wake-up through metal.** In: 2023 IEEE 13th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Aveiro, Portugal, 04.09.-06.09.2023, S. 41–44.

Schaechtle, T.; Köhler, H.; Helmerich, J.; Fischer, G. K. J.; Gabbrielli, A.; Höflinger, F.; Rupitsch, S. J. (2023): **Energieeffiziente akustische Kommunikation durch Metall für drahtlose Sensoranwendungen.** In: tm – Technisches Messen 90 (s1), S. 103–107. DOI: 10.1515/teme-2023-0077.

Schäfer, F.; Schimmerohn, M.; Horch, C.; Ledford, N.; Schäfer, K.; Maue, T. et al. (2023): **The multispectral mid-wave infrared (MWIR) camera payload of nanosatellite ERNST.** In: Proceedings of SPIE 12737, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XX. SPIE Security + Defence. Amsterdam.

Schou, J.; Hirzberger, J.; Orozco Suárez, D.; Albert, K.; Albelo Jorge, N.; Appourchaux, T. et al. (2023): **The ratio of horizontal to vertical displacement in solar oscillations estimated from combined SO/PHI and SDO/HMI observations.** In: Astronomy & Astrophysics 673, A84. DOI: 10.1051/0004-6361/202345946.

Schroven, K.; Lickert, B.; Köpke, C.; Stolz, A. (2023): **Initial framework for a generalized and quantitative resilience evaluation of an evolving power supply system.** In: Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.-08.09.2023, S. 2081–2088.

Signetti, S.; Heine, A. (2023): **Corrigendum to 'Transition regime between high-velocity and hypervelocity impact in metals – A review of the relevant phenomena for material modeling in ballistic impact.** In: International Journal of Impact Engineering 175, Art. No. 104546. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104546.

Signetti, S.; Heine, A. (2023): **Quantification of the kinetic energy conversion to temperature increase in metal-on-metal impacts up to hypervelocity conditions by molecular dynamics simulation.** In: Journal of Dynamic Behavior of Materials 9 (2), S. 240–246. DOI: 10.1007/s40870-022-00362-7.

Signetti, S.; Heine, A. (2024): **Dependence of impact regime boundaries on the initial temperatures of projectiles and targets.** In: Defence Technology 31, S. 49–57. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.003.

Signetti, S.; Klomfass, A.; Riedel, W.; Putzar, R.; Heine, A. (2023): **Simulation of blast propagation and structural effects**

of accidental hydrogen-air-mixture explosion in a two-stage light-gas gun laboratory for hypervelocity impact experiments. In: Journal of Loss Prevention in the Process Industries 85, Art. No. 105138. DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105138.

Soot, T.; Dlugosch, M.; Fritsch, J.; Ichinose, N.; Hiermaier, S.; Duddeck, F. (2023): **'Grey-Box-Processing': a novel validation method for use in vehicle safety applications.** In: Engineering with Computers 39 (4), S. 2677–2698. DOI: 10.1007/s00366-022-01622-9.

Srivastava, K.; Köpke, C.; Walter, J.; Faist, K.; Berry, J. M.; Porretti, C.; Stolz, A. (2023): **Modelling and simulation of railway networks for resilience analysis.** In: S. et al. Katsikas (Hg.): Computer Security. ESORICS 2022 International Workshop. ESORICS 2022, Bd. 13785: Springer (Lecture Notes in Computer Science), S. 308–320.

Stilz, M.; Eugster, S. R.; Harsch, J.; Gutmann, F.; Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (2023): **A second-gradient elasticity model and isogeometric analysis for the pantographic ortho-block.** In: International Journal of Solids and Structures 280 (7), Art. No. 112358. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2023.112358.

Straßburger, E.; Bauer, S.; Pfaff, A. (2023): **Spaced targets with additively manufactured titanium perturbation structures.** In: Ballistics 2023. Proceedings of the 33rd International Symposium on Ballistics. Unter Mitarbeit von Frederik (ed.) Coghe. Bruges, 16.-20.10-2023: DEStech Publications, S. 2083–2097.

Trube, N.; Matt, P.; Jenerowicz, M.; Ballal, N.; Soot, T.; Fressmann, D. et al. (2023): **Plausibility assessment of numerical cyclist to vehicle collision simulations based on accident date.** In: 2023 IRCOBI Conference Proceedings. International Research Council on the Biomechanics of Injury. Cambridge, UK, 13.-15.09.2023, S. 113–135.

Tu, H.; Yu, Q. J.; Tan, K. H.; Fung, T. C.; Riedel, W. (2024): **FEM- and ANN-based design of CFRP-strengthened RC walls under close-in explosions.** In: Structures 61 (1), Art. No. 105930. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105930.

Ungerland, J.; Denninger, R.; Werner, D.; Schroven, K.; Lickert, B.; Köpke, C.; Stolz, A. (2023): **Improving power system resilience based on grid-forming converter control and real-time monitoring.** In: 8th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID). Karlsruhe, 16.-18.10.2023, S. 1–6.

Veltrup, M.; Krüger, T.; Wendt, F.; Lück, M.; Rütters, M.; Lukasczyk, T. (2024): **Laserabtragsprozesse hören und autonom nachregeln.** In: Adhäsion Kleben & Dichten 68 (3), S. 36–41. DOI: 10.1007/s35145-024-1614-x.

Vilà, A.; Gómez-Núñez, A.; Alcobé, X.; Palacios, S.; Puig Walz, T.; López, C. (2023): **Influence of the nature of aminoalcohol on ZnO films formed by sol-gel methods.** In: Nanomaterials 13 (6). DOI: 10.3390/nano13061057.

Walz, T. P.; Mopuru, S. K. R.; Vogelbacher, G.; Richter, A.; Höflinger, F.; Häring, I.; Stolz, A. (2023): **Markov modelling for autonomous vehicle safety assessment: Numerical modularization to avoid system state-explosion.** In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2023). Bilbao, 24.-28.09.2023.

Watson, E.; Sandoval, L.; Durr, N.; Ledford, N.: **Simulating impact-induced satellite breakups with a discrete element method.** In: Proceedings of the 74th International Astronautical Congress.

Watson, E.; Sandoval, L.; Durr, N.; Ledford, N. (2024): **Simulating impact-induced satellite breakups with a discrete element method.** In: Acta Astronautica 219 (9), S. 428–437. DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.03.032.

