



Verbesserte Raketenabwehr durch Nanosatelliten

Der Nanosatellit ERNST ist die erste Kleinsatellitenplattform, für die das Potenzial zur Unterstützung militärischer Aufgaben der Bundeswehr demonstriert werden soll. Er wurde am Fraunhofer EMI mit einer Förderung des Bundesamts für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) aufgebaut.

Mit seiner hochauflösenden kryogekühlten Infrarotkamera soll er Raketenstarts detektieren und die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche im mittelwelligen Infrarotspektrum präzise erfassen.

ERNST wurde für eine Mitfluggelegenheit im Rahmen des Space Test Program (STP) der United States Space Force (USSF) ausgewählt und wird planmäßig im Juni 2024 an Bord einer RS1-Trägerrakete von ABL Space Systems starten.

Titelbild: Raketenabwehrtest der US-Armee auf den Marshallinseln. Die Rakete wurde erfolgreich erfasst und sechs Minuten nach dem Start zum Abschluss gebracht. Zur Illustration der Satellitensicht wurde ein Fadenkreuz montiert.
© US ARMY, CC BY 2.0



Schutz und Waffenwirkung sind die Kernthemen der wehrtechnischen Forschung am Fraunhofer EMI.

Liebe Leserinnen und Leser,

mit dem vorliegenden Jahresbericht werfen wir ein Schlaglicht auf das Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik in außergewöhnlich herausfordernden Zeiten. Mitten in der durch den russischen Einmarsch in die Ukraine ausgelösten sogenannten Zeitenwende erfahren wir eine nie dagewesene Reduzierung der Haushaltsmittel für die Forschung im Bundesministerium der Verteidigung. Wir alle erfahren täglich, wie existenziell sich die Bedrohung eines militärischen Aggressors mitten in Europa auf ein ganzes Volk auswirken kann. Und wir beobachten gleichzeitig die Notwendigkeit, die Wirksamkeit wie auch die Unzulänglichkeiten existierender Technologien auf dem Gefechtsfeld. Die Sicherheit und der militärische Erfolg der verteidigenden ukrainischen Soldatinnen und Soldaten hängt unmittelbar von der Qualität und der Zuverlässigkeit ihrer verfügbaren Waffen ab. Erfolgreich können sie nur sein, wenn ihr Schutz und ihre Waffenwirkung denen der Angreifer überlegen ist.

Schutz und Wirkung aber sind die Kernthemen der wehrtechnischen Forschung am Fraunhofer EMI. Damit diese Fähigkeiten der Bundeswehr und unserer Verbündeten auch künftig denen potenzieller Angreifer überlegen sind, braucht es zwingend Forschung. Anders als Propaganda und vollmundige Androhungen von Hyperschall- und Atomwaffeneinsätzen schreckt echte Verteidigungsbereitschaft ab und verhindert Kriege. Diese Erkenntnis aus dem Kalten Krieg gilt es heute wieder neu zu pflegen. Damit eine Zeitenwende langfristig gelingen kann, wird ein nachhaltiger finanzieller Mittelansatz notwendig, der

über ebenso notwendige kurzfristige Beschaffungsmaßnahmen weit hinausgehen muß. Die Zukunftsfähigkeit der deutschen Verteidigungsanstrengungen steht und fällt mit der Qualität der wehrtechnischen Forschung und Entwicklung.

Daß die wissenschaftlichen Potenziale am Fraunhofer EMI zur Verteidigungsfähigkeit der Bundeswehr herausragend beitragen, beweisen wir seit es dieses Institut gibt. Einige aktuell laufende oder jüngst abgeschlossene Forschungsarbeiten aus dem Geschäftsfeld Verteidigung finden Sie in diesem Jahresbericht ebenso wie den Stand der Arbeiten in den weiteren Geschäftsfeldern.

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!

Ihr Stefan Hiermaier



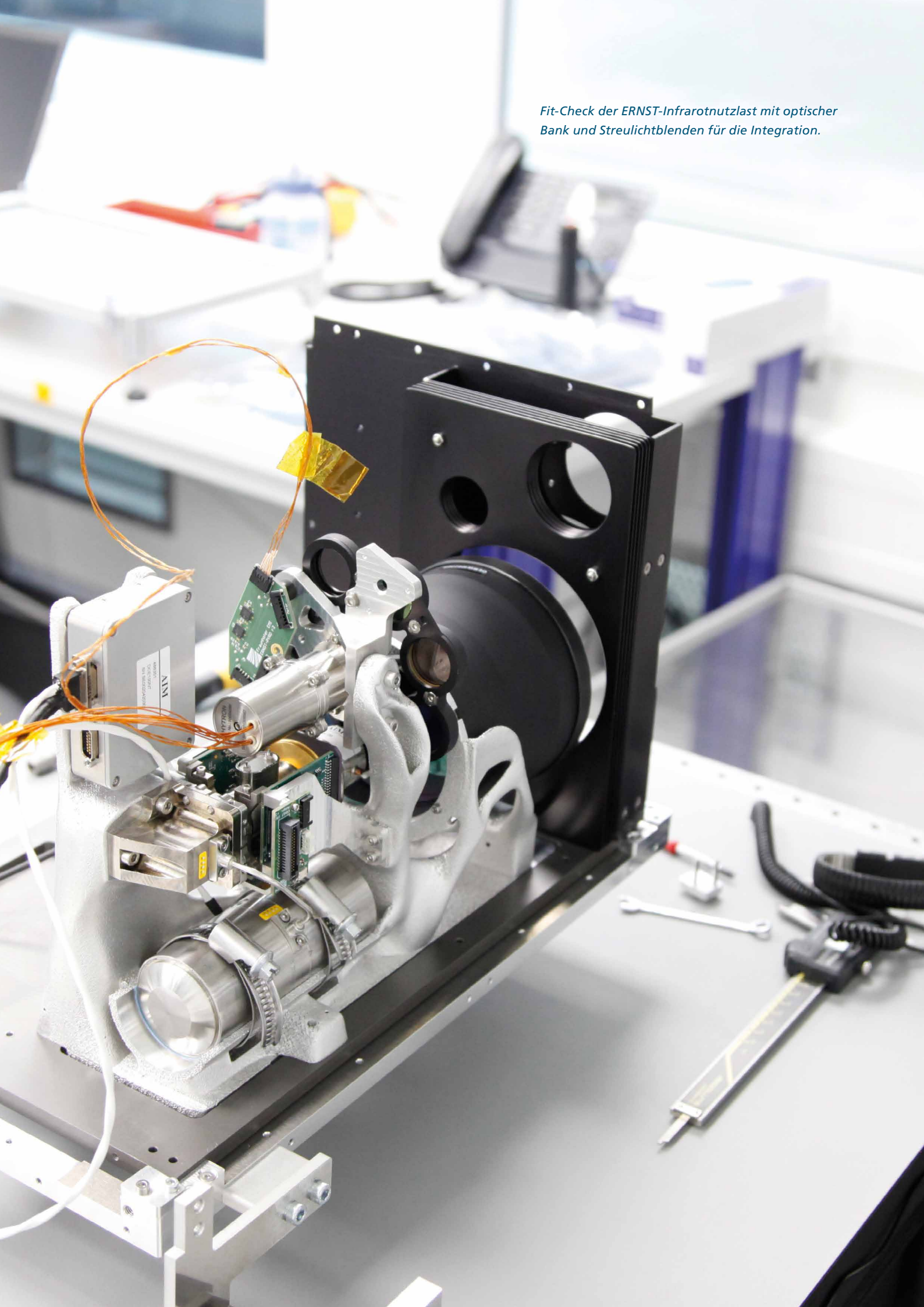
Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier

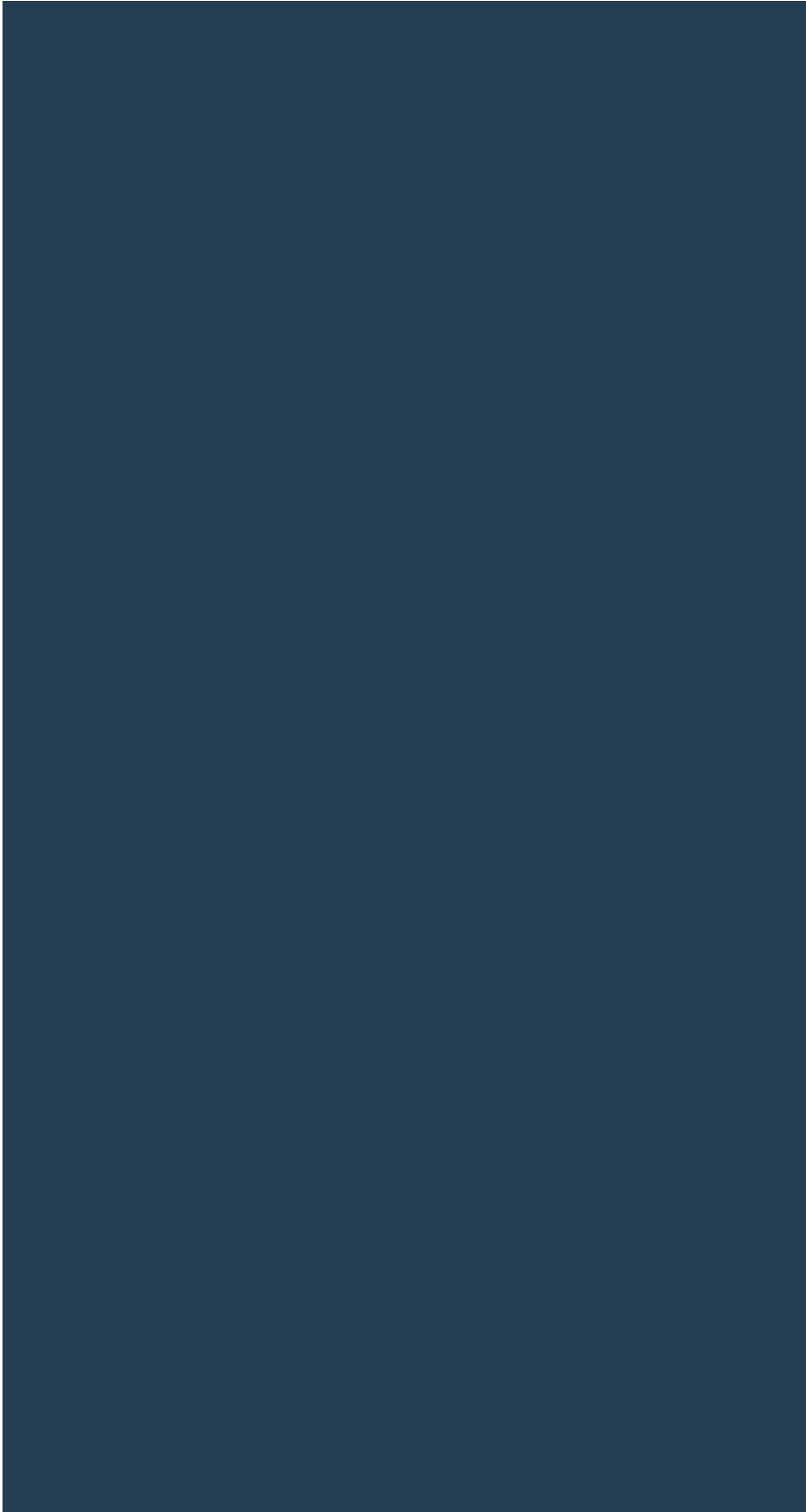
Institutsleiter Fraunhofer EMI

Inhalt

	Geschäftsfeld Verteidigung	8
	Geschäftsfeld Sicherheit und Resilienz	30
	Geschäftsfeld Automotive	44
	Geschäftsfeld Raumfahrt	58
	Geschäftsfeld Luftfahrt	74
	Das EMI im Weitwinkel	88
	Verwaltung	102
	Das Institut im Profil	112
	Publikationen, wissenschaftlicher Austausch, Vorträge 2022/2023	122
	Impressum	144

Fit-Check der ERNST-Infrarotnutzlast mit optischer Bank und Streulichtblenden für die Integration.





Geschäftsfelder





Falschfarbendarstellung von Prozessleuchten bei der Perforation einer Platte aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff durch einen Hochenergielaserstrahl.

Geschäftsfeld Verteidigung



Einleitung	10
Menschen im Geschäftsfeld Verteidigung	12
Erster Kleinsatellit für die Bundeswehr – Raketendetektion mit dem 12U-CubeSat ERNST	14
Innenballistik-Softwarefamilie SimIB für die Auslegung der nächsten Generation Rohrwapfen der Bundeswehr	18
Analyse zur Sicherheit beim Freifeldlasereinsatz	22
ARTUS – Autonomous Rough-terrain Transport UGV Swarm	24
Schutzaufbauten mit additiv gefertigten Störstrukturen aus Titan	25
Generative Fertigung: Designoptimierung von energieabsorbierenden Gitterstrukturen	26
Endballistik: KI-Methoden in den Materialwissenschaften	27
NEWHEAT – wehrtechnische Forschung für Europa	28
Future Security 2023: Unsere Sicherheit ist unteilbar ...	29

Geschäftsfeld Verteidigung

Die Bundeswehr benötigt zukunftsfähige Systeme und Technologien für den Einsatz zu Land, Luft und See sowie im Zuge der Digitalisierung auch für den Cyberraum. Heute wird auch die militärische Nutzung des Welt-raums von der Bundeswehr als eine wesent-liche Voraussetzung für den gezielten Einsatz moderner Streitkräfte angesehen.

Das Fraunhofer EMI zeigt hier im Verbund mit den Fraunhofer Instituten IOSB und INT mit der Kleinsatellitenplattform ERNST auf, welche Möglichkeiten der erdnahe Weltraum für die Landesverteidigung bei der Abwehr von ballistischen Raketen oder hypersonischen Flugkörpern bietet.

Die Technologie der Kleinsatelliten ist ein Beispiel dafür, wie die allgemeine, von wirtschaftlichen Entwicklungsmöglichkeiten angetriebene Technologieentwicklung durch die Verbindung mit vertieftem Wissen um die wehrtechnischen Anforderungen zu neuartigen Lösungsansätzen für zukünftige militäri-sche Fähigkeiten führt.

Allgemein erlebt unsere Gesellschaft durch die rasante Technologieentwicklung und verän-derte Anforderungen wie Nachhaltigkeit eine dramatische Änderung der Art und Weise, mit welchen technologischen Lösungsansätzen anstehende Aufgaben erfüllt werden. Dies gilt auch auf den Anwendungsgebieten der Kurzzeitdynamik und deren Einbindung in eine digitalisierte Systemumgebung.

Die Fraunhofer-Institute des Fraunhofer VVS, dem Fraunhofer-Leistungsbereich Verteidi-gung, Vorbeugung und Sicherheit, verfügen über die Fähigkeit zur Verbindung des all-gemein-technologischen Fortschritts mit den speziellen Anforderungen der Wehrtechnik. Sie tragen dazu bei, dass die Bundeswehr mit den rasanten technologischen Veränderungen umgehen kann und durch anwendungsorien-tierte Forschung mit verbesserter Leistungsfä-higkeit in der Zukunft profitiert.

Das Fraunhofer EMI untersucht dabei wissen-schaftlich-technologische Fragestellungen aus den Schwerpunktbereichen Schutz und Wirkung sowie Sicherheit und Systeme als strategischer Partner des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) für Forschung und Technologie auf dem Gebiet der Kurz-zeitdynamik und extremer Werkstoffbean-spruchung in Verbindung mit modernsten Technologien und Ausnutzung der Möglich-keiten der Digitalisierung.

Unsere Forschung zeigt neue Lösungsmöglich-keiten auf und baut die Wissensbasis aus, die für die Analyse für Ausrüstungsentscheidun-gen zur Verfügung steht – im Hinblick auf die nationale als auch die europäische Sicherheit.

Wir danken für die Förderung unserer For-schungsarbeiten durch das Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) in Koblenz.



Wir tragen dazu bei, dass die Bundeswehr mit den rasanten technologischen Veränderungen umgehen kann und durch anwendungsorientierte Forschung mit verbesserter Leistungsfähigkeit in der Zukunft profitiert.«

Dr. Matthias Wickert



Dr. Matthias Wickert

Geschäftsfeldleiter Verteidigung
matthias.wickert@emi.fraunhofer.de

s.fhg.de/emi-verteidigung

Menschen im Geschäftsfeld Verteidigung



Hier lassen wir sieben Forscher aus dem Geschäftsfeld Verteidigung zu Wort kommen.

- 1 Dr. Martin Schimmerohn
martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de
- 2 Axel Sättler
axel.saettler@emi.fraunhofer.de
- 3 Wolfgang Niklas
wolfgang.niklas@emi.fraunhofer.de
- 4 Dr. Martin Lück
martin.lueck@emi.fraunhofer.de

- 5 Dr. Christoph Glöbner
christoph.gloessner@emi.fraunhofer.de
- 6 Konstantin Kappe
konstantin.kappe@emi.fraunhofer.de
- 7 Elmar Strassburger
elmar.strassburger@emi.fraunhofer.de

Erster Kleinsatellit für die Bundeswehr – Raketendetektion mit dem 12U-CubeSat ERNST



Ein Beitrag von Dr. Martin Schimmerohn, martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de

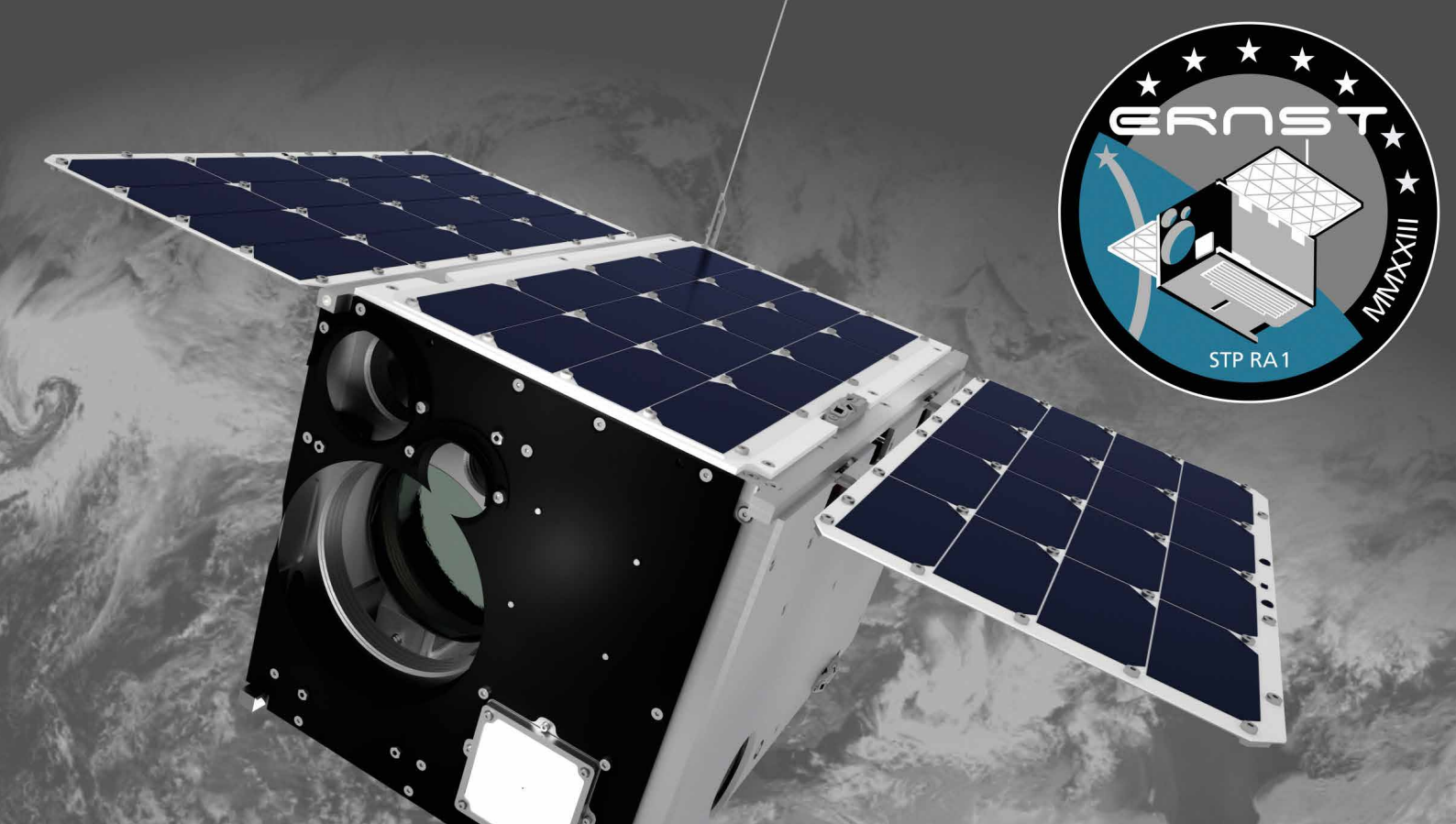
Demonstration eines kleinen, standardisierten und kostengünstigen Satelliten in einer ambitionierten Mission

Mit dem Forschungsprojekt zum Aufbau einer Kleinsatellitenplattform und der Vorbereitung einer Mission zur Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten zur Bedrohungsdetektion leistet das Fraunhofer EMI seinen ersten substantiellen Beitrag zu der neuen Fähigkeitsdimension Weltraum. Das ERNST-Flugmodell hierzu wurde bereits fertiggestellt. Die erste Kleinsatellitenmission für die Zwecke der Bundeswehr steht bevor. Im Format eines 12U-CubeSats mit einem kryogen gekühlten Infrarot-Imager soll ERNST das Potenzial der Kleinsatellitentechnologie demonstrieren und Erkenntnisse zur Früherkennung von ballistischen Raketen oder hypersonischen Flugkörpern aus dem erdnahen Orbit liefern.

Die Satellitenmission ERNST repräsentiert eine Neuheit in mehrerlei Hinsicht. ERNST ist nicht nur der erste CubeSat, dessen Anwendungspotenzial speziell für die Zwecke der Bundeswehr untersucht wird. Auch für die

Fraunhofer-Gesellschaft, die auf vielen Gebieten seit jeher zu Innovationen auf Komponenten- und Subsystemebene für die Raumfahrt beiträgt, ist der Kleinsatellit das erste von einem Fraunhofer-Institut entwickelte Raumfahrtssystem. Technisch werden mit ERNST ebenfalls Maßstäbe gesetzt. Allen voran steht die Demonstration einer komplexen, kryogen gekühlten Infrarotanwendung in einem nur 12U großen CubeSat. Das »U« für Unit definiert die Größenmetrik der CubeSats, wobei eine Unit einem Würfel mit zehn Zentimetern Kantenlänge entspricht. Die 12U geben ERNST die Außenmaße 24 mal 24 mal 36 Kubikzentimeter bei weniger als 20 Kilogramm Gesamtmasse.

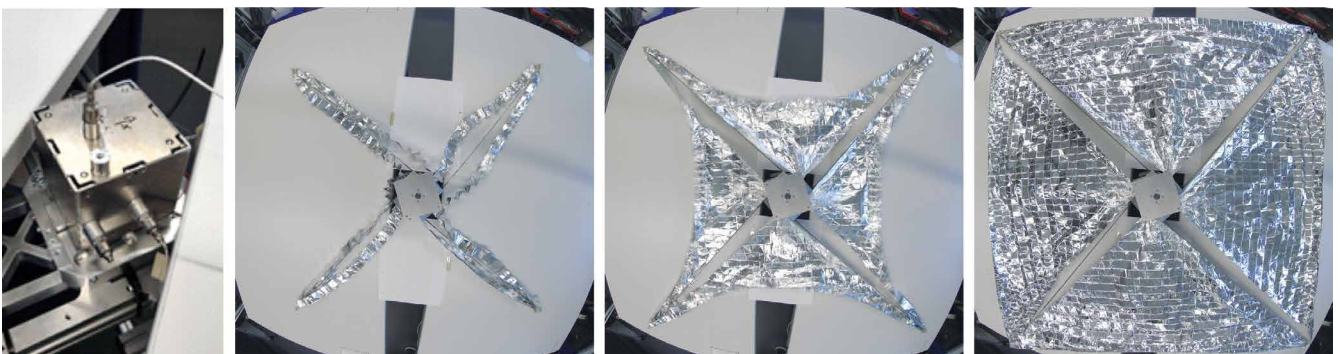
Die Hauptnutzlast ist eine hochempfindliche Kamera mit Filterrad, ein Infrarot-Imager, der zur Demonstration von am Fraunhofer IOSB entwickelten Konzepten zur Raketendetektion dient. Um die für eine Frühwarnung und die Einleitung von Abfangmaßnahmen erforderliche schnelle Reaktionszeit zu ermöglichen, wird die Erdoberfläche in verschiedenen



kurz- und mittelwelligen Infrarotbereichen beobachtet. Die Kombination verschiedener Spektralbereiche erlaubt eine schnelle und zuverlässige Detektion der Infrarotsignatur einer Rakete oder eines Flugkörpers während deren Betriebsphasen wie Boost- und Gleitphasen. Durch die Stationierung von ERNST im erdnahen Orbit wird eine hohe räumliche Auflösung und dadurch ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht. Um die Beobachtungs- und

Integrationszeit entlang des 96 Kilometer breiten Aufnahmestreifens im Falle einer Raketendetektion zu erhöhen, schwenkt der Satellit entlang seiner Bahn nach und verfolgt das Ziel. Die ERNST-Mission wird nicht nur Referenzdaten des Erdhintergrunds in den relevanten Wellenlängenbereichen erfassen, sondern auch die Signatur eines Raketenstarts charakterisieren und deren Nachverfolgung demonstrieren. ►

ERNST-Mission: 12U-CubeSat zur Raketendetektion.



ERNST-De-Orbit-Subsystem: verstautes System (links) und Sequenz eines Entfaltungstests (rechts).



ERNST-Hauptnutzlast: Infrarot-Imager.

Für die kompakte Nutzlast kombinieren wir kommerziell verfügbare Produkte aus dem wehrtechnischen Bereich, die speziell für die Mess- und Raumfahrtanwendung angepasst und verifiziert wurden, wie Optik, Stirling-Kryokühler, Infrarotdetektormodul und ein Pyrometer, mit Eigenentwicklungen des Fraunhofer EMI wie einem Filterrad und einer Datenverarbeitungseinheit. Untergebracht sind die Komponenten auf einer am EMI generativ gefertigten optischen Bank. Deren Topologieoptimierung gibt dem Bauteil

eine bionische Erscheinung, während es die notwendige mechanische und thermische Stabilität für die Nutzlast gewährleistet. Zusätzlich ist ein dreidimensional strukturierter Radiator integriert, der die erheblichen thermischen Lasten auf einer sehr viel kleineren Grundfläche emittiert als übliche Radiatorflächen.

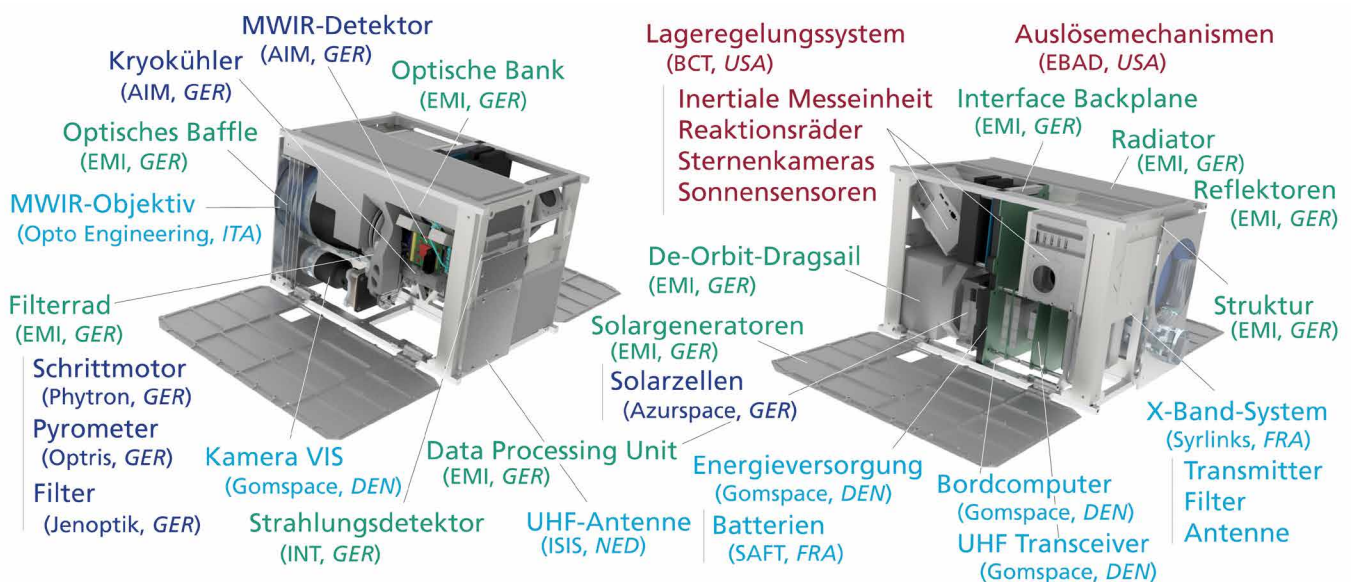
Für eine zweite Missionaufgabe ist der CubeSat mit einer visuellen Kamera für die Georeferenzierung und einem vom Fraunhofer INT entwickelten

Strahlungsmonitor ausgestattet. Dieser misst die Gesamtdosis der vom Satelliten empfangenen energetischen Strahlung sowie den Einfluss von Protonen und Neutronen durch den Einsatz von unterschiedlich abgeschirmten Detektorelementen wie UV-EPROM- und SRAM-Modulen.

Über die konkreten Missionsziele der Raketendetektion und des Strahlungsmonitorings hinaus soll ERNST die Leistungsfähigkeit von Kleinsatelliten für militärische Anwendungen unter Beweis stellen. Deutlich geringere Kosten und eine höhere Risikotoleranz bei einer hohen zeitlichen Abdeckung bei einem Einsatz von Konstellationen mit hoher Resilienz zeichnen diese Satellitenklasse aus. Für den

Satellitenbus wurden die leistungsstärksten verfügbaren CubeSat-Produkte erprobt und, wenn nicht kommerziell verfügbar, am Fraunhofer EMI selbst entwickelt. Sinnbildlich für Letzteres steht ein Bremssegel, das am Ende der Mission einen schnellen De-Orbit für eine nachhaltige Orbitnutzung gewährleistet.

Nachdem das Flugmodell fertiggestellt ist, bereiten wir ERNST derzeit auf Abnahmetests und seinen aktuell für April 2024 vorgesehenen Start vor, der im Rahmen einer Kooperation des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) mit der US Space Force durch ein externes Unternehmen umgesetzt wird (Seite 69). ■



ERNST-Plattform mit der Darstellung der Hauptkomponenten und ihrer Herkunft.

Innenballistik-Softwarefamilie SimIB für die Auslegung der nächsten Generation Rohr Waffen der Bundeswehr

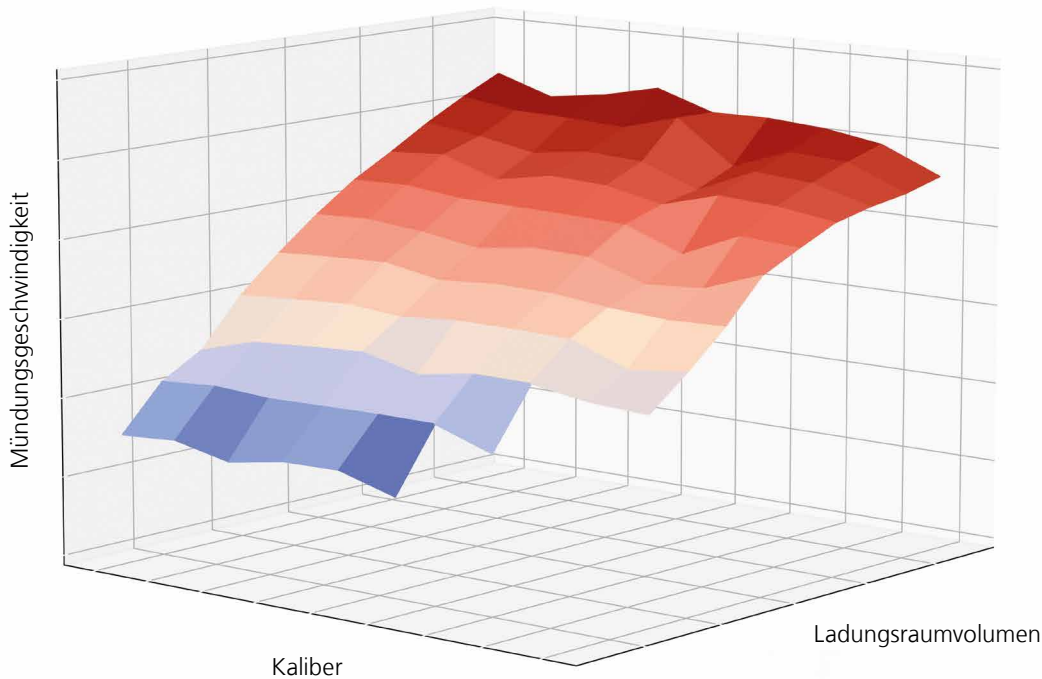
Ein Beitrag von Axel Sättler, axel.saettler@emi.fraunhofer.de, und Nicolas Wilhelm, nicolas.wilhelm@emi.fraunhofer.de

Projekte benötigen für eine hohe Fluggeschwindigkeit und zur Einwirkung auf ein Ziel kinetische Energie, die durch einen innenballistischen Antrieb bereitgestellt wird. Im Ladungsraum einer Rohrwaffe erfolgt zunächst die Anzündung der Treibladung. Diese besteht üblicherweise aus einer großen Anzahl von Treibladungspulverkörnern, die eine bestimmte Geometrie und spezifische Abbrandeigenschaften aufweisen. Der Gasdruck im Ladungsraum steigt in kurzer Zeit stark an, und das Projektil beginnt zu beschleunigen. Die heißen Pulvergase strömen durch das Waffenrohr und treiben das Projektil an, bis es die Rohrmündung verlässt. Für eine hohe Mündungsgeschwindigkeit sollte der Druck schnell und stetig ansteigen sowie über einen möglichst langen Zeitraum anliegen, ohne dass es zu einer Überlastung von Waffe oder Munition kommt. Das Fraunhofer EMI stellt für Amtsseite und Industrie

Simulationsprogramme bereit, mit denen sich für das jeweilige Anforderungsprofil geeignete Lösungen für die Auslegung ableiten lassen, wie zum Beispiel Anforderungen an eine gesteigerte Reichweite für zukünftige Artilleriesysteme. Ebenso ermöglichen diese Simulationsprogramme, Aspekte zur sicheren Handhabung zu beurteilen.

Zeitenwende

In der Zeit nach dem Ende des Kalten Kriegs war das Einsatzprofil der Bundeswehr geprägt vom Übergang von der Landes- und Bündnisverteidigung zu Out-of-area-Einsätzen. Dies machte sich in der Ausrüstung der Truppe deutlich bemerkbar. Rohrwaffen, insbesondere für Kampfpanzer und Artillerie, verloren an Bedeutung, denn es bestand eine technische Überlegenheit gegenüber Gegnern in asymmetrischen Konflikten. Seit der Annexion der Krim durch die Russische Föderation im Jahr 2014 und insbesondere dem Überfall auf die Ukraine und der danach eingeläuteten



Zeitenwende im Jahr 2022 hat sich dies massiv geändert. Die Fähigkeit, militärische Konflikte mit hoher Intensität unter Einsatz von schweren Waffen zu führen sowie gegen klassische Ziele auf dem Gefechtsfeld zu wirken – insbesondere schwere Kampfpanzer mit enorm hohem Schutzniveau – sind innerhalb kurzer Zeit wieder in den Fokus gerückt.