Wicker, M.; Ates, C.; Okraschevski, M.; Holz, S.; Koch, R.; Bauer, H.-J. (2023): **Modeling multivariate spray characteristics with Gaussian mixture models.** In: Energies 16 (19), Art. No. 6818. DOI: 10.3390/en16196818.

Yang, D.; Gizon, L.; Barucq, H.; Hirzberger, J.; Orozco Suárez, D.; Albert, K. et al. (2023): **Direct assessment of SDO/HMI helioseismology of active regions on the Sun's far side using SO/PHI magnetograms.** In: Astronomy & Astrophysics 674, A183. DOI: 10.1051/0004-6361/202346030.

Yeo, K. L.; Krivova, N. A.; Solanki, S. K.; Hirzberger, J.; Orozco Suárez, D.; Albert, K. et al. (2023): **Reconstruction of total solar irradiance variability as simultaneously apparent from Solar Orbiter and Solar Dynamics Observatory.** In: Astronomy & Astrophysics 679, A25. DOI: 10.1051/0004-6361/202345872.

Yin, K.; Cao, B.; Todt, J.; Gutmann, F.; Tunçay, H. F.; Roth, A. et al. (2023): **Manufacturing size effect on the structural and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V microbeams.** In: Journal of Materials Science & Technology 149, S. 18–30. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.12.006.

Publikationen (ohne Peer Review)

Bermbach, T.; Ramin, M. von (2023): **Ableitung baulicher Schutzvorkehrungen für kritische Infrastrukturen der Luftwaffe in Szenaren der Landesverteidigung.** In: CPM Forum für Rüstung, Streitkräfte und Sicherheit (3), S. 106–110.

Busch, S. (2023): **Advanced automation and augmented reality based remote assistance for agile satellite integration and test.** In: Workshop on Simulation and EGSE for Space Programmes (SESP).

Fehling-Kaschek, M.; Lüttner, F.; Brockt, C.; Häring, I. (2023): **Automated detection of critical driving scenarios through AI-assisted algorithms.** In: Proceedings of the 10th International AVL Symposium on Development Methodology. Wiesbaden, 08.11.2023, S. 3–14.

Fischer, K.; Tang, J. H.; Huschka, M.; Tang, Y. S.; Dlugosch, M.; Stilling, J. et al. (2023): **Datenbasierte kommunale Resilienzbewertung in Krisen – Bewertung und Steigerung der Krisenfestigkeit für die Anwendungsfälle Pandemie und Extremwetter.** In: Transforming Cities (1), S. 46–50. Online verfügbar unter https://www.transforming-cities.de/wp-content/uploads/2023/02/TranCit-1-2023_Inhalt.pdf.

Heilig, G.; May, M. (2023): **Comparison of experimental, numerical and analytical approaches to HRAM events.** In: Proceedings of the AIAA SciTech 2023 Forum. National Harbor.

Holz, S.; Klomfass, A.; Rambousky, R.; Wolf, L. (2023): **Nuclear blast effects in urban and maritime environments.** In: 26th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS26). Wollongong, Australia, 03.-08.12.2023.

Jenerowicz, M.; Matt, P.; Boljen, M.; Bauer, S.; Straßburger, E.; Hiermaier, S. (2023): **Assessment of GHBMC M50-P response for behind armour blunt trauma – impact loading with approximation of 3D surface of the armour back face displacement.** In: 2023 IRCOBI Conference Proceedings. International Research Council on the Biomechanics of Injury. Cambridge, UK, 13.-15.09.2023, S. 594–604.

Jordaan, H. W.; Busch, S.; Garbe, D. (2023): **Towards payload-in-loop for improved earth observation efficiency.** In: 14th IAA Symposium on Small Satellites for Earth System Observation.

Luna Mejia, M. J.; Schäfer, K.; Heim, C.; Horch, C.; Schäfer, F.; Rupitsch, S. J. (2023): **Hypervisor evaluation for virtualization of a high-performance small satellite payload.** In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023. Stuttgart, 19.-21.09.2023. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. Online verfügbar unter https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1%5bdocument_id%5d=610318.

Plech, A.; Ziefuss, A. R.; Levantino, M.; Streubel, R.; Reich, S.; Reichenberger, S. (2023): **Finding the best efficiency for laser machining of gold colloids.** In: Complex Systems and Biomedical Sciences. Scientific Highlights: ESRF – European Synchrotron Radiation Facility, S. 59–60.

Reich, S.; Goesmann, M.; Heunoske, D.; Schäffer, S.; Lück, M.; Wickert, M. et al. (2023): **Change of dominant material properties in laser perforation process with high-energy lasers up to 120 kilowatt.** In: Research Square. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3191795/v1.

Reich, S.; Heunoske, D.; Lück, M.; Osterholz, J. (2023): **High-throughput laser hardening of steel with a 120 kW laser.** In: Laser Congress 2023 (ASSL, LAC), Technical Digest Series. Tacoma, WA, USA, 08.-12.10.2023: Optica Publishing Group, JM4A.21.

Rosin, J.; Stocchi, A.; Ruiz-Ripoll, M. A.; Loreth, J.; Roller, C.; Basavaraju, R.; Stolz, A. (2023): **Blast mitigation by smart coating: experimental and numerical investigation of polyurea coated concrete panels.** In: 26th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS26). Wollongong, Australia, 03.-08.12.2023.

Ruiz-Ripoll, M. A.; Brenneis, C.; Roller, C. (2023): **Optimization of Split Hopkinson Pressure Bar diagnostics for characterization of granular materials.** In: Proceedings of the 34th International Symposium on Shock Waves (ISSW34). Daegu, Korea, 16.-21.07.2023.

Ruiz-Ripoll, M. A.; Dirlewanger, H.; Roller, C.; Schmitt, D.; Stolz, A. (2023): **Soil filled perimeter walls under blast.** In: 26th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS26). Wollongong, Australia, 03.-08.12.2023.

Schäfer, K.; Horch, C.; Jain, A. K.; Brunn, A.; Bierdel, M.; Schäfer, F. (2023): **After six months successful operations in low earth orbit: data processing system architecture and lessons learned from the LisR mission.** In: Proceedings of the European Data Handling & Data Processing Conference for Space (EDHPC 2023). Juan-Les-Pins, 02.-06.10.2023.

Vorträge

Ballal, N.; Soot, T.; Dlugosch, M. (2023): **Metrics for adaptive training data generation for data-centric AI applications in engineering.** NAFEMS World Congress. Tampa, FL, USA, 16.05.2023.