Leistungssteigerung von Rohrwaffen wieder im Fokus des Interesses

Da über viele Jahre eine Modernisierung ausgeblieben ist, kann nicht mehr von einer Überlegenheit der eigenen Wirkmittel ausgegangen werden. Für eine Leistungssteigerung bestehender Systeme oder die Entwicklung neuer, leistungsgesteigerter Rohrwaffen und der zugehörigen Munition werden moderne Softwaretools für die Auslegung und Beurteilung benötigt. Diese müssen auf dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand basieren und in Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen die innenballistischen

Abläufe zuverlässig vorhersagen können. Vor diesem Hintergrund arbeitet das Fraunhofer EMI daran, eine Familie moderner Innenballistikprogramme mit der Bezeichnung SimIB (Simulationstool InnenBallistik) zu erstellen. Diese soll die im Wesentlichen aus den 1980er- und 1990er-Jahren stammenden und bislang für derartige Berechnungen verwendeten Programme ersetzen und den zukünftigen nationalen Standard bilden.

Erste Ausbaustufe: SimIB-0D

Die erste Ausbaustufe stellt die Software SimIB-0D dar. Hierbei handelt es sich um ein Berechnungstool, basierend auf der STANAG 4367, welches bei der deutschen Amtsseite und Industrie seit 2015 erfolgreich eingesetzt wird. Es stehen verschiedenste Funktionen zur Verfügung, die es erlauben, klassische Kanonen aller Kaliber mit unterschiedlichen Pulversorten zu modellieren – aber auch Zweikammersysteme für Granatwerfer und Mörser sowie Handwaffen. ►

SimIB-0D-basierte Parameterstudie.

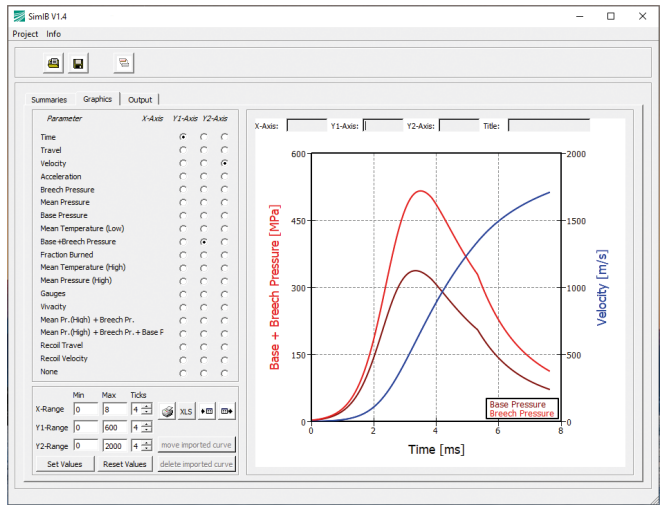
Da der Gleichungslöser von SimIB ausgegliedert ist, ist es außerdem möglich, diesen über eine höhere Programmiersprache wie zum Beispiel Python zu steuern und ganz gezielt zur Optimierung eines Antriebs einzusetzen. Ziel einer solchen Optimierung ist üblicherweise das Erreichen einer hohen Mündungsgeschwindigkeit für das Geschoss, während gleichzeitig die Belastbarkeit des Rohrs oder anderer Waffenteile nicht überschritten werden darf.

Durch den gewählten Ansatz können auch neuartige Pulvergeometrien ohne aufwendige Versuche beurteilt werden, was Kosten einspart. Für einen sicheren Betrieb wird oft die maximale Belastung der Waffe als Grenzdruck angegeben. Diesen kann SimIB als zusätzliche Randbedingung berücksichtigen, sodass dieser immer und selbst ohne zusätzliches Optimierungsverfahren eingehalten wird.

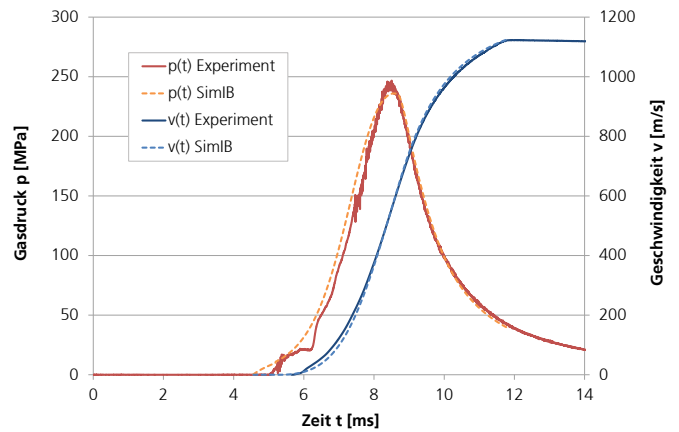
Aktuelle Forschung: gasdynamische Modelle

Derzeit ist die Variante SimIB-1D Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten, welche eine gasdynamische Betrachtung der Innenballistik ermöglicht. Daher kann die Strömungsbewegung der heißen Antriebsgase und das Verhalten des Pulverbetts im Waffenrohr mit analysiert werden.

Besonders bei großkalibrigen Systemen, wie der Artillerie mit großen Ladungsräumen oder Panzerkanonen, die Geschosse auf Geschwindigkeiten von mehr als 1700 Metern pro Sekunde beschleunigen sollen, kommt dem Prozess der Anzündung des Pulverbetts eine entscheidende Bedeutung zu. Bei falscher Auslegung können sich im Ladungsraum Druckwellen aufbauen, die zum Bruch von Pulverkörnern führen – im schlimmsten Fall mit katastrophalen Folgen für



Grafische Benutzeroberfläche SimIB-0D.

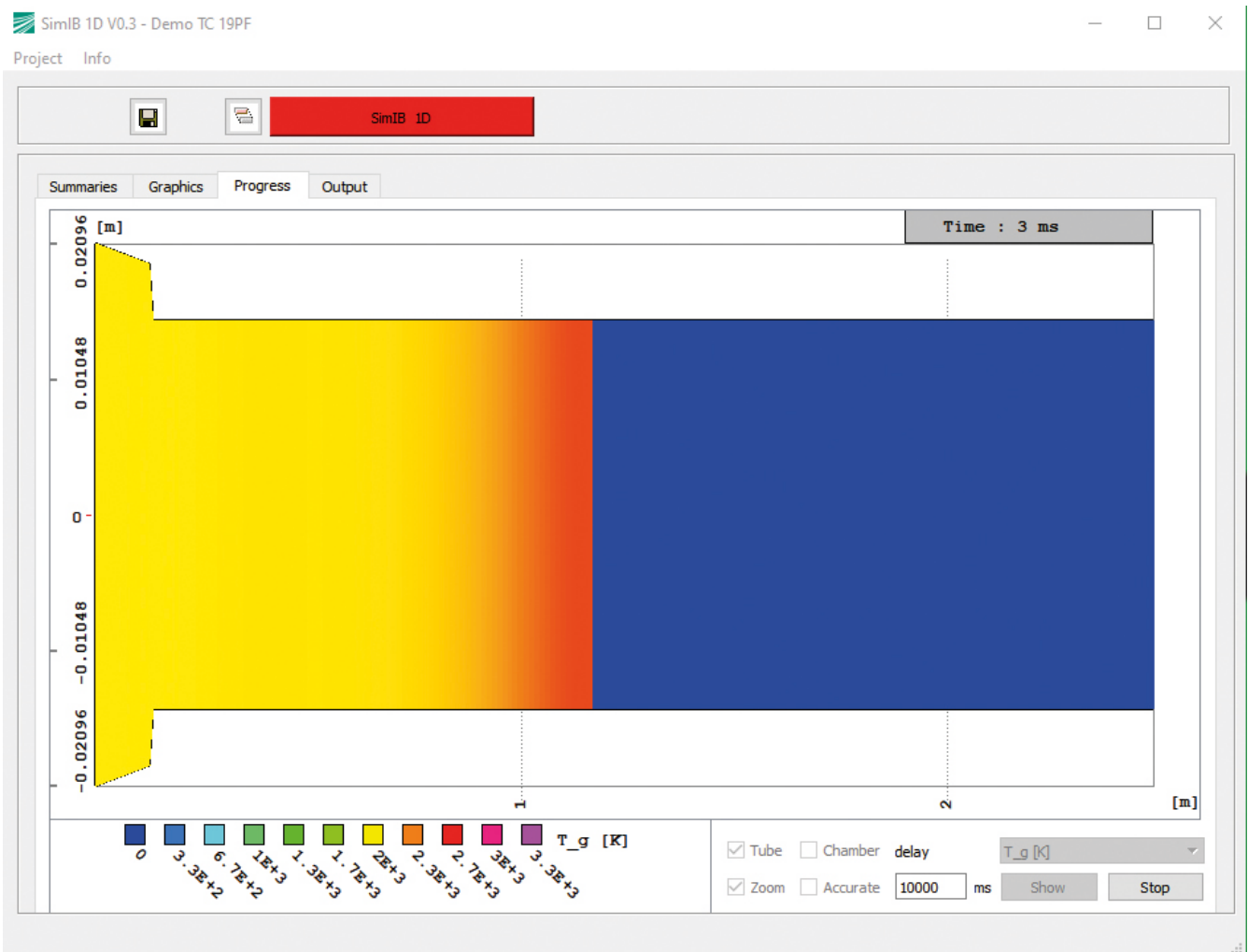


SimIB-0D – der Vergleich von berechneten und experimentell ermittelten Druck- und Geschwindigkeitsverläufen zeigt eine gute Übereinstimmung.

Material und Einsatzkräfte. Diese Sicherheitsanforderungen können durch Simulationen mit SimIB-1D analysiert werden. Die derzeitige Version ist in der Lage, grundlegende Ladungsaufbauten zu berechnen. Die Software soll sukzessive erweitert werden, sodass sie zukünftig den vielfältigen Funktionsumfang von SimIB-0D bieten kann.

Die Zukunft: High-Performance-Simulationen in 3D

Für die Zukunft sind außerdem dreidimensionale Simulationen in Planung, welche ein noch tiefergehendes Verständnis der Effekte beim Antrieb eines Geschosses erlauben. Damit sollen bisher noch wenig verstandene Phänomene untersucht sowie die Systeme noch leistungsfähiger und sicherer werden. ■



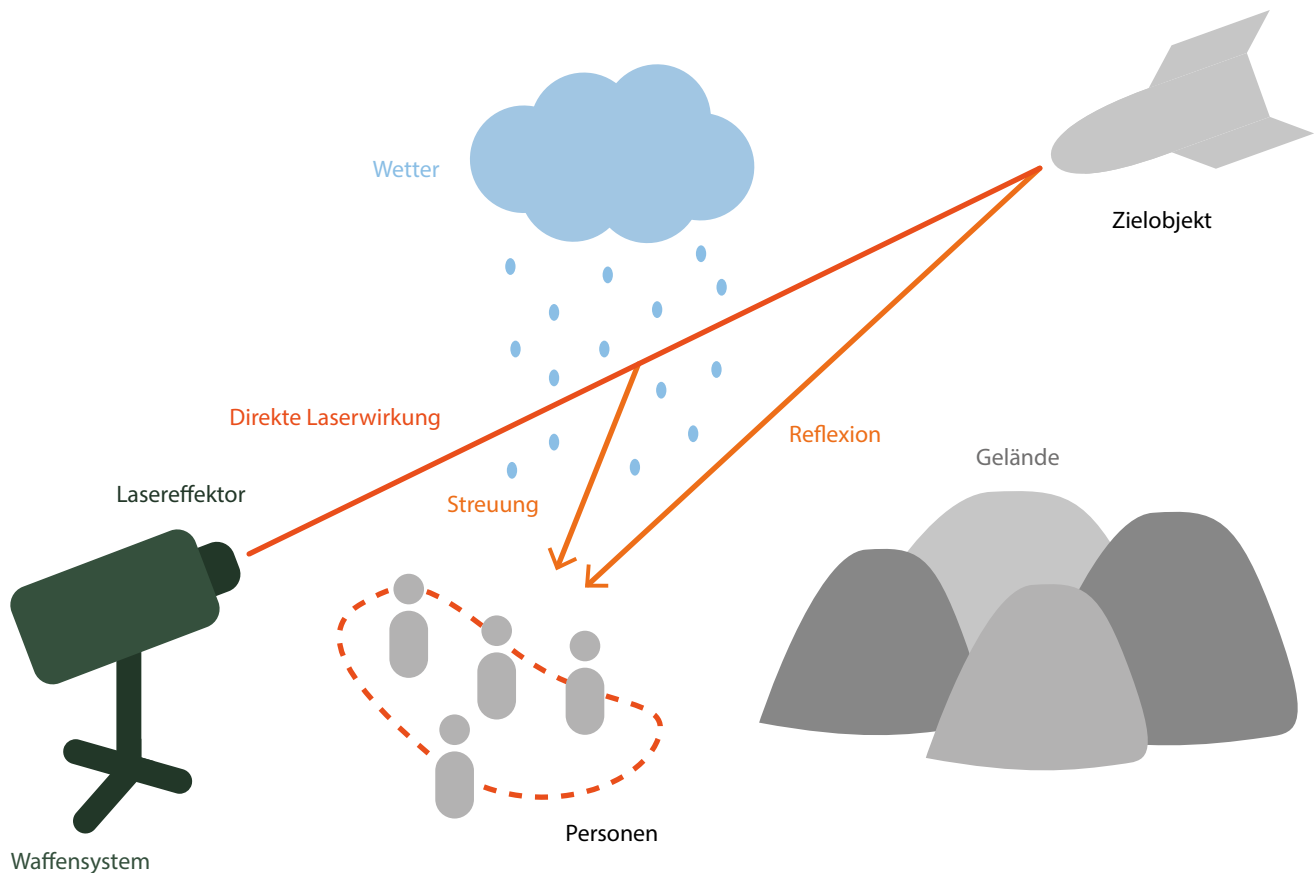
SimIB-1D – Verlauf der Gastemperatur hinter dem Geschoss.

Analyse zur Sicherheit beim Freifeldlasereinsatz

Ein Beitrag von Wolfgang Niklas, wolfgang.niklas@emi.fraunhofer.de,
und Dr. Martin Lück, martin.lueck@emi.fraunhofer.de

Waffensysteme können mit Simulationsprogrammen ausgelegt und im Labor untersucht und getestet werden. Schließlich sollen sie den Soldaten im Einsatz zur Verfügung stehen. Während für den Einsatz moderner Rohrwaffen jahrzehntelange Erfahrungen vorliegen, kommt bei Laserwaffen ein vollständig anderes physikalisches Wirkprinzip zum Tragen. Bei vielen bisherigen Freifeldanwendungen wird beim Laser oft die Eigenschaft genutzt, primär Information übertragen zu können. Hierbei sind

in der Regel eher geringe Laserstrahlintensitäten ausreichend. Oder die Laserstrahlung wird auf geringe Leistungen begrenzt, wie bei einem Laserpointer. Für eine Laserwaffe müssen andere Vorgehensweisen genutzt werden, um die Sicherheit bei einer möglichen Anwendung im Einsatz sicherzustellen. Von diesen neuartigen Analysen könnten auch zivile Laserfreifeldanwendungen profitieren.



Die Laserstrahlung beim Freifeldlasereinsatz birgt Gefahren, die mit dem Lasersicherheitstool berechnet werden können.



Lasergefährdungen und Sicherheitsberechnungen

Bei Laserwaffensystemen werden hohe Laserleistungen im Freien eingesetzt. Die Analyse für eine sichere Anwendung erfordert für direkte sowie möglicherweise reflektierte Laserstrahlung eine andere Vorgehensweise als für Laseranwendungen in einer eingehausten Umgebung, wie beispielsweise bei Maschinen zum Laserschweißen oder Laser Cuttern zum Trennen. Zur Quantifizierung potenzieller Gefährdungen und Risiken entwickelt das Fraunhofer EMI ein Lasersicherheitstool, mit dem ein dynamisches Anwendungsszenario simuliert und die Propagation der Laserstrahlung mit numerischen Verfahren berechnet werden kann. Basierend auf der berechneten Strahlpropagation kann das Tool Sicherheitsabstände und potenziell gefährdete Umgebungsbereiche bestimmen und darstellen.

Reflexionsmessungen und Modellbildung

Bei der Propagationsberechnung nehmen Reflexionen am bestrahlten Ziel eine zentrale Rolle ein. Insbesondere bei der Quantifizierung der Gefährdung durch reflektierte Laserstrahlung ist es wichtig, das komplexe Reflexionsverhalten potenzieller Zielmaterialien und -strukturen in der Simulation realitätsnah abzubilden. Wesentlich sind hierbei unter anderem die Materialsorte, die Oberflächenbeschaffenheit und der Einfallswinkel. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass sich die Oberflächen bestrahlter Objekte während der Einwirkung hochenergetischer Laserstrahlung dynamisch verändern. Zur Charakterisierung des spekularen und diffusen Reflexionsverhaltens werden am Fraunhofer EMI Laborexperimente durchgeführt. Die Reflexionsmessungen werden in geeignete Modelle für die Reflexionsberechnung im Lasersicherheitstool überführt.

Im Jahr 2022 erprobte das BAAINBw (Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr) eine Hochenergielaserwaffe an Bord der Fregatte Sachsen und bestrahlte fliegende Drohnen vor der deutschen Küste. Bild oben und Mitte: © Bundeswehr, PIZ Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung. Bild unten: © MBDA, Rheinmetall, PIZ Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung.



Das von charismaTec OG entwickelte Chassis (rechts) und der von Diehl als Schwarmpartner bereitgestellte UGV »Ziesel«.

ARTUS – Autonomous Rough-terrain Transport UGV Swarm

Ein Beitrag von Dr. Christoph Glößner, christoph.gloessner@emi.fraunhofer.de

ARTUS ist ein Projekt der European Defence Agency (EDA) zur Entwicklung eines autonom navigierenden Schwarms kleiner, geländegängiger UGVs (Unmanned Ground Vehicle) zur Entlastung von Infanterietruppen.

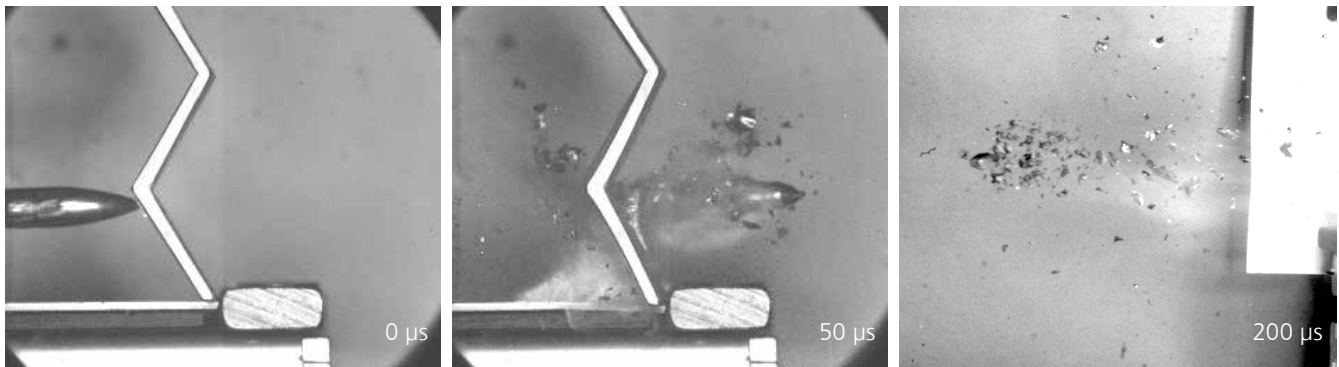
Im Jahresbericht 2020/2021 wurde bereits dargestellt, wie durch autonom manövrierende Roboterziele eine dynamische Zielerstellung erfolgen kann, die auf Truppenübungsplätzen beim Trainieren mit scharfem Schuss die möglichen Bewegungsverläufe eines Gegners abzubilden vermag und damit realitätsnahes Üben erlaubt. Autonom im Gelände navigierende robotische Systeme werden es zukünftig ebenso ermöglichen, Soldatinnen und Soldaten direkt im Einsatz zu unterstützen. Das Fraunhofer EMI hat sich hierzu am internationalen Forschungsprojekt ARTUS beteiligt und dieses auch koordiniert.

Im ARTUS-Projekt sollte ein Machbarkeitskonzept für einen autonom im Gelände navigierenden Schwarm kleiner, geländetauglicher UGVs erstellt und ein entsprechender Demonstrator gebaut werden. Die extremen Anforderungen an Infanteristen hinsichtlich

der zu transportierenden Ausrüstung und der möglichen Umgebungsbedingungen machen zur Entlastung der Soldatinnen und Soldaten ein Unterstützungssystem notwendig. Unbemannte Fahrzeuge unterschiedlicher Größe werden allenthalben entwickelt, ebenso Systeme zu autonomer Navigation und Schwarmfunktion. Neu an ARTUS ist die Zusammenführung dieser Bereiche in der gemeinsamen Entwicklung eines Unterstützungssystems, das eigenständig entsprechende Transport- und Versorgungsaufgaben übernehmen kann ohne direkten Eingriff durch einen Menschen. Im Projektkonsortium waren Diehl Defence GmbH & Co. KG als Industriepartner der Wehrtechnik, tätig im Bereich autonome Navigation, die französische Forschungsgesellschaft ONERA, zuständig für die Schwarmfunktionalität, und das österreichische Unternehmen charismaTec OG, welches das Fahrzeugchassis entwickelt und gebaut hat. Das EMI befasste sich mit der Projektleitung und den Aspekten des Fahrzeugschutzes und der Systemrobustheit des Schwarms. In mehreren Schritten wurden über die gewählten Einsatzszenarien die Systemparameter festgelegt, die Schnittstellen zwischen den Systembestandteilen definiert, diese in das entsprechende Fahrzeug integriert und die Funktionalität des Systems in repräsentativen Szenarien nachgewiesen.

Schutzaufbauten mit additiv gefertigten Störstrukturen aus Titan

Ein Beitrag von Elmar Straßburger, elmar.strassburger@emi.fraunhofer.de



Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Wechselwirkung eines Projektils mit einer Titanstörstruktur. Die starke Fragmentierung des Projektilkerns ist nach 200 Mikrosekunden deutlich zu sehen.

Prinzipien des leichten Schutzes wie die Zerstörung des Projektilkerns sind für den leichten Schutz von grundsätzlichem Interesse. Besonders im Hinblick auf Flexibilität und Anpassbarkeit können Schutzaufbauten profitieren, wenn sie sich mit Verfahren des metallischen 3D-Drucks herstellen lassen. Das Fraunhofer EMI forscht an geeigneten Materialien und Strukturaufbauten für diesen Zweck.

Aufgrund der Möglichkeit zur Anpassung an geometrische Randbedingungen könnten 3D-Druckverfahren auch von Vorteil sein. Zum Beispiel, wenn Komponenten robotischer Systeme, die für die Unterstützung der Soldaten eingesetzt werden, geschützt werden sollen. Im Folgenden wird beispielhaft dargestellt, wie durch die gleichzeitige Nutzung der Effekte der Schottung und geneigter Oberflächen die Schutzwirkung verbessert werden kann.

Die Verringerung der Eindringung von Projektilen bei möglichst geringem Gewicht einer Panzerung ist die zentrale Aufgabe des ballistischen Schutzes. Kleinkalibrige, panzerbrechende Geschosse besitzen einen Hartkern, der entweder aus gehärtetem Stahl oder Wolframcarbid besteht. Ein effizienter Schutz gegen derartige Geschosse ist möglich, wenn es gelingt, den Hartkern bei der Wechselwirkung mit der Schutzanordnung in möglichst viele Fragmente

zu zerbrechen. Ob die Fragmentierung des Projektilkerns eintritt, hängt von den mechanischen Eigenschaften des Zielmaterials, der Dicke und der Neigung der Zielplatten ab. Insbesondere die asymmetrischen Kräfte bei geneigten Zielen tragen zum Brechen des Projektilkerns bei. Befindet sich zwischen der ersten und zweiten Materialschicht ein Luftspalt (geschottete Anordnung), können sich Bruchstücke des Projektils voneinander trennen, sodass die Eindringung in die folgende Schicht verringert und die Schutzwirkung erhöht wird.

Die Untersuchungen am Fraunhofer EMI haben gezeigt, dass Projektilkerne aus Wolframcarbid bei der Perforation dünner Platten aus Ti6Al4V bei einer Neigung von 30 Grad stark fragmentiert werden. Die Verwendung einer geneigten Platte mit großen Abmessungen ist jedoch immer mit einer deutlichen Vergrößerung des Volumens der Schutzanordnung verbunden. Ersetzt man die ebene Platte zum Beispiel durch eine wellen-, zickzack- oder sägezahnförmige Struktur, so trifft das Projektil auf geneigte Flächen, obwohl die Struktur parallel zur folgenden Panzerung ausgerichtet ist. Mithilfe des Laser-Powder-Bed-Fusion-Verfahrens wurden Titanstrukturen additiv gefertigt. In ballistischen Tests und den Analysen mithilfe numerischer Simulation wurde eine erhöhte Schutzwirkung der Anordnung mit Titanstörstruktur nachgewiesen.

Generative Fertigung: Designoptimierung von energieabsorbierenden Gitterstrukturen

Ein Beitrag von Konstantin Kappe, konstantin.kappe@emi.fraunhofer.de

Während die Einwirkung eines Projektils eine sehr lokalisierte Materialbelastung bewirkt, resultiert aus einer Explosionseinwirkung in der Regel eine flächige Materialbelastung. Allgemein ist in der Kurzzeitdynamik von hoher Bedeutung, Materialien und Strukturen auslegen zu können, die über die Fähigkeit zur Aufnahme von Energie verfügen und dabei noch eine hohe Resttragfähigkeit bieten können. Der metallische 3D-Druck erlaubt hier eine hohe Designfreiheit, und gerade lokal adaptierbare Gitterstrukturen erscheinen aufgrund ihrer leichten Bauweise besonders geeignet. Hierbei werden in der numerischen Simulation auch die Möglichkeiten von neuartigen evolutionären Algorithmen erforscht, die eine intelligente Designauslegung durch selbstständiges Lernen ermöglichen.

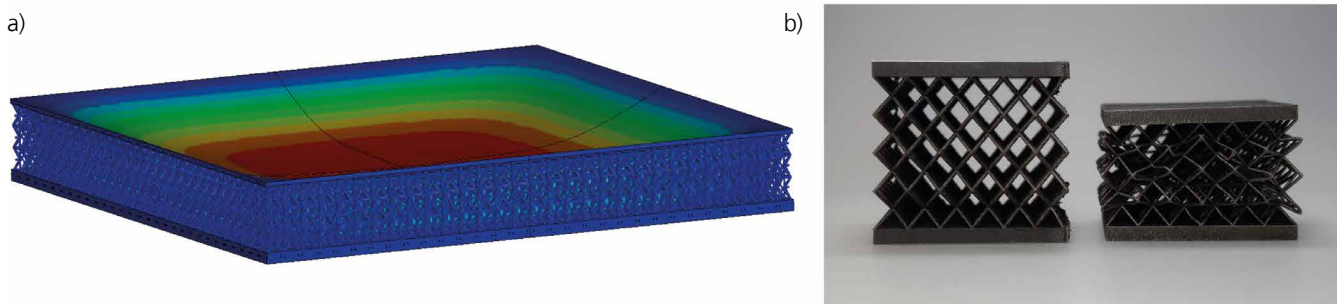
Potenzial und Herausforderungen von additiv gefertigten Gitterstrukturen zur Energieabsorption

Leichte zelluläre Gitterstrukturen können bemerkenswerte mechanische Eigenschaften wie eine erhöhte spezifische Festigkeit oder Energieabsorption aufweisen. Dies macht sie insbesondere für den Einsatz bei Crash-, Impakt- und Explosionsbelastungen attraktiv.

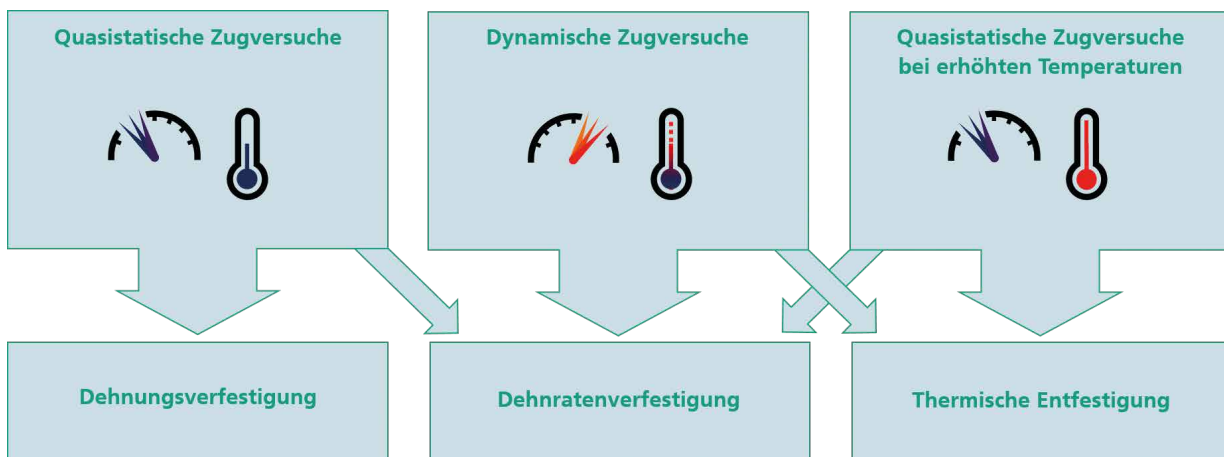
Aufgrund der großen Fortschritte der additiven Fertigungsverfahren, wie dem Pulverbett-basierten Laserstrahlschmelzen, ist nun die Herstellung filigraner und komplexer Strukturen mit neuen Materialien und maßgeschneiderten Materialeigenschaften möglich. Dies bietet unzählige Möglichkeiten, mithilfe eines funktionsgetriebenen Designs die mechanischen Eigenschaften von Komponenten und Strukturen zu verbessern. Hierfür werden neue Optimierungsverfahren auf den meso- und makroskopischen Skalen benötigt, um das gesamte Potenzial auszunutzen.

Neue Methoden der Designoptimierung für energieabsorbierende Gitterstrukturen

Am Fraunhofer EMI wird an der Entwicklung neuer Optimierungsmethoden für das Design von Gitterstrukturen geforscht, um die Energieabsorption unter dynamischen Lastszenarien gezielt einzustellen und zu optimieren. Dabei werden neuronale Netze genutzt, um das komplexe Strukturverhalten vorherzusagen und die Anzahl an aufwendigen FE-Simulationen zu reduzieren. Zusammen mit evolutionären Algorithmen kann das Strukturverhalten optimiert werden. Darüber hinaus werden die optimierten Strukturen im Labormaßstab untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhebliche Verbesserung der Eigenschaften erzielt werden kann.



Simulation einer Sandwichstruktur mit Gitterkern unter Sprengstoffbelastung (a) und im Sprengversuch getestete additiv gefertigte Proben mit Abmaß 60 auf 60 auf 50 Kubikmillimeter (b).



Unterschiedliche Versuchstypen zielen auf die unabhängige Bestimmung verschiedener Zusammenhänge ab. Mittels maschinellen Lernens können die dabei doch auftretenden Kopplungen besser berücksichtigt werden.

Endballistik: KI-Methoden in den Materialwissenschaften

Ein Beitrag von Dr. Robbert Rietkerk, robbert.rietkerk@emi.fraunhofer.de,
und Dr. Andreas Heine, andreas.heine@emi.fraunhofer.de

Methoden des maschinellen Lernens stellen eine besonders leistungsfähige Möglichkeit dar, komplexe Zusammenhänge in Daten zu erkennen und durch die Auswertung einer großen Anzahl von Versuchsergebnissen herauszuarbeiten, anders als das bei der Betrachtung beschränkter, einzelner Versuchsserien und deren Auswertung mit konventionellen Methoden möglich wäre. Das Fraunhofer EMI untersucht daher, wie maschinelles Lernen die Simulation endballistischer Prozesse unterstützen kann, insbesondere im Hinblick auf eine wesentliche Herausforderung, die in der Beschreibung und Modellierung des Verhaltens von Materialien unter kurzzeit-dynamischen Lasten liegt.

Werkstoffprüfung unter idealisierten Bedingungen

Für simulationsgestützte Analysen zu endballistischen Wirkprozessen, beispielsweise der Antwort einer Panzerung auf Beschuss, werden prognosefähige Modelle benötigt, die das auftretende Werkstoffverhalten quantitativ korrekt beschreiben. Dazu werden unterschiedliche Werkstoffversuchstypen angewendet, um das Verhalten der Werkstoffe unter verschiedenen Belastungsarten zu charakterisieren. Zum Beispiel werden quasistatische

Zugversuche verwendet, um die Werkstoffe unter idealisiert langsamen Deformationsgeschwindigkeiten ohne Temperaturerhöhung zu charakterisieren. Das Verhalten bei schnellen Deformationen oder bei erhöhten Temperaturen wird dann in separaten Versuchen betrachtet, wie etwa in dynamischen Zugversuchen oder in quasistatischen Zugversuchen bei erhöhter Temperatur.

Erfassung der Realität mittels maschinellen Lernens

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise kann die Realität jedoch nicht voll erfassen. So kann eine Werkstoffdeformation nicht ohne Geschwindigkeit erreicht werden. Der quasistatische Versuch ist somit eine Idealisierung. Ebenso kann Deformation nicht ohne Temperaturerhöhung erreicht werden. In einem realen Werkstoffversuch werden zentrale Größen wie Dehnung, Deformationsgeschwindigkeit oder Temperatur daher immer gleichzeitig variiert. Eine der Realität gerecht werdende Erfassung dieser hochkomplexen und verkoppelten Zusammenhänge auf Basis von Versuchsdaten ist aber mittels Techniken des maschinellen Lernens möglich. Deswegen wird maschinelles Lernen verwendet, um für die Anwendungen im Bereich der Endballistik verbesserte Simulationsmodelle zu erlangen.



Expertinnen und Experten für Wirksysteme aus sieben europäischen Nationen während des Kick-off-Meetings im Dezember 2022 in Schrobenhausen. © TDW

NEWHEAT – wehrtechnische Forschung für Europa

Das Fraunhofer EMI bringt seine Kompetenzen im Bereich der Werkstoffuntersuchung und modellierung sowie der numerischen Simulation der Projektil-Ziel-Interaktion im Projekt NEWHEAT ein. Mit europäischen Partnern werden im Rahmen des von der Europäischen Kommission 2018 vorgeschlagenen und im Europaparlament 2021 beschlossenen European Defense Fund (EDF) gemeinschaftliche Fähigkeiten im Bereich der Wehrtechnik aufgebaut.

Die steigende Komplexität von Technologien und Systemen, begrenzte nationale Ressourcen sowie potenzielle Bedrohungen aus dem Außenraum machen die Zusammenarbeit der Nationen in Europa notwendig. Ein Beispiel für eine derartige Kooperation im Bereich der Verteidigungsforschung ist das EU-Projekt NEWHEAT (New European Warhead Technology). Hier arbeiten Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen aus Deutschland, Finnland, Frankreich, Norwegen, Polen, Schweden und Spanien an neuen Wirktechnologien. Das Fraunhofer EMI untersucht mit Partnern aus anderen Nationen neue Bekämpfungsmechanismen mit dem Schwerpunkt Betonpenetration.

Future Security 2023: Unsere Sicherheit ist unteilbar

Ein Beitrag von Birgit Bindnagel, birgit.bindnagel@emi.fraunhofer.de

Future Security Security Research Conference



Die Future Security ist seit 2006 eine Begegnungsplattform für Forschende, Expertinnen und Experten sowie für weitere Akteurinnen und Akteure aus Wissenschaft, Industrie und Politik in Deutschland.

Mit den Themenschwerpunkten Resilienz, Quantentechnologien und Drohnen-detektion und -abwehr fand vom 6. bis 8. Februar 2023 die Future Security in Berlin statt.

Die Konferenz stand unter der Überschrift: »Unsere Sicherheit ist unteilbar! Müssen innere und äußere Sicherheit zusammen gedacht werden?«

Die Forschungskonferenz des Fraunhofer-Leistungsbereichs Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS ist seit 2006 Begegnungsplattform für Forschende, Expertinnen und Experten sowie für weitere Akteurinnen und Akteure aus Wissenschaft, Industrie und Politik in Deutschland.