Ballal, N.; Soot, T.; Dlugosch, M. (2023): **Metrics for adaptive training data generation for data-centric AI applications in engineering.** NAFEMS-Seminar »Artificial Intelligence und Machine Learning in der CAE-basierten Simulation«. München, 23.10.2023.

Becker, M.; Imbert, M.; May, M. (2023): **An inverse approach treating large rotations to simulate composite single-layer peeling-based disassembly.** ECCOMAS Thematic Conference and IACM Special Interest Conference Highly Flexible Slender Structures (HFSS 2023). Rijeka, Croatia, 25.09.2023.

Boljen, M.; Jenerowicz, M.; Bauer, S.; Straßburger, E. (2023): **Combining protective clothes with human body models for finite element ballistic impact simulations.** Clothing-Body Interaction Joint International Conference. Berlin, 28.03.2023.

Boljen, M.; Matt, P.; Jenerowicz, M. (2023): **Applying the GHBMC M50 and F05 models with soft ballistic protection for BABT injury assessment.** GHBMC Users' Workshop 2023. Virtual Event, 24.08.2023.

Dlugosch, M. (2023): **A method for efficient generation and optimization of simulation-based training data for data-driven injury prediction in VRU-vehicle accident scenarios.** 27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Yokohama, 05.04.2023.

Dörfler, M. (2023): **Modeling initiation in STT experiments on the mesoscale.** HERSHE PA Meeting. WTD 91, Meppen, 07.11.2023.

Dörfler, M.; Sauer, M. (2023): **Status of mesoscale simulations and current results for non-shock loading.** HERSHE PA Meeting. Eglin, AFB, Florida, USA, 02.04.2023.

Fehling-Kaschek, M.; Lüttner, F.; Brockt, C.; Häring, I.; Schyr, C. (2023): **Automated detection of critical driving scenarios through AI-assisted algorithms.** 10. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik. Wiesbaden, 07.11.2023.

Fischer, K.: **Datengetriebene kommunale Resilienzbewertung – Entscheidungsunterstützung mit heterogenen Datenquellen im Krisenfall.** Workshop »Digitalisierung meets Überflutungswarnung« des Kompetenzzentrums für digitale Wasserwirtschaft. Essen.

Fischer, K. (2023): **Datengetriebene Bewertung der Krisenfestigkeit von Kommunen – Resilienzbewertung mittels Datenraumfunktionalitäten.** Future Security. Forum für Sicherheits- und Verteidigungsforschung. Berlin, 08.02.2023.

Fischer, K. (2023): **Simulationsbasierte Schutzauslegung von Veranstaltungen und öffentlichen Plätzen gegen Überfahrtaten.** IBIT 23, 9. Fachtagung Veranstaltungssicherheit. Köln, 08.11.2023.

Gerster, T.; Harwick, W. (1023): **Werkstoffcharakterisierung von Metallen am Fraunhofer EMI.** ZwickRoell testXpo 2023 – 31. Fachmesse für Prüftechnik. Ulm, 16.10.1023.

Gerster, T.; Harwick, W. (2023): **Werkstoffcharakterisierung von Metallen am Fraunhofer EMI.** testXpo – 31. Fachmesse für Prüftechnik. Ulm, 18.10.2023.

Goesmann, M. (2023): **Aktuelle Untersuchungen zur Laserwirkung bis 120 kW.** Institute-Treffen TF20.x.10 Grundlagen Lasertechnologien 2023, 24.01.2023.

Grenier, R.; Imbert, M.; Hohe, J.; Balle, F.; May, M. (2023): **Thermally assisted peeling as a high-quality recycling process for thermoplastic wound composites.** International Conference on Composite Materials (ICCM23). Belfast, 30.07.2023.

Grunwald, C. (2024): **Fragmentierung von Beton unter dynamischer Belastung – eine Multiskalen-Methode.** Forschungskolloquium der MFPA Weimar, 18.01.2024.

Heine, A.; Signetti, S. (2023): **Dependence of impact regime boundaries on the initial temperatures of projectiles and targets.** 33rd International Symposium on Ballistics. Brügge, 18.10.2023.

Holz, S. (2023): **The LOKI-PED project – Lithium batteries in pOrtable electronic devices – risK of fIre and smoke.** IATA World Safety and Operations Conference 2023. Hanoi, Vietnam, 20.09.2023.

Horch, C. (2023): **Redundant imaging payload data processing system based on a heterogeneous MPSoC.** European Data Handling & Data Processing Conference for Space. Juan-Les-Pins, 02.10.2023.

Jain, A. K.; Srivastava, K.; Walz, T. P.; Häring, I.; Vogelbacher, G.; Höflinger, F.; Finger, J. (2023): **Deep behavioral replication of markov models for autonomous cars using neural networks.** 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 04.09.2023.

Jenerowicz, M. (2023): **Injury risk prediction for behind armour blunt trauma using human body models and enhanced anthropomorphic test devices.** – Arbeitssitzung »Risikobewertung von Nichtletalen Wirkmitteln durch Nutzung geeigneter Surrogate« WTD 52 Geschäftsfeld 320. Schneizlreuth, 15.11.2023.

Köpke, C.; Schroven, K.; Stolz, A. (2023): **Hybrid threats on air traffic.** 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.09.2023.

Léost, Y.; Bösl, P.; Matt, P.; Kurfiß, M.; Boljen, M. (2023): **Untersuchung der Kollision von E-Scooter-Fahrern mit Bordsteinkanten.** Dummy-Crashtest-Konferenz. Münster, 03.07.2023.

Luna Mejia, M. J. (2023): **Hypervisor evaluation for virtualization of a high-performance small satellite payload.** Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023. Stuttgart, 19.09.2023.

Lüttner, F. (2023): **Realistische Simulation von kritischen Situationen im Straßenverkehr – Datengetriebene Simulationsoptimierung.** Carhs Safety Week. Würzburg, 25.05.2023.

Lüttner, F. (2023): **An approach to systematic data acquisition and data driven simulation for the safety testing of automated driving functions.** IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Bilbao, 28.10.2023.

Matura, P.; Signetti, S.; Moser, S.; Sandoval, L.; Durr, N.; Watson, E. et al. (2023): **Pellet fragmentation: Modeling and simulation of the shattering process related to the SPI technology for the ITER DMS.** ITER Headquarters. France, 08.02.2023.