Das EMI war auf der Future Security mit mehreren Beiträgen vertreten: Professor Stefan Hiermaier hielt eine Keynote mit dem Titel: »Resilienz – Ingenieure bewältigen Krisen«. Er zeigte darin auf, wie Resilience Engineering dabei helfen kann, den Herausforderungen durch Klimawandel, Energiekrise und anderen Bedrohungen zu begegnen.

Dr. Kai Fischer sprach zum Thema »Datengetriebene Bewertung der Krisenfestigkeit von Kommunen – Resilienzbewertung mittels Datenraumfunktionalitäten«.

In der begleitenden Ausstellung veranschaulichte ein EMI-Exponat zur Drohnenabwehr, wie Laserstrahlung für die Bekämpfung von Drohnen eingesetzt werden kann und wie die Drohne durch Laserstrahlen geschädigt wird. Das Thema Schutz kritischer Infrastrukturen adressierte das EMI-Modell einer angespannten Pipeline.

Die Konferenz Future Security wird vom Fraunhofer-Leistungsbereich Verteidigung, Vorbeugung und Sicherheit VVS veranstaltet. Der Fraunhofer VVS steht für Forschung und Entwicklung auf den Gebieten Verteidigung und zivile Sicherheit. Durch seine vielfältigen Kompetenzen und Forschungsleistungen überzeugt der VVS mit anwendungsnahen Lösungen bis hin zur operativen Unterstützung – sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene.



Das Hochwasser im Ahrtal hat gezeigt, wie verwundbar unsere vernetzten Infrastrukturen sind. © Adobe Stock



Geschäftsfeld Sicherheit und Resilienz



Einleitung	32
Menschen im Geschäftsfeld Sicherheit und Resilienz ...	34
Schutz und Resilienz von Infrastrukturen	36
Datenbasierte kommunale Resilienzbewertung zur Charakterisierung der Krisenfestigkeit	40
Kryogener Beton zum Schutz von Flüssigerdgas(LNG)-Tanks	41
Lebensrettung aus der Luft	42
EMI unterstützt Sicherheitsbehörden bei der Gefahrenabwehr	43

Geschäftsfeld Sicherheit und Resilienz

Zeitenwende in der militärischen und der zivilen Sicherheit

Mit dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine erlebt Europa seit März 2022 eine Zeitenwende, die weit über rein militärische Perspektiven von Sicherheit und Verteidigung hinausgeht und in Deutschland Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gleichermaßen herausfordert. Ob es die sichere und verlässliche Versorgung mit Energie und Rohstoffen ist, die Sicherheit des öffentlichen Verkehrs, des Finanzwesens oder auch der Zulieferketten über globale Handelswege: Das Thema Sicherheit als Grundlage von Wohlstand und Freiheit steht ganz oben auf der Agenda.

Diese massive Disruption findet statt in einer Zeit, die ohnehin geprägt ist von gewaltigen Veränderungsprozessen: die Energiewende in Deutschland, die zunehmende Digitalisierung und damit zusammenhängende Cyberverwundbarkeiten, die Zunahme an Automatisierung in nahezu allen Lebensbereichen zum Beispiel mit Methoden der künstlichen Intelligenz, um nur einige Beispiele zu nennen. Jedes dieser Themen birgt neue Herausforderungen im Kontext von Sicherheit und Resilienz. So ergeben sich einerseits Chancen, um mithilfe digitaler Lösungen Sicherheit

und Resilienz besser planbar und erlebbar zu gestalten. Oder um mithilfe verfügbarer Daten und entsprechender Resilienzmodelle die Widerstandskraft von Gesellschaften gegenüber zukünftigen Pandemien zu stärken. Andererseits ergeben sich durch den zunehmenden Grad der Vernetzung und Automatisierung auch zusätzliche Verwundbarkeiten gegenüber Störungen und Schocks, die es erst einmal zu erkennen und dann mittels neuartiger Sicherheitskonzepte zu begrenzen gilt.

Im folgenden Kapitel gibt Dr. Malte von Ramin einen Überblick über das Thema Schutz kritischer Infrastrukturen und zeigt auf, in welcher Themenbreite das Fraunhofer EMI hierfür Lösungen entwickelt. Im Projekt HERAKLION wird deutlich, wie mithilfe eines Datenraumkonzepts die Widerstandsfähigkeit von Kommunen gegenüber unterschiedlichen Katastrophen gestärkt wird. Anschließend geht es um die Sicherheit von Energiespeichern, bevor abschließend das Projekt HamsTeR vorgestellt wird, welches sich zum Ziel gesetzt hat, das von gedruckten Kunststoffwaffen ausgehende Gefahrenpotenzial zu ermitteln.



Die Zeitenwende reicht weit über militärische Perspektiven von Sicherheit hinaus und wird sich auch auf die zivile Sicherheitsforschung auswirken.«

Daniel Hiller

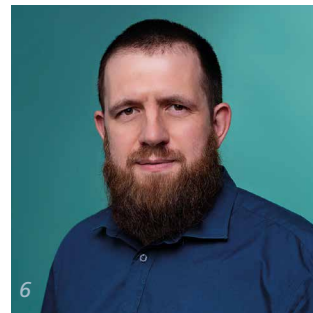
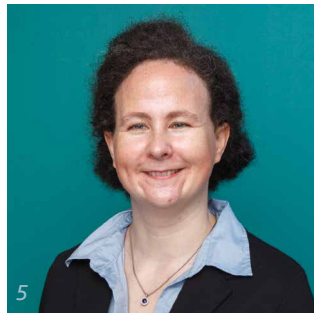


Daniel Hiller

Geschäftsfeldleiter Sicherheit und Resilienz
daniel.hiller@emi.fraunhofer.de

s.fhg.de/emi-sicherheit-resilienz

Menschen im Geschäftsfeld Sicherheit und Resilienz



Hier lassen wir sechs Forscherinnen und Forscher aus dem Geschäftsfeld Sicherheit und Resilienz zu Wort kommen.

- 1 Dr. Malte von Ramin
malte.von.ramin@emi.fraunhofer.de
- 2 Dr. Kai Fischer
kai.fischer@emi.fraunhofer.de
- 3 Christoph Roller
christoph.roller@emi.fraunhofer.de

- 4 Dr. Maria Luisa Ruiz Ripoll
maria.luisa.ruiz.ripoll@emi.fraunhofer.de
- 5 Dr. Victoria Heusinger-Heß
victoria.heusinger-hess@emi.fraunhofer.de
- 6 Johannes Solass
johannes.solass@emi.fraunhofer.de

Schutz und Resilienz von Infrastrukturen

Ein Beitrag von Dr. Malte von Ramin, malte.von.ramin@emi.fraunhofer.de

Die Infrastrukturen in Deutschland sind nicht nur mit Blick auf die Versorgungssicherheit und die Sicherstellung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit, sondern auch hinsichtlich der Art und Weise, wie wir als Gesellschaft leben wollen, von herausragender Bedeutung.

Primär stehen selbstverständlich die kritischen Infrastrukturen im Fokus dessen, was es zu schützen gilt. Zunehmend wird aber auch die zwar nicht überlebensnotwendige, aber eben auch hohe gesellschaftliche Bedeutung der weiteren Infrastrukturen als besonders schützenswert erkannt. Wie anfällig unsere Infrastrukturen gegenüber Naturkatastrophen, Krisen, Cyberangriffen und Terroranschlägen bis hin zu den Auswirkungen von Kriegen sind, wurde uns im vergangenen Jahr 2022 erneut deutlich vor Augen geführt.

Die meisten Infrastrukturen sind heutzutage technologisch hochkomplex und softwaregestützt, was sie vulnerabel macht. Darüber hinaus ist ihnen in der Regel ebenfalls gemeinsam, dass sie immer auch physikalisch verwundbar sind. Die Kommunikationsleitungen bei der Deutschen Bahn wurden im Oktober 2022 physikalisch durchtrennt; die drei Stränge der Nord-Stream-Pipelines wurden im September 2022 Ziele eines Anschlags mit Explosivstoffen. Beide Systeme hätten auch durch Cyberangriffe gestört

werden können. Physikalisch waren sie offenbar angreifbarer, weil der entsprechende Schutz nicht ausreichend war. Neben diesen gezielten Angriffen verdeutlichen auch das Umknicken von Strommasten bei Eisbehang und der Wegfall von Versorgungsleitungen bei Hochwasserlagen die hohe Anfälligkeit unserer Infrastruktur gegenüber Naturgefahren, die insbesondere aufgrund des Klimawandels in ihrer Intensität zunehmen werden.

Baulicher Schutz und Risikomanagementkonzepte

Der bauliche Schutz am EMI beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit dem physikalischen Schutz von Infrastrukturen gegenüber extremen Belastungen, seien sie aus Naturgefahren oder aus menschlichem Handeln hervorgegangen. Dabei ging es in der Vergangenheit wie auch heute um die Steigerung der Robustheit von gebauter Infrastruktur. Nun ist der Erhalt von Tragstrukturen allerdings kein Selbstzweck, sondern dient dem Funktionserhalt für die Bedürfnisse der Menschen. Dazu gehört insbesondere auch das Bedürfnis nach Schutz – für Leib und Leben, für wirtschaftliche Bedürfnisse, für Lebensweisen. Daraus leitet sich der Blick des EMI auf das mit einer Gefährdung einhergehende Risiko für die betroffenen Personen ab, welches in Risikoanalysen quantitativ beschrieben wird. In Risikomanagementkonzepten wird das



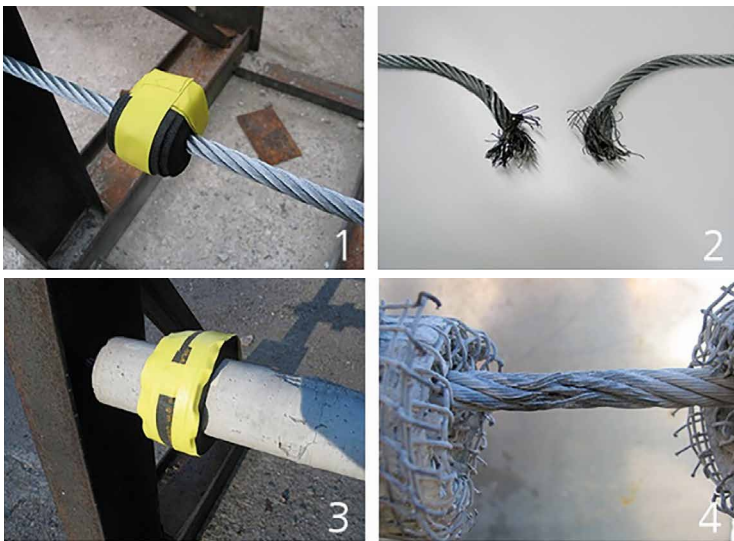
Der Schutz von Versorgungsnetzen vor menschengemachten und natürlichen Gefährdungen ist ein Thema der aktuellen Forschung am EMI. © Adobe Stock

Risiko aus der Analyse heraus anschließend in einen tolerablen Wertebereich gesteuert. Das Risiko wird dabei berechnet aus Eintrittswahrscheinlichkeiten – des Ereignisses an sich, aber auch davon, dass das Ereignis überhaupt potenziell schädigend sein kann –, den betrachteten Konsequenzen und der Exposition, welche beschreibt, in welchen Zeiträumen Personen und Personengruppen einer Gefährdung ausgesetzt sind. In diesem Themenbereich wurde auch im Zeitraum 2022/2023 am EMI weiterhin erfolgreich wissenschaftlich gearbeitet und geforscht. Sowohl in zahlreichen Projekten für öffentliche Behörden, Ministerien und die Privatwirtschaft als auch in Projekten mit hohem öffentlichem Interesse wie beispielsweise bei der Unterstützungsleistung für das Schweizer Bundesamt für Umwelt in Bezug auf die Bewertung der Arbeiten am ehemaligen Munitionslager Mitholz. Auch die Grundlagenforschung in diesem Bereich wurde weiter vorangetrieben,

beispielsweise bei den in einem weiteren Beitrag auf Seite 41 beschriebenen Materialcharakterisierungen für kurzzeitdynamisch belasteten Beton unter kryogenen Temperaturbedingungen mit Relevanz für die sichere Aufbewahrung von Flüssiggas in Tanks.

Von Robustheitsanalyse und Risikomanagement zur Quantifizierung technischer Resilienz

Einzelne Infrastrukturen erfüllen ihre Funktion häufig als verknüpfte Komponenten von zusammenhängenden Netzwerken, die bei Ausfall der einzelnen Infrastrukturkomponente schnell ihre Funktion nicht mehr erfüllen können. Vor einigen Jahren erfolgte am EMI der logische nächste Schritt in der Ausweitung des Themenbereichs über die Robustheitsanalyse und das Risikomanagement hinaus. ►



1. Versuchsaufbau eines Drahtseils mit einer sichernden Schneidladung.
2. Schädigungsbild nach Einwirken einer Schneidladung auf ein ungeschütztes Drahtseil.
3. Versuchsaufbau mit einer Schutzhülle aus Hochleistungsbeton um das Drahtseil samt Schneidladung.
4. Schädigungsbild nach Einwirken einer Schneidladung eines vorab mit Hochleistungsbeton umhausten Drahtseils.

Mit der Quantifizierung der technischen Resilienz wird die Betrachtung auf die Gesamtsystemebene bezogen. Dabei geht es nicht allein um die Abbildung multidimensionaler Systeme und deren Anfälligkeit gegenüber kaskadenhaft fortschreitenden Effekten, sondern um die Betrachtung der Resilienz sozio-technischer Systeme unabhängig von der spezifischen Art einer Störung. Die technische Resilienz schließt die Bewertung der Robustheit ein, betrachtet zusätzlich aber

auch die Zeitspanne, in der ein System nach einem Leistungsabfall mindestens zu seiner ursprünglichen Leistungsfähigkeit zurückkehren kann. Ebenso gehört die Lern- und Anpassungsfähigkeit des Systems dazu, sodass auf zukünftige Störungen besser reagiert werden kann. Ein resilientes System wird also durch eine beliebige Störung nur minimal in seiner Leistungsfähigkeit eingeschränkt und erlangt in möglichst kurzer Zeit mindestens seinen vorherigen Zustand.



Gasspeicher und Windkraftanlagen sind wichtige Infrastrukturen, um unsere wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit sicherzustellen. © Adobe Stock



Mit der Stoßrohranlage BlastStar können am Fraunhofer EMI Stoßwellenbelastungen infolge von Sprengstoff- und Gasexplosionen simuliert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen dazu, eingesetzte Materialien und Strukturen zu optimieren.

Geht es um die Resilienzsteigerung von Infrastrukturen, gehören zu den aktuell betrachteten Bereichen Stromnetze, der Straßen- und Schienenverkehr, die Gasversorgung sowie Flughäfen dazu. Diese werden ergänzt durch Zuverlässigkeitsbetrachtungen von Finanztransaktionsnetzen und die Analyse der Resilienz wirtschaftlicher Unternehmen. Die Kombination aus wirtschaftlicher Resilienzbewertung und Identifikation von effektiven Strukturverstärkungsmaßnahmen auf baulicher und technischer Ebene gegen extreme Belastungen, die als Folge des Klimawandels zukünftig zu erwarten sind, wurde im vergangenen Jahr beispielsweise erfolgreich in der Arbeit für ResCentric (www.ResCentric.com) betrachtet. Bei ResCentric geht es um die wirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse resilienzsteigernder Maßnahmen an Einzelgebäuden gegenüber sich durch den Klimawandel verändernden Flut- und Extremwindereignissen, insbesondere mit Blick auf die Konsequenzen für das gesamte Gebäudeportfolio von Investoren.

Ein weiteres Beispiel von im letzten Jahr erfolgreich bearbeiteten Projekten im Bereich der Resilienz von Infrastrukturen ist RESIST, in dem das EMI sich mit den aus dem Klimawandel resultierenden Herausforderungen für das Stromnetz und dessen Ausbau beschäftigt. Dieses, wie auch weitere der Projekte zum Schutz und der Resilienz von Infrastrukturen werden auf der Homepage des EMI auf den Forschungsseiten des Geschäftsfelds Sicherheit und Resilienz beschrieben.

Mit Blick auf die Herausforderungen, denen wir uns in Deutschland, in Europa und weltweit hinsichtlich menschengemachter Krisenfälle und klimabedingter Bedrohungen stellen müssen, sind wir zuversichtlich, mit unserer Forschung aus den zahlreichen Projekten des letzten Jahres einen erfolgreichen Beitrag zur Bewältigung dieser Aufgaben geleistet zu haben. ■



Datenbasierte kommunale Resilienz- bewertung zur Charakterisierung der Krisenfestigkeit

Ein Beitrag von Dr. Kai Fischer, kai.fischer@emi.fraunhofer.de

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts HERAKLION wird ein Datenraum entwickelt, um die Resilienz von Kommunen zu charakterisieren.

HERAKLION – heuristische Resilienzanalysen mittels Datenraumfunktionalitäten

Unterschiedliche Gefahrensituationen, wie die Coronapandemie oder Extremwetterereignisse, führen zu Krisen und Katastrophen. Die Konsequenzen sind für unsere technisierte und global handelnde Gesellschaft komplexer geworden und erfordern eine Bewertung und Erhöhung der kommunalen Resilienz. Die Personen, die im Krisenfall Entscheidungen treffen müssen, benötigen belastbare Informationen.

Mithilfe eines Datenraumkonzepts wird im BMBF-Projekt HERAKLION eine innovative Methodik entwickelt, um die Resilienz einer Kommune zu bewerten. Verschiedenste Datenquellen einer Kommune werden zusammengeführt, statistische oder heuristische Methoden liefern ein Verständnis zu Ursache, Wirkung sowie der Effektivität von Gegenmaßnahmen. Hierbei wird Resilienz quantitativ charakterisiert und ermöglicht eine Analyse vor, während und nach dem

Auftreten einer Krise. Die Methodik bewertet einzelne Resilienzphasen wie Vorbereitung, Prävention, Schutz, Reaktionsschnelligkeit und Wiederaufbau. Ein Dashboard fasst die Resultate zusammen und liefert so Entscheidungsunterstützung.

Gemeinsam mit zehn assoziierten Stadt- und Landkreisen wird im Rahmen des Projekts diesen Fragen nachgegangen:

- Wie lässt sich eine Methodik zur Messung und Erhöhung der Resilienz einer Kommune entwickeln?
- Wie kann ein datenbasierter Prozess zur Entscheidungsunterstützung im Krisenfall etabliert werden?

Der Datenraum-Demonstrator befasst sich mit den Anwendungsfällen Pandemie und Extremwetter und zeigt auf, wo potenzielle Schwachpunkte in einer Kommune vorliegen und wie nachhaltig die Krisenfestigkeit mit quantitativen Resilienzanalysen gesteigert werden kann. Mithilfe verschiedener Performanzen wird das Verhalten einer Kommune unter Auftreten von Störungen charakterisiert.

Weitere Informationen sind unter www.heraklion-projekt.de verfügbar.

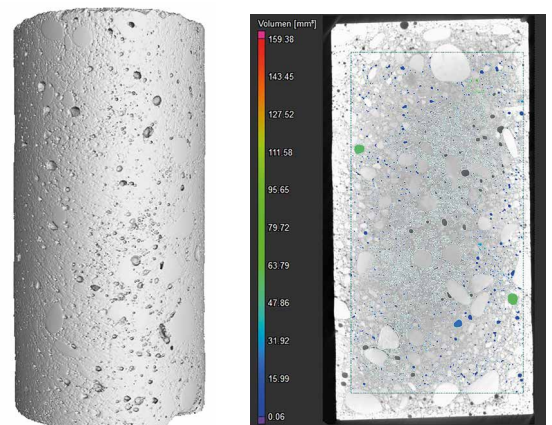
Kryogener Beton zum Schutz von Flüssigerdgas(LNG)-Tanks

Ein Beitrag von Christoph Roller, christoph.roller@emi.fraunhofer.de, und Dr. Maria Luisa Ruiz Ripoll, maria.luisa.ruiz.ripoll@emi.fraunhofer.de

Wie können zukünftige Energieversorgungssysteme wie Liquefied-Natural-Gas(LNG)-Tanks effizienter und widerstandsfähiger gegen natürliche und vom Menschen verursachte Gefahren ausgelegt werden?

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, das Verhalten von Beton bei kryogenen Temperaturen zu charakterisieren, um ein Material für die Konstruktion und den Bau von Tanks zur Speicherung von flüssigem Erdgas (LNG) und anderen Arten von verflüssigten Gasen zu entwickeln. Das Interesse an dieser Arbeit ergibt sich aus den steigenden Anforderungen an Transport und Speicherung von LNG als fossilem Brennstoff, verursacht durch die Notwendigkeit, alternative Energiequellen zu fördern, und verstärkt durch die Energiekrise als Folge der aktuellen Konflikte in Europa.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der UPM (Universidad Politécnica de Madrid) und dem Fraunhofer EMI wurde eine komplexe experimentelle Kampagne erarbeitet und durchgeführt. In einem ersten Schritt konzentrierten wir uns auf die Charakterisierung von zwei Betonmaterialien – einem Standardbeton als Referenz und einer kryogenen Komposition. Diese Materialien wurden in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis hinunter zu minus 50 Grad Celsius getestet, wobei der Einfluss des Wassergehalts und der Belastungsrate unter Druck und Zug analysiert wurde. Während die Ergebnisse bei Raumtemperatur für beide Betone den erwarteten Trend im Verhalten zeigten, lieferten die Tests im kryogenen Bereich einige interessante und bemerkenswerte Ergebnisse, die im Rahmen der Fortsetzung der Zusammenarbeit weiter validiert werden müssen.



3D-CT-Scan einer kryogenen Betonprobe (links) und Ergebnis der Hohlraumanalyse (rechts).

Die Sicherheitsanforderungen an Transport und Speicherung von LNG als fossilem Brennstoff sind gestiegen. © Adobe Stock



Drohnenystem mit Sensorik (LIDAR, Radar) in einem Non-vital-sign-Setting. Die Messungen wurden während einer Messkampagne auf dem THW-Übungsplatz Wesel durchgeführt.

Lebensrettung aus der Luft

Ein Beitrag von Dr. Victoria Heusinger-Heß, victoria.heusinger-hess@emi.fraunhofer.de

Lebenszeichendetektion im Katastrophenfall via UAV-getragener Sensorik

Unmanned-Aerial-Vehicle(UAV)-getragene Sensoren bieten im Katastrophenfall Hilfe bei der Auffindung von Opfern. Das EMI ist mit KI-basierten Datenanalysemethoden beteiligt.

Das BMBF-geförderte Projekt UAV-Rescue erforscht den Einsatz von drohnengetragener Sensorik zur Identifikation von Lebenszeichen.

UAV-Rescue ist ein interdisziplinäres, bilaterales Projekt, das im Rahmen der BMBF-Sicherheitsforschung gefördert und mit einem österreichischen Partnerprojekt durchgeführt wird. Es erforscht aus zahlreichen Perspektiven, ob, wie und mit welchen Konsequenzen sich auf einer Drohne befindliche Radar- und LIDAR-Sensorik zur Auffindung von Personen in Katastrophenfällen, wie zum Beispiel dem Erdbebenunglück in Syrien und der Türkei, nutzen lässt. Dabei konzentriert sich das deutsche Projektteam vorwiegend auf die Indoor-Erkundung, während das österreichische Partnerprojekt insbesondere die Großschadenslage ins Auge fasst.

Das EMI erforscht hierbei die Möglichkeiten, die KI-Methoden bieten, um die eigentlich vorwiegend zur Navigation und Kollisionsvermeidung aufgenommen Radardaten zu nutzen, um Lebenszeichen zu identifizieren. Dass radarbasierte Sensorik dazu prinzipiell verwendet werden kann, ist aus der medizinischen Patientenüberwachung bekannt. Allerdings muss die Auswertungsalgorithmik sehr robust sein, um den Störungen, die aus der Bewegungen der Drohne und der rauen Umgebung eines Außeneinsatzes resultieren, begegnen zu können. Das EMI konnte im Projekt zeigen, dass künstliche neuronale Netze in der Lage sind, in diesem fordernden Kontext mit ausreichender Genauigkeit Lebenszeichen zu identifizieren und zu unterscheiden, ob es sich um Zeichen von Leben oder anderweitig bewegten Objekten im Raum, wie zum Beispiel im Wind flatternde Textilien oder Zimmerpflanzen, handelt. Dabei konnten durch die intensive Mitarbeit an der begleitenden Ethikforschung auch die ethischen und einsatzorganisatorischen Rahmenbedingungen evaluiert und positiv bewertet werden.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

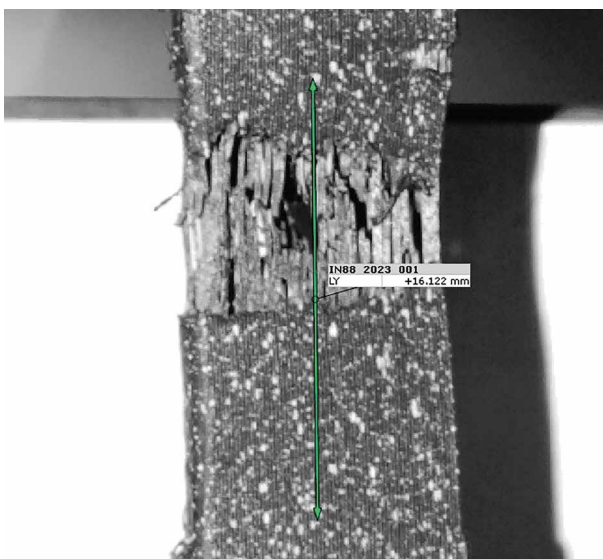
EMI unterstützt Sicherheitsbehörden bei der Gefahrenabwehr

Ein Beitrag von Johannes Solass, johannes.solass@emi.fraunhofer.de

3D-gedruckte Schusswaffen stellen Sicherheitsbehörden und Gesetzgebung vor neue Herausforderungen.

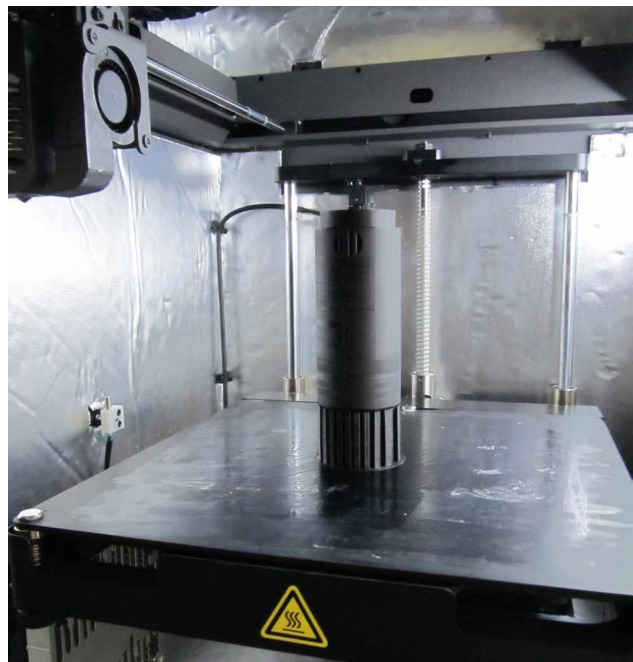
Die Gefährdungen, die von mittels 3D-Druck hergestellten Schusswaffen ausgehen, sind vielfältig. Seit der Präsentation einer ersten gedruckten Kunststoffwaffe im Jahr 2013 hat sich die Technologie zur Herstellung deutlich weiterentwickelt – bei gleichzeitig erhöhter Verfügbarkeit. Allerdings gibt es bislang nur wenige bekannte wissenschaftliche Untersuchungen zu diesem Thema. Das Fraunhofer EMI untersucht zusammen mit dem Bundeskriminalamt (BKA) einige dieser Bedrohungen im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts HamsTeR – Handwaffen mit selbstgedruckten Teilen – eine Risikoabschätzung. Diese sind unter anderem:

- Wie hoch ist der Aufwand zur Herstellung einer gedruckten Waffe?
- Welches Gefährdungspotenzial erreichen gedruckte Waffen?
- Welche forensisch verwertbaren Spuren entstehen bei Herstellung und Schussabgabe?
- Kann die Schussabgabe einer gedruckten Kunststoffwaffe zuverlässig simuliert werden?



Optische Dehnungsmessung an gedrucktem Probekörper.

Hierfür werden am EMI gedruckte Schusswaffen hergestellt und intensiv experimentell und numerisch untersucht. So lassen sich wertvolle Informationen zur Einschätzung des Gefahrenpotenzials gewinnen. Die Informationen dienen der Gefahrenabwehr und werden vom Verbundpartner BKA verwertet. Sie könnten beispielsweise bei Gerichtsprozessen, in denen der Tathergang möglichst genau rekonstruiert werden muss, zur Beantwortung relevanter Fragen hinsichtlich Tatwaffe und gefundener Projektile eingesetzt werden. Darüber hinaus dient die im Themenfeld erlangte Expertise der Beratung des Gesetzgebers.



Gedrucktes Gasdruckmessrohr im Drucker.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Das Risiko von Kopf-, Nacken-, Brust- und Bauchverletzungen wird unter Einsatz des Dummys THOR-50M im Röntgencrash untersucht.



Geschäftsfeld Automotive



Einleitung	46
Menschen im Geschäftsfeld Automotive	48
Künstliche Intelligenz für Verletzungsprognosen in Echtzeit	50
Systematisierung der Lastfalldefinition bei Komponentenversuchen	54
Volldigitale Produktentwicklung von nachhaltigen Elektroantriebsarchitekturen	55
AVEAS – Verkehrsszenarien erkennen, analysieren und simulieren für autonomes Fahren	56
KIsSME – Datenaufnahme von kritischen Situationen im Straßenverkehr	57

Geschäftsfeld Automotive

Mobilität ist ein wesentliches Merkmal einer modernen Gesellschaft. Eine entscheidende Voraussetzung für die Zulassung wie auch für die Akzeptanz neuer Fahrzeuge ist nach wie vor deren Sicherheit. Dabei erleben wir aktuell eine deutliche Erweiterung dieses Begriffs von der klassischen passiven Fahrzeugsicherheit – also der Crashesicherheit – hin zur aktiven Fahrzeugsicherheit und der Sicherheit von verletzlichen Verkehrsteilnehmenden. Dabei führen neue Technologietrends wie alternative Antriebe sowie die stetige Verschärfung von Zulassungskriterien und Ratings und die kontinuierliche Verkürzung von Entwicklungszyklen zu permanent steigenden Anforderungen an die Fahrzeugentwicklung. Um diesen Anforderungen zu begegnen, bedarf es einer zunehmenden Digitalisierung und Virtualisierung in der Absicherung der Sicherheit aller Verkehrsteilnehmenden.

Diese Herausforderungen werden im Geschäftsfeld Automotive in den unterschiedlichen Arbeitsgruppen adressiert. In der Gruppe Agentenbasierte Simulationen liegt ein Fokus auf der Weiterentwicklung realitätsabbildender Verkehrsflusssimulation und der Identifikation kritischer Situationen. Welche Konsequenzen solche kritischen Situationen für verletzliche Verkehrsteilnehmende haben können, wird in der Gruppe Human Body Dynamics im Projekt ATTENTION untersucht. Ein völlig neuer Ansatz zur prognosefähigen Materialmodellierung mit der Vision noch prognosefähigerer Strukturauslegung wird im Verbundprojekt AIMM erforscht.



**Zunehmende
Digitalisierung und
Virtualisierung dienen
der Sicherheit aller
Verkehrsteilnehmenden.«**

Dr. Jens Fritsch



Dr. Jens Fritsch

Geschäftsfeldleiter Automotive
jens.fritsch@emi.fraunhofer.de

s.fhg.de/emi-automotive

Menschen im Geschäftsfeld Automotive



Hier lassen wir sechs
Forscherinnen und Forscher aus
dem Geschäftsfeld Automotive
zu Wort kommen.

1 Niclas Trube
niclas.trube@emi.fraunhofer.de

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

3 Thomas Soot
thomas.soot@emi.fraunhofer.de

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

5 Florian Lüttner
florian.luettner@emi.fraunhofer.de

6 Dr. Mirjam Fehling-Kaschek
mirjam.fehling.kaschek@emi.fraunhofer.de

Künstliche Intelligenz für Verletzungsprognosen in Echtzeit

Ein Beitrag von Niclas Trube, niclas.trube@emi.fraunhofer.de

Fraunhofer EMI mit Fokus auf VRU-Pkw-Kollisionssimulationen

Ziel des Projekts ATTENTION ist es, eine Methode zur Echtzeit-Verletzungsprognose von besonders gefährdeten Verkehrsteilnehmenden (Vulnerable Road Users, VRUs), wie Fußgängern oder Radfahrenden, zu entwickeln. Hierzu werden datengetriebene Verfahren genutzt, um aus fahrzeuggebundenen Videodaten und virtuellen Tests mithilfe digitaler Menschmodelle ein situationsspezifisches Verletzungsrisiko zu bestimmen. Prospektiv ermöglicht die Verletzungsprognose durch Strategien der Risikominimierung des automatisierten Fahrzeugs einen sowohl sicheren als auch effizienten Verkehr.

Multimodaler Verkehr und menschliche Individualität als große Herausforderungen für das autonome Fahren

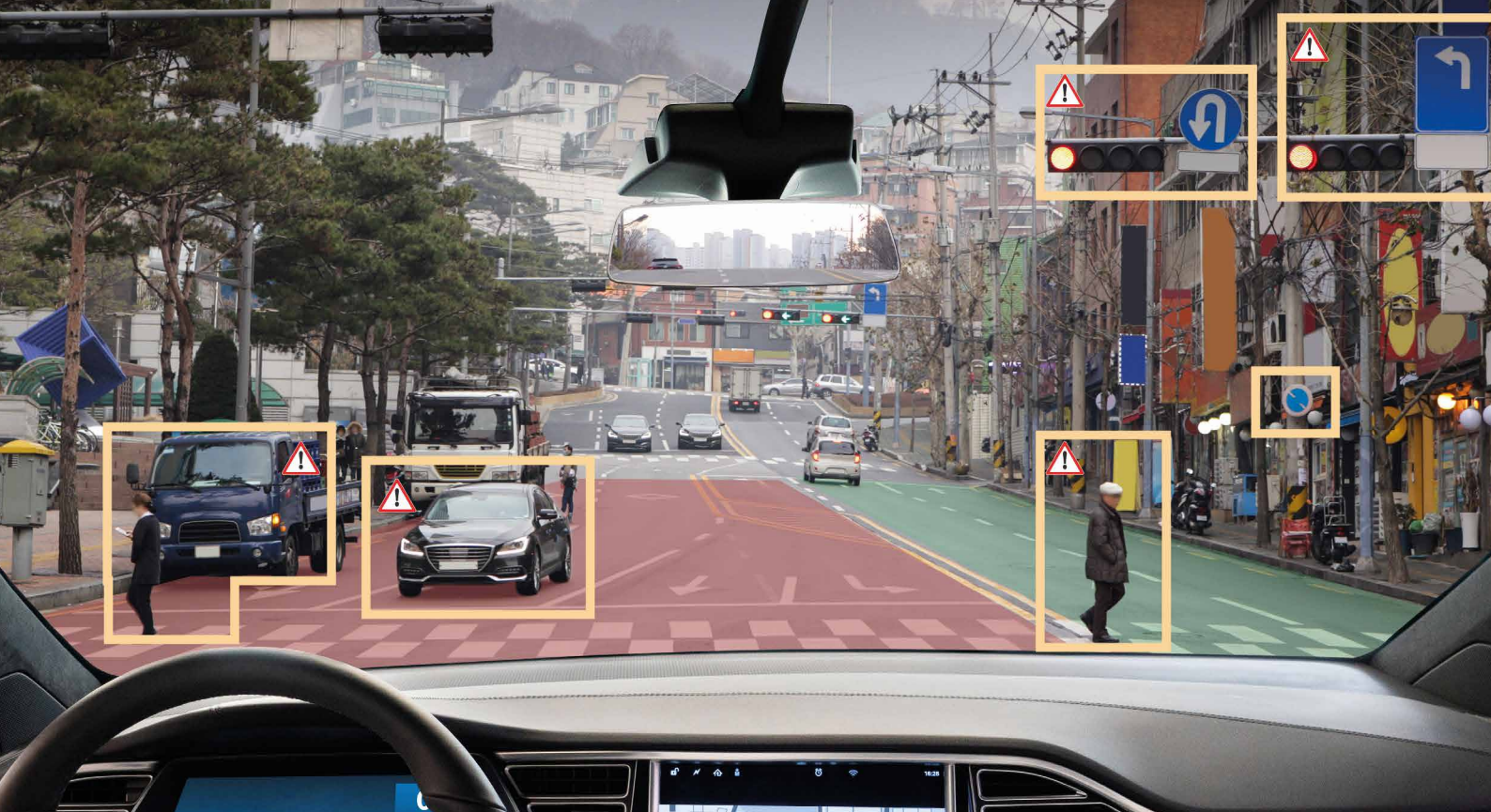
Die urbane Mobilität ist in vielen deutschen Innenstädten geprägt durch die Mehrfachnutzung begrenzter und enger Verkehrsflächen sowie eine Vielzahl unterschiedlicher Verkehrsteilnehmender, die in ihrer Gesamtheit den multimodalen Verkehr darstellen. Eine zentrale Zukunftsfrage für Städte und Mobilitätsdienstleister ist die effiziente und gleichzeitig sichere Nutzung geteilter öffentlicher Räume. Beteiligte Verkehrsteilnehmende unterscheiden sich sehr stark hinsichtlich

Geschwindigkeit, Manövrierfähigkeit und Verletzbarkeit. Die großflächige Etablierung des automatisierten Verkehrs verspricht für deren Interaktion eine Verringerung der Verkehrsunfälle und tödlichen Verletzungen im Straßenverkehr. Dennoch stellen komplexe innerstädtische Szenarien, ungerichtete Verkehrsströme und menschliche Individualität die zunehmende Automatisierung vor große Herausforderungen.