May, M. (2023): **Verwundbarkeit von Luftfahrtstrukturen bei Kollisionen mit Vögeln und Drohnen.** Workshop AIRBUS meets Fraunhofer. Bremen, 28.04.2023.

Meyer, R. (2023): **Towards a specification of behaviour models for crowds.** Social Simulation Conference 2023. Glasgow, UK, 04.09.2023.

Putzar, R. (2023): **From experiment to equation: Generating ballistic limit equations.** 3rd European Hypervelocity Impact Risk Assessment Forum experimental and numerical testing. Puybrun, France, 10.10.2023.

Ramin, M. von (2023): **Fassadenschutz von Gebäuden bei Explosion, Beschuss und Anprall.** Fachtagung »Zwischen Sicherheit und Baukultur – Materielle Sicherheit im Bundesbau«. Berlin, 02.03.2023.

Ramin, M. von (2023): **Impakt und Beschuss – Phänomene, Lastfall und Wirkung, Normen und Vorschriften.** Fachtagung »Zwischen Sicherheit und Baukultur – Materielle Sicherheit im Bundesbau«. Berlin, 02.03.2023.

Ramin, M. von; Gebbeken, N. (2023): **Posträume – Sicherheitsaspekte.** Fachtagung »Zwischen Sicherheit und Baukultur – Materielle Sicherheit im Bundesbau«. Berlin, 02.03.2023.

Ramin, M. von; Schneider, J.; Eberhardt, D.; Stolz, A. (2023): **Quantifying the debris hazard from explosions.** 6th International Conference on Protective Structures, ICPS6. Auburn, AL, USA, 15.05.2023.

Reich, S. (2023): **Wirkung von Nanosekunden-Laserpulsen auf metallische Ziele.** Institute-Treffen TF20.x.10 Grundlagen Lasertechnologien 2023, 24.01.2023.

Reich, S. (2023): **Laser penetration of metal targets with high powers of up to 120 kW.** SPIE Security + Defence, 03.09.2023.

Rietkerk, R.; Riedel, W.; Heine, A. (2023): **Testing a machine learning model for long-rod penetration.** 33rd International Symposium on Ballistics. Brügge, 17.10.2023.

Roller, C.; Ramin, M. von (2023): **Shock tube testing of soil-filled wall elements – Applicability of high-speed diagnostics.** 6th International Conference on Protective Structures, ICPS6. Auburn, AL, USA, 14.05.2023.

Roller, C.; Rosin, J.; Solass, J.; Stocchi, A.; Stolz, A. (2023): **Multischutz – A multifunctional component system to protect people from the effects of explosion events.** 6th International Conference on Protective Structures, ICPS6. Auburn, AL, USA, 15.05.2023.

Rosin, J.; Roller, C.; Stocchi, A.; Solass, J.; Stolz, A. (2023): **Multifunktionales Bauteilsystem zum Schutz von Personen vor den Auswirkungen von Explosionsereignissen.** Fachkongress »Forschung für den Bevölkerungsschutz«. Bonn, 13.01.2023.

Rosin, J.; Stocchi, A.; Ruiz-Ripoll, M. A.; Roller, C.; Loreth, J. (2023): **Blast mitigation by smart coating: Experimental and numerical investigation of polyurea coated concrete panels.** 26th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS26). Wollongong, Australia, 08.12.2023.

Ruiz-Ripoll, M. A.; Brenneis, C.; Roller, C. (2023): **Optimization of Split Hopkinson Pressure Bar diagnostics for characterization of granular materials.** Proceedings34th International Symposium on Shock Waves (ISSW34). Daegu, Korea, 16.07.2023.

Ruiz-Ripoll, M. A.; Dirlewanger, H.; Roller, C.; Schmitt, D.; Stolz, A. (2023): **Soil filled perimeter walls under blast.** 26th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS26). Wollongong, Australia, 03.12.2023.

Sauer, M. (2023): **Simulations of planar plate impact tests with pure binders HX 497 and HX 522.** HERSHE PA Meeting. WTD 91, Meppen, 07.11.2023.

Schäfer, K. (2023): **After six months successful operations in low earth orbit: data processing system architecture and lessons learned from the LisR mission.** European Data Handling & Data Processing Conference for Space. Juan-Les-Pins, 05.10.2023.

Schaufelberger, B.; Kisters, T.; Altes, A.; Schopferer, S. (2023): **Li-ion battery cells under crash loading: abuse testing and finite element modeling.** CAE Grand Challenge. Hanau, 26.04.2023.

Schneider, J.; Ramin, M. von (2023): **EXERTER – Ein EU-H2020-Projekt zur Vernetzung von Expert/innen aus dem Bereich der Sicherheit von Explosivstoffen.** Fachkongress »Forschung für den Bevölkerungsschutz«. Bonn, 12.01.2023.

Schneider, J.; Ramin, M. von (2023): **Security by Design: Retrofit hardening of apartment structures on the German compound in Kabul.** International Physical Security Forum IPSF. Paris, 16.05.2023.

Schroven, K.; Fehling-Kaschek, M.; Voigt, O.; Jain, A. K.; Brockt, C. (2023): **Resilience analysis of critical infrastructure networks.** QuantumBW Fokustreffen mit Schwerpunkt Quantensoftware-Engineering, 2023.

Schroven, K.; Lickert, B.; Köpke, C.; Stolz, A. (2023): **Initial framework for a generalized and quantitative resilience evaluation of an evolving power supply system.** 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023). Southampton, UK, 03.09.2023.

Stolz, A. (2023): **Ein Ansatz zur Steigerung der Resilienz der Stromnetze im Kontext wachsender Herausforderungen.** Sustainability Days 2023. Basel, 28.03.2023.

Stolz, A. (2023): **Ansätze zum Resilience Engineering für Kommunen.** Sitzung der lokalen Partnerschaft – LoPa – im Förderprogramm Wachstum und nachhaltige Erneuerung. Neu-Isenburg, 15.06.2023.

Stolz, A. (2023): **Resilience Engineering: Ein Konzept für mehr Sicherheit in unsicheren Zeiten.** Smart Region Day am BadenCampus. Breisach, 08.12.2023.

Strahringer, S.; Imbert, M.; Balle, F. (2023): **Single-layer recovery from production offcuts of polymer composites using controlled impact-induced delamination.** Euromat 2023. Frankfurt, 03.09.2023.

Straßburger, E. (2023): **Spaced targets with additively manufactured titanium perturbation structures.** 33rd International Symposium on Ballistics. Brügge, 16.10.2023.

Trube, N.; Matt, P.; Jenerowicz, M.; Ballal, N.; Soot, T.; Fressmann, D. et al. (2023): **Plausibility assessment of numerical cyclist to vehicle collision simulations based on accident data.** 2023 IRCOBI Conference. Cambridge, UK, 13.09.2023.

Watson, E.; Sandoval, L.; Durr, N.; Ledford, N. (2023): **Simulating impact-induced satellite breakups with a discrete element method.** 74th International Astronautical Congress. Baku, Azerbaijan, 02.10.2023.

Seminarvorträge am EMI

Bauer, S. (2023): **Modellbildung für transparente Schutzwerkstoffe – Quantitative Modellbildung zur Materialvorschädigung durch dem Projektil vorauslaufende mechanische Wellen.** EMI-Symposium 2023, 06.12.2023.

Burtsche, J. (2023): **Charakterisierung der Schädigung von Beton im Rahmen meines DH-Studiums.** EMI-Hausseminar. Freiburg, 27.04.2023.

Durr, N. (2023): **Dynamic loading of concrete and other geomaterials.** EMI MD-CUBE, 12.07.2023.

Fischer, K. (2023): **Datengetriebene kommunale Resilienzbewertung in Bezug auf Extremwetter und Pandemie – Übersicht des BMBF-Projekts HERAKLION.** EMI-Hausseminar, 20.07.2023.

Fischer, K. (2023): **Datengetriebene kommunale Resilienzbewertung in Bezug auf Extremwetter und Pandemie – Übersicht des BMBF-Projekts HERAKLION.** SIRIOS Fachgespräche. Berlin, 29.08.2023.

Heine, A. (2023): **Wirkmechanismen zur Abwehr hypersonischer Bedrohungen – Neue Herausforderungen infolge nicht-ballistischer Flugbahnen.** EMI-Symposium 2023 »Forschung im Dialog: Wirkung und Schutz«. EMI Freiburg, 06.12.2023.

Holz, S. (2023): **Ausgewogener Nuklearschutz – Simulationsmodelle für die Wirkungsanteile Blast und Hitzeblitz auf Gefechtsfahrzeuge.** EMI-Symposium 2023, 07.12.2023.

Holz, S.; Schaufelberger, B. (2023): **Batteriesicherheit in der Luftfahrt.** EMI-Hausseminar, 30.03.2023.

Jung, M. (2023): **FastTrack-Projekt 3Druckverschluss: 3D-gedruckte reversible Metall-Faserverbund-Verbindungen.** EMI-Hausseminar. EMI Freiburg, 23.10.2023.

Lüttner, F.: **Verkehrssimulationsmodell als Grundlage für die Prognose von Verkehrsunfallstatistiken im zukünftigen Verkehrsgeschehen.** EMI-Doktorandenseminar. Freiburg.

Matura, P.; Osterholz, J. (2023): **Trägheit als Tugend: Kernfusionsforschung und Beitragsmöglichkeiten des EMI.** EMI-Hausseminar, 30.03.2023.

Matura, P.; Signetti, S.; Moser, S.; Sandoval, L.; Durr, N.; Watson, E. et al. (2023): **Beitrag zur Kernfusionsforschung – Den Folgen von Plasmastörungen in Kernfusionsreaktoren entgegenwirken: Anwendung der EMI-Kompetenzen zu Fragmentierungsmodellen.** EMI-Symposium 2023, 06.12.2023.

May, M. (2023): **Drohnenimpakt – Erweiterte Anforderungen an die sichere Auslegung von Flugzeugen und Hubschraubern.** EMI-Symposium 2023. EMI Freiburg, 06.12.2023.

Niklas, W. (2023): **Aktuelle Arbeiten zur softwarebasierten Sicherheitsanalyse beim Freifeld-Einsatz.** HEL-Institutstreffen. EMI Freiburg, 24.01.2023.

Reich, S. (2023): **High-throughput-Laserhärten von Stahl mit dem 120 kW-Laser.** EMI-Hausseminar, 25.05.2023.

Rietkerk, R. (2023): **Anwendung der Methoden künstlicher Intelligenz für Wirkung und Schutz – Maschinelles Lernen für die Ableitung von Modellparametern dynamischer Werkstoffmodelle.** EMI-Symposium 2023 »Forschung im Dialog: Wirkung und Schutz«. EMI Freiburg, 06.12.2023.

Rietkerk, R. (2023): **Maschinelles Lernen für die Ableitung von Modellparametern dynamischer Werkstoffmodelle.** EMI-Hausseminar. Efringen-Kirchen, 30.11.2023.

Rietkerk, R. (2023): **Anwendung der Methoden künstlicher Intelligenz für Wirkung und Schutz – Maschinelles Lernen für die Ableitung von Modellparametern dynamischer Werkstoffmodelle.** EMI-Symposium 2023. Freiburg, 06.12.2023.

Rosin, J.; Delleske, C.; Lüttner, F. (2023): **GUARDIAN – gathered sensor unit for automatic and rapid detection of human infrared signature in acute need.** EMI-Hausseminar. EMI Freiburg, 26.01.2023.

Ruiz-Ripoll, M. A.; Thielen, M. (2023): **Aktuelle Forschungsthemen rund um innovativen Beton: Kryogener Beton und 3D-gedruckter Beton.** EMI-Hausseminar, 25.10.2023.

Sättler, A.; Aurich, H. (2023): **Wirkmechanismen und Zielannäherung – Anforderungen an zukünftige Gefechtsköpfe zur Wirkung gegen gepanzerte Landplattformen.** EMI-Symposium 2023 »Forschung im Dialog: Wirkung und Schutz«. EMI Freiburg, 07.12.2023.

Soot, T. (2023): **»Grey-Box-Processing« – Integrales Validierungsverfahren für Struktursimulationen in der Fahrzeugsicherheit.** 49. Kuratoriumssitzung des Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik Ernst-Mach-Institut, EMI. EMI Freiburg, 07.07.2023.

Soot, T. (2023): **»Grey-Box-Processing« – Neuartiger Verfahrensansatz zur Validierung von kurzzeitdynamischen Simulationen am Beispiel Fahrzeugcrash.** EMI-Symposium 2023, 07.12.2023.

Vetter, J.; Rosin, J. (2023): **SIRIOS Pilotprojekt 1: SchIRm – Strategien zum Schutz kritischer Infrastrukturen bei umweltverursachten Gefährdungslagen in urbanen Räumen.** EMI-Hausseminar. EMI Freiburg, 26.04.2023.