Einordnung in bestehende Sicherheitskonzepte

Kollisionen zwischen Fahrzeugen und besonders gefährdeten Verkehrsteilnehmenden führen nach wie vor zu einer Vielzahl von Unfalltoten. Die Anzahl der Verkehrsunfälle von Fahrradfahrenden hat seit 2010 in der EU nicht abgenommen und in Deutschland sogar zugenommen. Auch im multimodalen Verkehr der Zukunft können Kollisionen zwischen Fahrzeugen und VRUs aufgrund der zuvor genannten Aspekte, wie der menschlichen Individualität, nicht ausgeschlossen werden.

In Bezug auf die Verkehrssicherheit von VRUs muss es das oberste Ziel sein, einen Unfall bestmöglich zu vermeiden. Im Fahrzeug implementierte Sensorik und Kommunikationssysteme werden bereits genutzt, um potenzielle Kollisionen frühzeitig zu identifizieren



und beispielsweise über Assistenzsysteme den Sicherheitsabstand anzupassen und mit aktiven Brems- und Lenksystemen Kollisionen zu vermeiden. Doch was, wenn der Unfall unvermeidbar ist?

Wenn die »Vision Zero« (keine Verkehrstoten mehr ab 2050) realistisch adressiert werden soll, muss akzeptiert werden, dass nicht alle Unfälle vermeidbar sind und dass der aktuelle und zukünftige Verkehr daher beispielsweise durch menschliche Individualität von einem gewissen Unsicherheitsfaktor begleitet wird. Folglich müssen neben Strategien der Unfallvermeidung auch die Unfallfolgenminderung und damit eine Verletzungsreduzierung berücksichtigt werden, womit sich die Frage stellt: Was kann im Fall einer unvermeidbaren Kollision technisch unternommen werden, um das situationsspezifische Verletzungsrisiko besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer zu senken? Diese Lücke adressiert ATTENTION in einer Proof-of-Concept-Studie.

Konzept und Ziel des Projekts

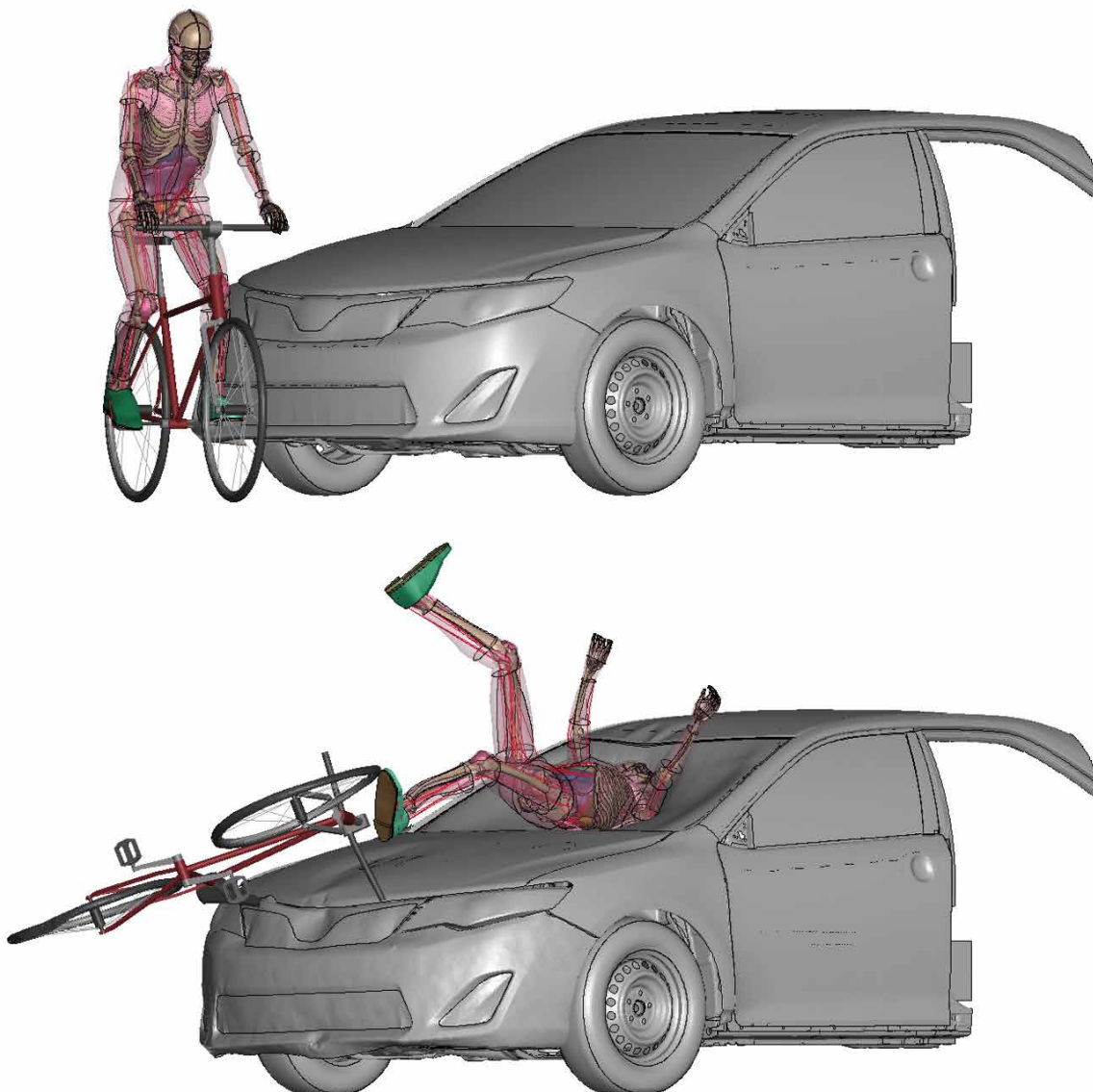
Mit dem Ziel der situationsspezifischen Vorhersage von Verletzungsrisiken werden im Projekt verschiedene Datenbanken aufgebaut, Künstliche-Intelligenz(KI)-Verfahren angewandt und miteinander verknüpft.

Zu Beginn des Projekts werden fahrzeuggebundene Videodaten von realen Fahrzeug-VRU-Kollisionen ausgewertet. In diesem Rahmen wurden Methoden zur biomechanischen und KI-basierten Bewegungsprädiktion angewandt, um eine VRU-Positions- und -Bewegungsdatenbank aufzubauen. Aus diesen Daten werden im nächsten Schritt die häufigsten Prä-Impaktpositionen des Fußgängers und Radfahrers extrahiert und in die Finite-Elemente(FE)-Umgebung überführt, indem das im Projekt verwendete FE-Menschmodell (Human Body Model, HBM) entsprechend positioniert wird. Diese Positionen umfassen beispielsweise eine mittlere Radfahrerhaltung und diverse Fußgänger-Abwehrhaltungen, die in den ausgewerteten Videodaten entsprechend beobachtet wurden. Zudem wird ein Muskelmodell mit positionsspezifischen Muskelaktivitäten in das Menschmodell integriert, um sich dem realen Kollisionsverhalten von VRUs bestmöglich anzunähern.

Das positionierte und mit Muskeln ausgestattete HBM wird anschließend gemeinsam mit einem FE-Fahrrad- und -Fahrzeugmodell in einem virtuellen Kollisionsszenario zusammengeführt, um nach Definitionen von Randbedingungen (beispielsweise Anfangsgeschwindigkeit und Aufprallwinkel) eine Fahrzeug-VRU-Kollision im FE-Code numerisch berechnen zu können. Durch eine vorherige ►

Visualisierung der VRU- und Objekterkennung in hochautomatisierten Fahrzeugen.

© Adobe Stock



Beispiel einer Kollisionssimulation zwischen einem muskelgetriebenen Fahrradfahrer- und einem Fahrzeugmodell.

Instrumentierung des Menschmodells können verletzungsrelevante Informationen wie Dehnungen oder Beschleunigungen für bestimmte Körperregionen aus der Simulation extrahiert werden. Dies ermöglicht es, Verletzungsrisiken situationsspezifisch über die FE-Simulation für verschiedenste Kollisionsszenarien berechnen zu können. Mit dem Ziel der datengetriebenen Verletzungsprognose wird über eine Vielzahl von Fahrzeug-VRU-Kollisionssimulationen eine Verletzungsdatenbank aufgebaut. Einzelne virtuelle Kollisionen werden mit Realdaten der Bosch-Unfallforschung abgeglichen und auf Plausibilität geprüft, wodurch das Vertrauen in die simulationsbasierte Verletzungsprognose

erhöht wird. Darüber hinaus werden die realen Unfalldaten verwendet, um die Grenzen des Parameterraums (zum Beispiel zulässige Kombinationen von Relativgeschwindigkeiten und Kollisionswinkeln) für die Kollisionssimulationen festzulegen.

Die mithilfe von FE-Simulationen erzeugten synthetischen Datensätze werden im nächsten Schritt genutzt, um verschiedene KI-Modelle zu trainieren. Dadurch soll es möglich sein, auch für nicht-simulierte Parameterkombinationen ein plausibles Verletzungsrisiko zu prognostizieren, wofür andernfalls eine zeitintensive FE-Simulation notwendig gewesen

wäre. Das ambitionierte Ziel des Projekts ist es, dieses situationspezifische Verletzungsrisiko möglichst in Echtzeit vorherzusagen.

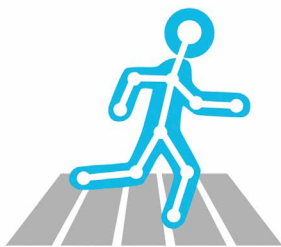
Im abschließenden Schritt des Projekts wird die KI-basierte Vorhersage von Verletzungsrisiken in einer virtuellen Fahrumgebung demonstrativ getestet. Im Detail werden Methoden zur Bewegungsvorhersage und zur KI-basierten Verletzungsrisikoprognose als aktives Sicherheitstool in ein Fahrzeug der virtuellen Fahrumgebung integriert. Das entsprechende VRU-Modell wird durch eine virtuelle Kamera erkannt und seine weitere Bewegung bis zum Kollisionszeitpunkt prognostiziert, wobei der Abstand zwischen Fahrzeug und VRU, der Aufprallwinkel und die Relativgeschwindigkeiten berücksichtigt werden. Die Brems- und Lenkmaßnahmen werden basierend auf diesen Informationen anschließend so angepasst, dass das VRU-Verletzungsrisiko im verbleibenden Zeitraum bestmöglich reduziert wird. Welche noch erreichbare Parameterkombination das prognostizierte Verletzungsrisiko des VRU bestmöglich reduziert, leitet die KI aus dem vorherigen Training mit den synthetischen Daten der Kollisionssimulation ab.

Fraunhofer EMI mit Fokus auf VRU-Pkw-Kollisionssimulationen

Das Fraunhofer EMI wird im Rahmen des Projekts ATTENTION zum Aufbau der Kollisions- und Verletzungsdatenbank beitragen und ist vertreten durch die Gruppen Human Body Dynamics und Digital Engineering. Dabei werden verschiedene Kompetenzen der beiden Gruppen kombiniert. Einerseits müssen die einzelnen FE-Modelle entsprechend für

die Datengenerierung und Extraktion der biomechanischen Verletzungsinformationen vorbereitet werden. Zudem müssen einzelne Simulationen beispielhaft mit Realunfalldaten verglichen werden mit dem Ziel, das Vertrauen in die generierten Simulationsdaten zu erhöhen. Um eine Vielzahl an Fahrzeug-VRU-Kollisionssimulationen erzeugen zu können, die auch in realen Unfalldaten beobachtet werden, müssen die Fahrzeug- und VRU-FE-Modelle zudem beliebig kombinierbar sein, um beliebige Parameterkombinationen (beispielsweise des Kollisionswinkels und der VRU-Position vor der Stoßstange) zu ermöglichen. Um den großen Datenraum an möglichen Kollisionsszenarien möglichst effizient abzudecken, ist zudem die Entwicklung und Anwendung von Methoden zur adaptiven Datengenerierung vorteilhaft. Dadurch kann trotz der langen Rechenzeiten der FE-Kollisionsrechnungen eine ausreichende Informationsgrundlage generiert werden, um entsprechende KI-Modelle mit dem Ziel der Verletzungsprognose für diesen spezifischen Anwendungsfall des Frontalaufpralls trainieren zu können. Basierend auf der Expertise in den Bereichen Biomechanik und Menschmodelle sowie datengetriebene Methoden und effiziente Generierung simulationsbasierter Trainingsdaten, baut das Fraunhofer EMI im Rahmen des ATTENTION-Projekts eine Kollisions- und Verletzungsdatenbank auf.

Das Projekt ATTENTION endet im Juni 2024 und wird im Rahmen des Forschungsprogramms »Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien« seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. ■

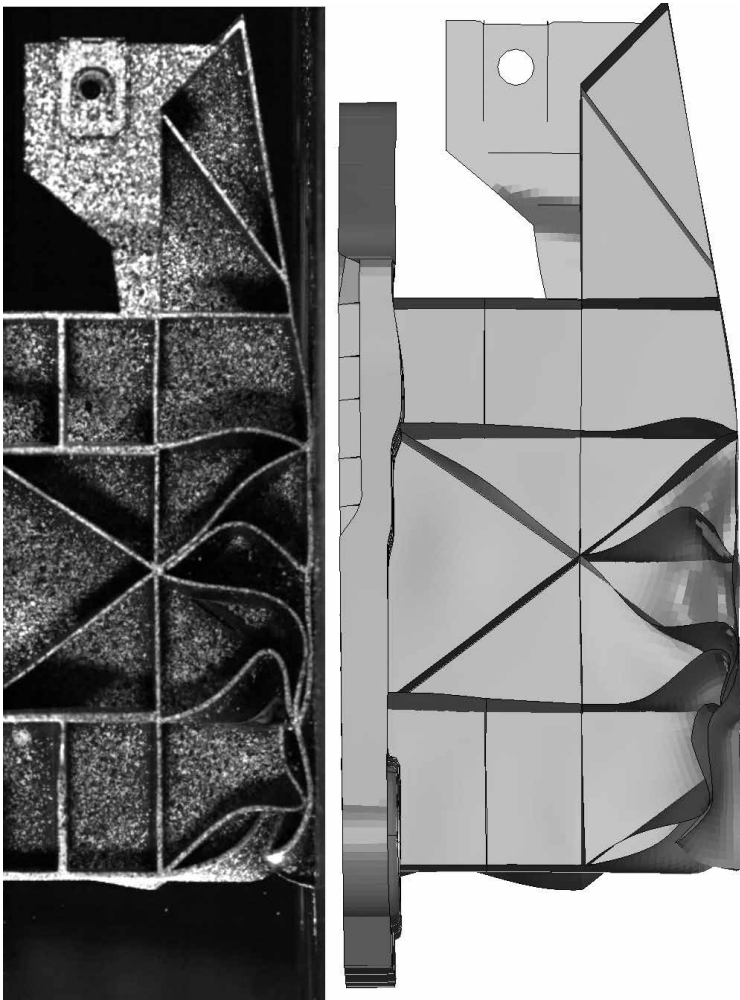


ATTENTION

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



*Bauteilversuch an einer Crashbox aus einem Fahrzeug acht Millisekunden nach dem Auftreffen des Impaktors von rechts.
Links: Versuch. Rechts: Simulation.*

Systematisierung der Lastfalldefinition bei Komponentenversuchen

Ein Beitrag von Thomas Haase, thomas.haase@emi.fraunhofer.de, und Thomas Soot, thomas.soot@emi.fraunhofer.de

Komponentenversuche sind aufwendig und teuer. Daher ist es notwendig, diese so durchzuführen, dass maximaler Nutzen aus den gewonnenen Daten gezogen werden kann.

Komponententests: kaputt machen – aber mit Köpfchen!

Im aktuell laufenden AIMM-Projekt (Artificial Intelligence for Material Models) werden neuartige, auf Machine Learning (ML) basierende Materialmodelle entwickelt. Diese liefern für jeden Dehnungsinput den zugehörigen Spannungsoutput. Für die Validierung solcher Modelle kommen Bauteilversuche zum Einsatz. Mit deren Hilfe soll das Modell im Idealfall bei allen theoretisch möglichen Dehnungszuständen validiert werden. Daher müssen bei einem geeigneten Versuch möglichst viele dieser Zustände während der Belastung im Bauteil auftreten.