Lehrgänge der Carl-Cranz-Gesellschaft

Straßburger, E. (2023): **Endballistik kleinkalibriger Geschosse – Keramik für den ballistischen Schutz.** Seminar VS 1.43 »Endballistik – Grundlagen und Anwendungen«. Saint Louis, 20.06.2023.

Lehre

Lehrveranstaltungen

Asa, P.; Neuhäuser, S. (Wintersemester 2023/2024): **Digital and Analogue Formfinding and Optimization.** TU Berlin.

Balle, F. (Sommersemester 2023): **Drahtbonding auf Micro-CPV-Modulen – Untersuchung verschiedener Materialien für die Oberflächenkontaktierung.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Balle, F. (Wintersemester 2023/2024): **Lightweight Design and Materials.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Balle, F. (Wintersemester 2023/2024): **Materials Selection for Sustainable Engineering.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Balle, F. (Sommersemester 2023): **Nachhaltige Materialien.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Balle, F. (Sommersemester 2023): **Technische Funktionswerkstoffe.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Balle, F. (Wintersemester 2023/2024): **Werkstofftechnik und -prozesse.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Balle, F.; Hiermaier, S.; Kilchert, S. (Sommersemester 2023): **SSE-Studienseminar.** Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Häring, I. (Sommersemester 2023): **Funktionale Sicherheit – Aktive Resilienz / Functional Safety: Active Resilience.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Häring, I. (Sommersemester 2023): **Quantitative Risikoanalyse.** Hochschule Furtwangen.

Häring, I. (Wintersemester 2023/2024): **Resilienzquantifizierung / Quantification of Resilience.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Häring, I. (Wintersemester 2023/2024): **Risk and Resilience Analysis.** Hochschule Furtwangen.

Harwick, W. (Wintersemester 2023/2024): **Werkstoffe.** Vorlesung. DHBW Lörrach.

Hiermaier, S. (Sommersemester 2023): **Climate Change.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S. (Sommersemester 2023): **Grundlagen resilienter Systeme.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S. (Sommersemester 2023): **Resilienz im Brand- und Katastrophenschutz faßbar machen.** Darstellung von Anknüpfungspunkten in Resilienzkonzepte in Prävention, Aufklärung und Führung. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Ganzenmüller, G. (Sommersemester 2023): **Angewandte Finite Elemente für die Strukturmechanik.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Ganzenmüller, G. (Wintersemester 2023/2024): **Grundlagen der mechanischen Werkstoffcharakterisierung / Basics of mechancial testing.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Ganzenmüller, G. (Wintersemester 2023/2024): **Physics of Failure.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Ganzenmüller, G. (Sommersemester 2023): **Werkstoffdynamik: Werkstoffcharakterisierung / Dynamics of Materials: Material Characterization.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Ganzenmüller, G.; Schroven, K. (Wintersemester 2023/2024): **Fundamentals of Resilience.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Kilchert, S. (Wintersemester 2023/2024): **Lebenszyklusanalyse.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Kilchert, S. (Sommersemester 2023): **Material Flow Analysis.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Kilchert, S.; Ganzenmüller, G. (Wintersemester 2023/2024): **Material Life Cycles.** Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Hiermaier, S.; Matura, P. (Wintersemester 2023/2024): **Kontinuumsmechanik.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Imbert, M.; May, M.: **Composite Materials.** Vorlesung. Wintersemester 2023/2024. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Lickert, B. (Sommersemester 2023): **Resilience of Supply Networks.** Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Matura, P. (Sommersemester 2023): **Numerische Methoden in der Mathematik.** Vorlesung. DHBW Lörrach.

Osterholz, J. (Sommersemester 2023): **High-Energy-Density Physics.** Vorlesung. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Ramin, M. von (Sommersemester 2023): **Lehrbeauftragter im Masterstudiengang Katastrophenvorsorge und -Management, Unterrichtseinheit 4 »Bauliche Prävention im Bevölkerungsschutz« im Modul 5: »Ausgewählte Konzepte und Maßnahmen der Katastrophenvorsorge«.** Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Riedel, W. (Sommersemester 2023): **Schutz baulicher Infrastrukturen.** Hochschule Furtwangen.

Sauer, M. (Wintertrimester 2023 und 2024): **Laborpraktikum.** Universität der Bundeswehr München.

Sauer, M. (Wintertrimester 2023 und 2024): **Numerische Simulationsverfahren.** Vorlesung. Universität der Bundeswehr München.

Sauer, M. (Wintertrimester 2023 und 2024): **Werkstoffcharakterisierung.** Vorlesung. Universität der Bundeswehr München.

Stolz, A. (Sommersemester 2023): **Design and Monitoring of Large Urban Infrastructures.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Stolz, A. (Wintersemester 2023/2024): **Structural Robustness: Resilient Designs.** Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Stolz, A. (Wintersemester 2023/2024): **Strukturelle Sicherheit.** Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Stolz, A.; Lickert, B. (Sommersemester 2023): **Resilience of Supply Networks.** Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Gastwissenschaftler

Dr. Iaci Miranda Pereira aus dem Brazilian Army Technological Center vom 1.3.2023 bis zum 30.6.2023.

Promotionen

Grunwald, C. (2023): **Numerische Modellierung der Fragmentierung von Beton unter kurzzeitdynamischer Belastung mit Hilfe einer Zwei-Skalen-Kopplung.** Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Holz, S. (2023): **Multivariate Statistische Modellierung der Tropfenstartbedingungen für Euler-Lagrange-Simulationen von Triebwerksbrennkammern.** Dissertation. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Bachelor- und Masterarbeiten

Burtsche, J. (2024): **Simulationsbasierte Analysen zur Ableitung von Ingenieurmodellen für die Starrkörperpenetration in ultrahochfesten Beton.** Masterarbeit. EMI-Bericht A 02/24. Hochschule Offenburg.

Denli, B. (2023): **Innovative design for the recycling for composites.** Master Thesis. EMI-Report A 35/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Dhanani, M. (2023): **Failure and Recovery Models of Autonomous vehicles subsystems for Markov safety simulation.** Master Thesis. EMI-Report A 20/23. Hochschule Nordhausen.

Dommershausen, T. (2023): **Numerische Betrachtung des Druckverlustes einer stationären, inkompressiblen Strömung durch ein granulares Medium.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 41/23. DHBW Mannheim.

Ekbote, N. (2023): **Impact behavior of a carbon fiber reinforced polymer featuring thin-ply with an innovative bio-inspired helicoidal layup.** Master Thesis. EMI-Report A 43/23. Ernst-Abbe-Hochschule Jena.

Guillen, F. M. (2023): **Data-driven material models – quantification of strain information content in characterization tests.** Master Thesis. EMI-Report A 38/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Gutt, F. (2023): **A knowledge-graph-based approach for modeling interdependencies discovered using statistical methods on heterogenous and decentralized data for quantitative resilience analysis.** Bachelor Thesis. EMI-Report A 11/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Haridy, A. (2023): **Resilience evaluation of power grids using synchronizing network models.** Master Thesis. EMI-Report A 10/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Heitz, M. (2023): **Entwicklung einer Hochgeschwindigkeits-CT mit einem 1-kHz-Linearbeschleuniger.** Masterarbeit. EMI-Bericht A 12/23. DHBW Center for Advanced Studies.

Hilfer, E.-J. (2023): **Untersuchung 3D-gedruckter Kunststoffe hinsichtlich des mechanischen Verhaltens.** Masterarbeit. EMI-Bericht A 09/23. Hochschule Albstadt-Sigmaringen.

Huber, J. (2023): **Development and integration of variable design spaces in the topology optimization process.** Master Thesis. EMI-Report A 21/23. Hochschule Karlsruhe.

Jansen, N. (2023): **Aufbau eines Messsystem-Kanals für Photonic-Doppler-Velocimetry (PDV) mittels moderner Fertigungsverfahren.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 28/23. DHBW Mannheim.

Jasper, L. (2023): **Analyse zur Automatisierung von Werkstoffversuchen zur Gewinnung großer Datenmengen für die Anwendung von datenbasierten Methoden in der Werkstoffmodellierung.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 29/23. DHBW Mannheim.

Jehle, S. (2023): **Assessment of façade greening systems performance under blast loads.** Master Thesis. EMI-Report A 24/23. Hochschule Furtwangen.

Köhler, H. (2023): **Low power implementation of an ultrasonic communication system through metal.** Master Thesis. EMI-Report A 23/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Laerum, P. (2023): **Agentenbasierte Modellierung der Interaktion zwischen Einsatzkräften mit Personenmengen während Großveranstaltungen.** Masterarbeit. EMI-Bericht A 39/23. Hochschule Furtwangen.

Luna Mejia, M. J. (2023): **Hypervisor evaluation for virtualization of a high-performance small satellite payload.** Master Thesis. EMI-Report A 08/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Mopuru, S. K. R. (2023): **Safety analysis of autonomous driving by Markov modelling with a focus on hardware architectures.** Master Thesis. EMI-Report A 01/23. Hochschule Bremerhaven.

Moser, A. (2023): **Indikatorbasierte Charakterisierung kommunaler Resilienz als Hilfsmittel zur Bewertung der Krisenfestigkeit.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 26/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Müller, D. (2023): **Entwurf und Konstruktion von modellhaften Steuereinheiten von Lenkflugkörpern für Laserbeschussversuche.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht V 09/23. DHBW Mannheim.

Omprakash, A. S. (2023): **AI based analysis of radar data for the identification of vital signs of life.** Master Thesis. EMI-Report A 44/23. Universität Siegen.

Padariya, R. (2024): **Failure rate estimation of lane detection from CARLA Simulation for Markov Model safety assessment of autonomous driving functions.** Master Thesis. EMI Report A 01/24. Westsächsische Hochschule Zwickau.

Prajapati, B. (2023): **A comparative study of crack volume segmentation methods for dynamically damaged glass and ceramics.** Master Thesis. EMI-Report A 07/23. Leibniz-Universität Hannover.

Rinnert, T. (2023): **Calibration of an agent-based-simulation for vulnerable road user behavior on street crossings.** Master Thesis. EMI-Report A 22/23. Georg-August-Universität Göttingen.

Sandela, N. (2023): **Safety and reliability analysis of autonomous driving using Markov modeling and Deep Learning.** Master Thesis. EMI-Report A 19/23. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Savsani, M. (2023): **Numerical analysis of the structural deformation and failure of Lithium-ion pouch cell during thermal runaway.** Master Thesis. EMI-Report A 42/23. Universität Rostock.

Schuster, P. (2023): **Basic software of a monitoring and reconfiguration module for nanosatellites.** Bachelor Thesis. Graz University of Technology.

Selbiger, J. (2023): **Weiterentwicklung von dynamischen Zugund Druckprüfungen hin zu kombinierter thermischer und dynamischer Belastung.** Masterarbeit. EMI-Bericht A 06/23. Universität Stuttgart.

Singler, M. (2023): **Semantische Segmentierung von Rissen mittels Deep Learning in Computertomographie-Scans von Glas- und Keramikproben.** Masterarbeit. EMI-Bericht A 02/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Subrahmanya, S. (2023): **Finite Element Analysis of Hydrodynamic RAM (HRAM) effect due to high-speed projectile impact on a stationary tank filled with fluid.** Master Thesis. EMI-Report A 30/23. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Vayakara, M. (2023): **Criticality measures for driving scenarios of robot cars.** Master Thesis. EMI-Report A 04/23. Technische Hochschule Deggendorf.

Walter, J. (2023): **Simulation multimodaler Logistikketten unter Störeinflüssen und Nachhaltigkeitsaspekten.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 25/23. DHBW Lörrach.

Weber, N. (2023): **Untersuchung von Einflussfaktoren auf den Gehalt an Restaustenit in additiv gefertigtem 17-4PH-Stahl.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 27/23. DHBW Lörrach.

Zhou, J. (2023): **Konzeption und Bemessung einer Split- Hopkinson-Bar-Anlage zur Charakterisierung kunststoffgebundener Sprengladungen.** Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 33/23. DHBW Mannheim.

Patente, Preise, Exzellenzforschung

Patente

Früh, P. (2020): **Geschoßanordnung und deren Verwendung am 01.07.2020.** Veröffentlichungsnr: DE 10 2020 005 592.

Lüttner, F. (2023): **Method and apparatus for indicating the presence of a buried person in a building after a collapse of the building.** Veröffentlichungsnr: 11,545,020.

Rosin, J.; Delleske, C.; Lüttner, F. (2023): **Method and apparatus for indicating the presence of a buried person in a building after a collapse of the building.** Veröffentlichungsnr: US11545020B2.

Rosin, J.; Delleske, C.; Lüttner, F. (2023): **Method and apparatus for indication the presence of a buried person in a building after a collapse of the building.** Veröffentlichungsnr: EP4036885A1.

Solass, J.; Köpke, C. (2023): **System and method for determining the mass of a ship moving in water.** Veröffentlichungsnr: EP4232357A1.

Preise und Auszeichnungen

Fischer, G. K. J.: **Best Paper Award für »A Measurement Platform for the Evaluation of Sparse Acoustic Array Geometries«** auf der International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), IPIN 2023.

Horch, C.: **Fraunhofer-Preis »Technik für den Menschen und seine Umwelt« 2023.** Thema »Wasser effizienter nutzen: Neue Satellitentechnologie ermöglicht nachhaltige Landwirtschaft in Zeiten des Klimawandels«.

May, M.: **Stanford University »World's Top 2% Scientists«,** Kategorie: Impact of the last year.

May, M.: **Stanford University »World's Top 2% Scientists«,** Kategorie: Career-long.

Reich, S.: **The Best Rapid-Fire Presentation at Frontiers in Optics 2023.**

Riedel, W.: **Stanford University »World's Top 2% Scientists«,** Kategorie: Impact of the last year.

Schäfer, F.: **Stanford University »World's Top 2% Scientists«,** Kategorie: Career-long.

Evaluierte Exzellenzforschung

BMBF KMU Innovativ Beep2Blue.

BMBF-Förderung für Fraunhofer SIRIOS.

BMBF-Verbundvorhaben »Handwaffen mit selbstgedruckten Teilen – eine Risikoabschätzung (HamsTeR)«

BMWi LoCA.

BMWi RDV.

LOKI-PED — Lithium Batteries Fire/Smoke Risks in Cabin.

EU-Programm »Clean Aviation«.
Projekt »Ultra Performance Wing«.

Projekt RESIST.

Mitarbeit in Fachgremien

Fischer, K.: Projektbeirat »Stresstest für Städte«, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Häring, I.: Co-Editor European Journal for Security Research, EJSR.

Heine, A.: Editorial Advisory Board, International Journal of Impact Engineering.

Heine, A.: Scientific Committee, Light-Weight Armour for Defence & Security, LWAG 2024, Rocamadour, France, June 10-13, 2024.

Heine, A.; Signetti, S.: Organizing Committee, 4th International Conference on Impact Loading of Structures and Materials, ICILSM 2024, Freiburg, Germany, May 13-17, 2024.

Köpke, C.: Member of the Programm Committee of the 4th International Workshop on Cyber-Physical Security for Critical Infrastructures Protection (CPS4CIP 2023) of ESORICS 2023.

Köpke, C.: Mitglied in der Young Academy for Sustainabilty Research an der Universität Freiburg, FRIAS.

May, M.: AIAA International Activities Advisory Committee.

May, M.: AIAA International Honor and Awards Development Committee.

May, M.: Fraunhofer Program Management Team Clean Aviation.

May, M.: Governing Board Clean Aviation.

May, M.: Program Management Committee Member Fraunhofer Clean Sky 2 Airframe.

May, M.: Scientific Committee Composites 2023 Conference, Trapani, Italien, 12.-14. September 2023.

May, M.: Stellv. Sprecher Fraunhofer VVS für FACT.

May, M.: Stellv. Steering Committee Member Fraunhofer Clean Sky 2 Airframe.

Meyer, R.: Mitglied Programmkomitee der Social Simulation Conference (SSC 2023).

Meyer, R.: Mitglied Programmkomitee des 24. International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS 2023).

Putzar, R.: Repräsentant des Fraunhofer Ernst-Mach-Instituts in der Aeroballistic Range Association (ARA).

Ramin, M. von: Deutscher Delegierter für die NATO PFP(AC/326-SG/C) AASTP-4 Custodian Working Group.

Ramin, M. von: Mitarbeit in der Klotz Group.

Ramin, M. von: Mitglied im Editorial Board »International Journal of Protective Structures«.

Ramin, M. von: Mitglied in der »European Commission expert group ‘Fighting Crime and Terrorism, including Resilient Infrastructure’ for the Community for European Research and Innovation for Security (CERIS)«.

Ramin, M. von: Mitglied in der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, DGEB.

Rosin, J.: Mitglied der DGEB – Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik e.V.

Rosin, J.: Mitglied im Normenausschuss NA 104 DIN Standards Committee Tank Installations (NATank) Deutscher Spiegelausschuss CEN/TC 265/WG 10.

Rosin, J.: Projektleitung im Normenausschuss, CEN/TC 265/WG 10 – Revision of EN 14620 Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and -165 °C.

Rößner, S.: Fraunhofer Representative im Steering Committee von Clean Sky 2 ITD Airframe.

Rößner, S.: Mitglied im Advisory Council for Aviation Research and Innovation (ACARE), WG 4 Safety & Security.

Ruiz-Ripoll, M. A.: Mitglied bei der European Structural Integrity Society (ESIS).

Ruiz-Ripoll, M. A.: Mitglied beim Grupo Español de Fractura (GEF).

Sättler, A.: Mitglied im Arbeitskreis Innenballistik der Rohrwaffen.

Stocchi, A.: Mitglied der fib – Fédération Internationale du Béton (International Federation for Structural Concrete).

Stolz, A.: Mitglied des Transport Research Boards (TRB) im AMR 10 Standing Committee on Critical Transportation Infrastructure Protection.

Stolz, A.: Mitglied DGEB – Deutsche Gesellschaft für erdbebeningenieurwesen und Baudynamik.

Strömungsvisualisierung mit dem Stoßwellenrohr

Bereits 1959 wurden im EMI transiente, instationäre Strömungsvorgänge experimentell im Stoßwellenrohr visualisiert. Zum Beispiel um Druckbelastungen an Objekten infolge von nuklearen Explosionen im Modellmaßstab zu simulieren. Mit der eigens entwickelten 24-Funkentechnik und der Cranz-Schardin-Kamera konnten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im Mikrosekundenbereich erzeugt werden, ein damals unerreichter Wert.

Foto: Fraunhofer EMI

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI

Ernst-Zermelo-Straße 4
79104 Freiburg
Telefon +49 761 2714-0
info@emi.fraunhofer.de
www.emi.fraunhofer.de

Standorte:
Freiburg, Efringen-Kirchen und Kandern