Entwicklung eines Tools zur Bewertung von Versuchen

Am Fraunhofer EMI wurde ein Python-Tool entwickelt, mit dem mehrere Bauteilversuche hinsichtlich dieser Anforderung an die Dehnungszustände bewertet werden können, sodass nur der geeignetste auch durchgeführt wird. Hierfür werden die Versuchsvarianten zunächst simuliert und anschließend aus den Daten mehrere Kennzahlen berechnet, wie beispielsweise die relative Abdeckung des Dehnungsraums. Dabei handelt es sich um das Verhältnis der mit Datenpunkten abgedeckten Fläche zur Gesamtfläche des Dehnungsraums. Je höher diese Zahl ausfällt, desto besser ist der entsprechende Versuch geeignet.

Ein weiteres Einsatzgebiet dieses Tools ist die Optimierung der Geometrie von Probekörpern zur Generierung experimenteller Trainingsdaten für ML-Materialmodelle. Ähnlich wie bei den Bauteilversuchen sollen auch die Trainingsdaten möglichst viele verschiedene Dehnungszustände enthalten.

Volldigitale Produktentwicklung von nachhaltigen Elektroantriebsarchitekturen

Ein Beitrag von Dr. Jens Fritsch, jens.fritsch@emi.fraunhofer.de

Das Forschungsprojekt DigiTain (Digitalization for Sustainability) zur volldigitalen Produktentwicklung nachhaltiger Elektroantriebsarchitekturen nimmt Fahrt auf.

Digitalization for Sustainability

Bestehend aus 26 geförderten und 2 assoziierten Partnern aus Industrie und Wissenschaft, startete das Forschungsprojekt DigiTain zum 1. Januar 2023 mit einer Laufzeit von insgesamt 36 Monaten. In DigiTain werden Prozesse, Methoden und Modelle zur volldigitalen Produktentwicklung und Zertifizierung nachhaltiger Elektroantriebsarchitekturen entwickelt und anhand eines Technologieträgers erprobt. Das Projekt wird im Rahmen des Konjunkturpakets Ziffer 35c im Modul b »Neue, innovative Produkte als Schlüssel für Fahrzeuge und Mobilität der Zukunft« von der Bundesregierung und der Europäischen Union gefördert. »Insbesondere der ganzheitliche Ansatz,

welcher gleich mehrere technologische Innovationen integriert, die wertschöpfungsübergreifende Vernetzung der Partner und deren Fachexpertisen sowie das damit verbundene Transferpotenzial auf Industrie und Gesellschaft machen DigiTain zu einem Leuchtturmprojekt unseres Fachprogramms«, so Stefan Heidemann vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Projektträgerschaft für DigiTain wurde von der TÜV Rheinland Consulting GmbH übernommen.

Zum Auftakttreffen am 31. Januar 2023 kamen rund 100 Teilnehmende des Konsortiums größtenteils vor Ort beim Konsortialführer Mercedes-Benz AG in Sindelfingen, zum Teil aber auch virtuell zusammen. Neben der Vorstellung der Arbeitspakete und Planung der Zusammenarbeit bot das Treffen die Möglichkeit des übergreifenden Austauschs über die geplanten Forschungsinhalte.



Teilnehmende des Auftakttreffens am 31. Januar 2023 beim Konsortialführer Mercedes-Benz AG in Sindelfingen. © Mercedes-Benz AG



AVEAS – Verkehrsszenarien erkennen, analysieren und simulieren für autonomes Fahren

Ein Beitrag von Florian Lüttner, florian.luettner@emi.fraunhofer.de

Grundlage für die Absicherung autonomer Fahrzeuge sind umfangreiche Daten von Verkehrsszenarien. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekt AVEAS soll diese Grundlage geschaffen werden.

Motivation

Das autonome Fahren war lange eine Zukunftsvision – jetzt sind wir auf dem Weg dazu, dass diese Vision Realität wird. Der Autobahnpilot von Mercedes-Benz fährt bereits zugelassen auf Level drei von fünf in der Entwicklung autonomer Fahrzeuge. Doch der Aufwand für die Absicherung solcher Fahrzeuge steigt für höhere Level erheblich an. Grundlage dieser Absicherung ist eine umfangreiche Datenbasis von Verkehrsszenarien, die alle Bedarfe der Absicherung bedienen. Zudem werden valide Simulationsumgebungen in der Absicherung zunehmend wichtig.

Absicherungsrelevante Szenarien

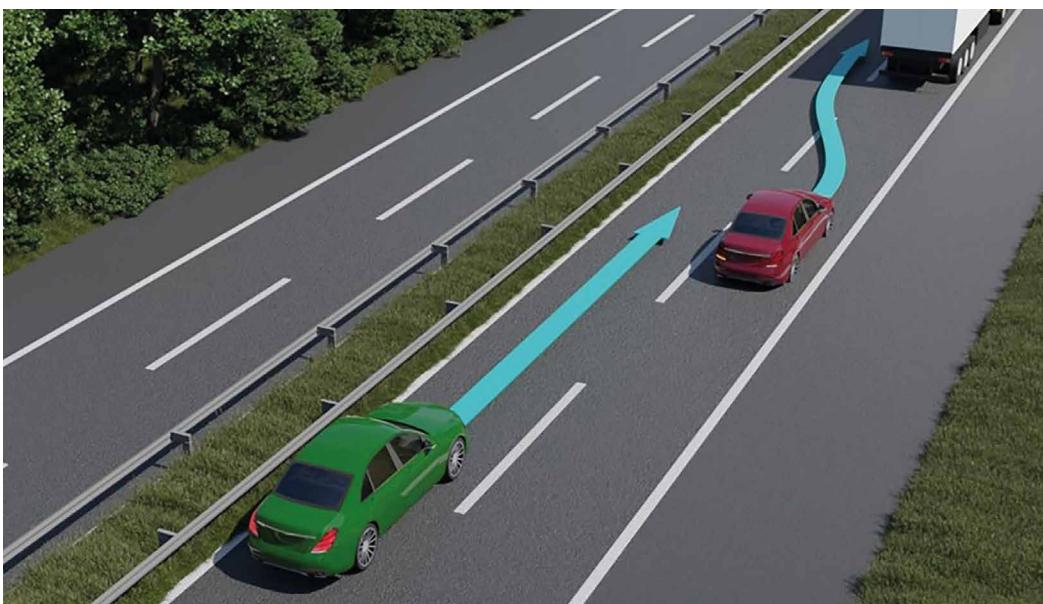
Im Projekt AVEAS (Absicherungsrelevante Verkehrssituationen erheben, analysieren, simulieren) forscht das Fraunhofer EMI

an der Erzeugung dieser Datenbasis. Dafür werden Daten aus drei unterschiedlichen Aufnahmeperspektiven sowie optimiert simulierte Szenarien kombiniert. Das Fraunhofer EMI entwickelt dabei Methoden zur automatisierten Bewertung der Absicherungsrelevanz aufgenommener Szenarien sowie Algorithmen zur Generierung virtueller Szenarien zur Ergänzung der Datenbank.

Optimierung von Verhaltensmodellen

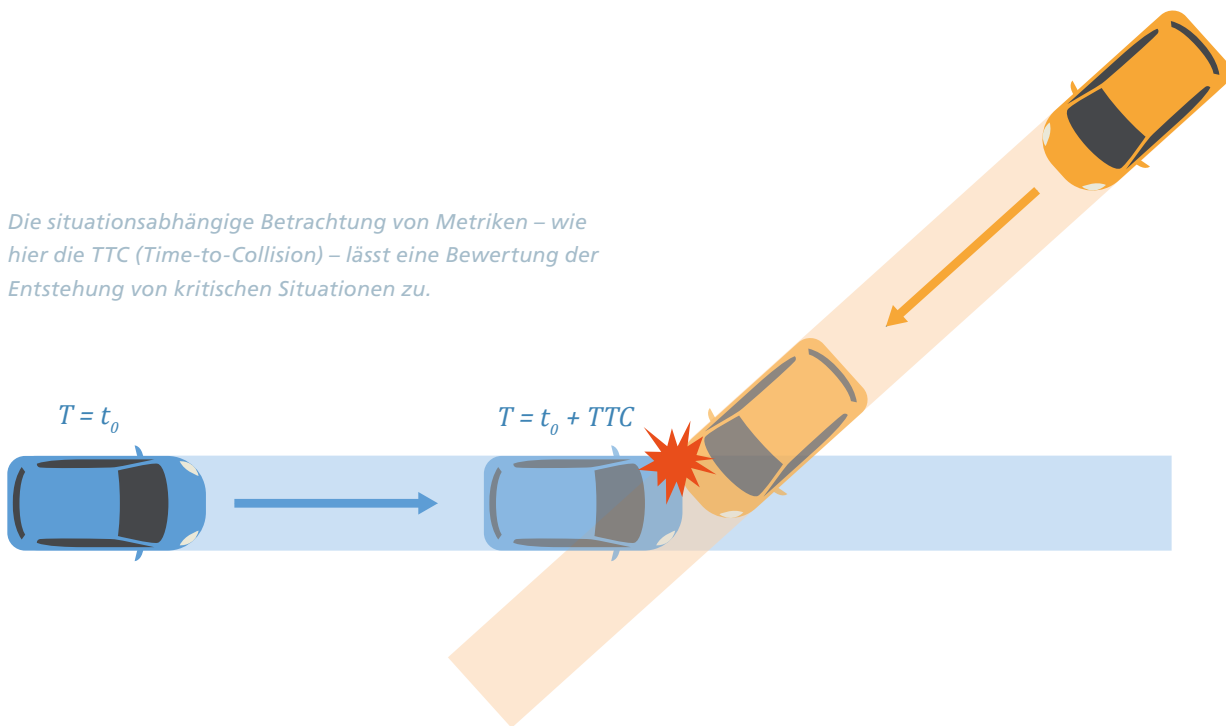
Perspektivisch werden für die Absicherung autonomer Fahrzeuge realistische Simulationen von erheblicher Bedeutung sein. Ein Ziel des Fraunhofer EMI ist es, Optimierungsmethoden zu adaptieren und weiterzuentwickeln, um Verhaltensmodelle in aktuellen Simulationsumgebungen datenbasiert möglichst realistisch zu gestalten.

Die so erzeugten Daten und Modelle sollen auf einer dauerhaften digitalen Plattform verwertet und im Erfolgsfall die Methodik zur Datenerhebung im Realverkehr zu Absicherungszwecken verstetigt werden.



Erweiterung der angezielten Datenbasis durch Sampling und Simulationen.

Die situationsabhängige Betrachtung von Metriken – wie hier die TTC (Time-to-Collision) – lässt eine Bewertung der Entstehung von kritischen Situationen zu.



KIsSME – Datenaufnahme von kritischen Situationen im Straßenverkehr

Ein Beitrag von Dr. Mirjam Fehling-Kaschek, mirjam.fehling.kaschek@emi.fraunhofer.de

Die gezielte Aufnahme von relevanten Daten stellt eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung und Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen dar.

Selektion in der Datenaufnahme

Für die Erprobung und Absicherung hochautomatisierter Fahrzeuge werden große Mengen an Daten benötigt, welche insbesondere die Entstehung von Unfällen und kritischen Situationen abdecken müssen. Ein wichtiger Beitrag wird durch die Aufzeichnung von Verkehrssituationen mit Versuchsfahrzeugen generiert. Allerdings sind die Datenvolumen so groß, dass schnell Kapazitätsgrenzen erreicht werden. Das Hauptziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts KIsSME liegt in der Entwicklung von Selektionsalgorithmen, um eine gezielte Aufnahme von relevanten Fahrsituationen noch im Aufnahmefahrzeug zu ermöglichen.

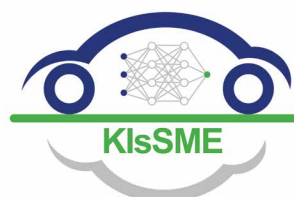
Bewertung der Kritikalität von Fahrsituationen

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern hat das EMI ein Bewertungssystem entwickelt, welches die Kritikalität aus den Bewegungsdaten der Fahrzeuge abschätzt. Wichtigster Ausgangspunkt für das System ist eine vordefinierte Auswahl an Metriken, die zunächst durch

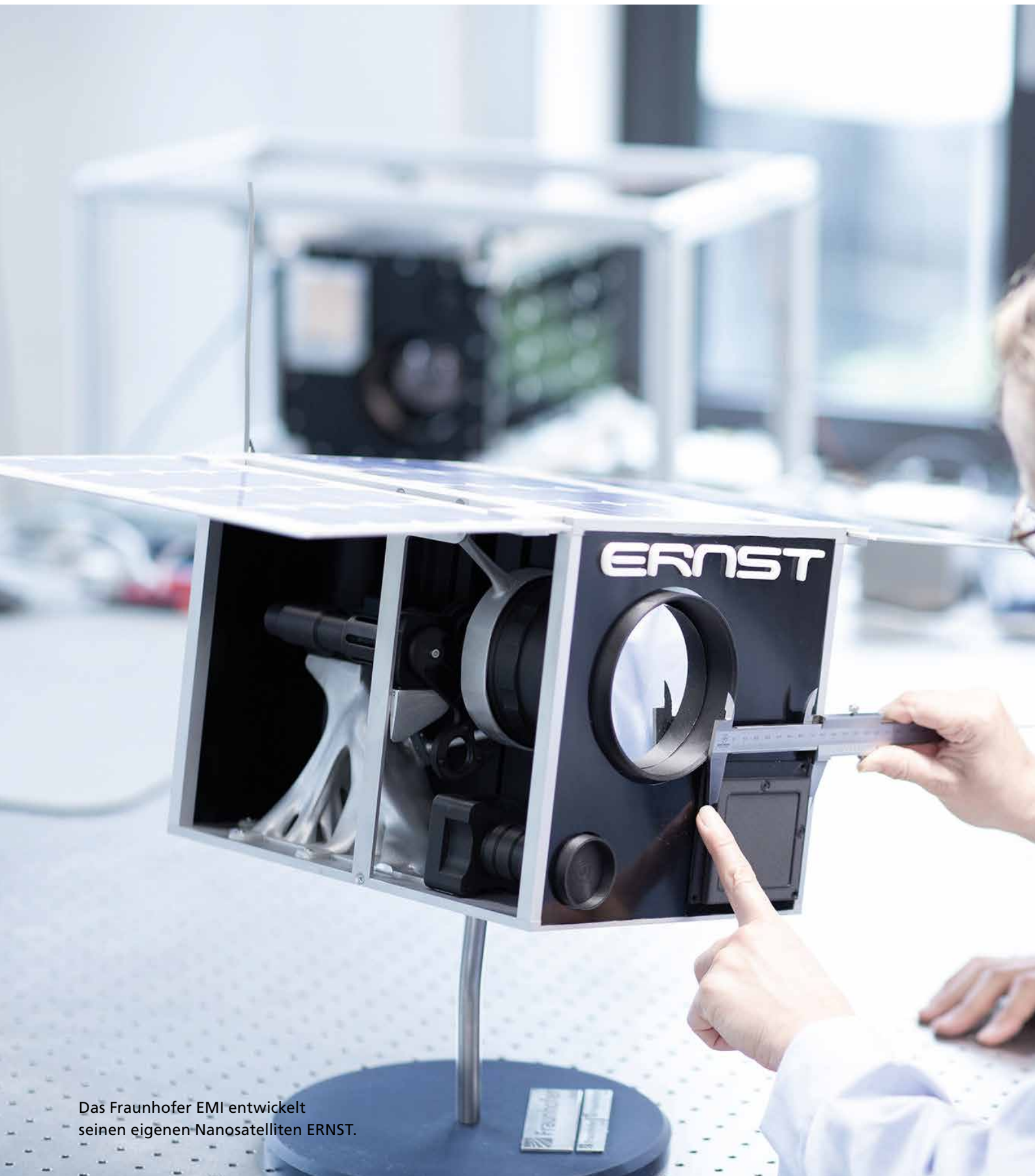
Skalierungsmethoden zu Einzelkritikalitäten transformiert werden, die schließlich zu einer Gesamtkritikalität kombiniert werden. Das Bewertungssystem kann sowohl zur Identifikation kritischer Situationen in vorhandenen Datensätzen dienen als auch der im Projekt geforderten Auslösung eines Triggers zur Datenspeicherung.

Ein weiterer Fokus des EMI lag auf der Entwicklung einer KI-basierten Trajektorienprädiktion. Anhand des aktuellen Bewegungsmusters eines Fahrzeugs werden mögliche Bewegungspfade für die nächsten drei bis fünf Sekunden vorhergesagt. Diese Vorhersagen lassen die Generierung theoretischer kritischer Szenarien zu und bilden auch eine wichtige Grundlage für die Verbesserung der Kritikalitätsbewertung in Echtzeit in den Versuchsfahrzeugen des Projekts.

Weitere Informationen finden Sie unter www.kissme-projekt.de



KIsSME steht für »Künstliche Intelligenz zur selektiven echtzeitnahen Aufnahme von Szenarien- und Manöverdaten bei der Erprobung von hoch-automatisierten Fahrzeugen«.



Das Fraunhofer EMI entwickelt seinen eigenen Nanosatelliten ERNST.



Geschäftsfeld Raumfahrt



Einleitung	60
Menschen im Geschäftsfeld Raumfahrt	62
Wann zerbricht ein Raumfahrzeug?	64
On-board Data Processing für den New Space	68
ERNST-Update – neue Rakete, neuer Starttermin	69
Zuverlässiger Hitzeschutz für ESAs Space Rider	70
Erweiterte Realität zur ferngesteuerten Unterstützung bei Satellitenintegration und Satellitentests	71
Bundeswehr im Dialog, Berlin Congress Center, 31. Mai 2022	72

Geschäftsfeld Raumfahrt

Computersimulation von Kollisionsvorgängen und Fragmentierungsprozessen bei höchsten Dehnraten wie bei Einschlägen von Weltraummüll auf Raumfahrzeuge ist seit fast 30 Jahren eine Kernkompetenz des Ernst-Mach-Instituts. Am Institut lag bisher der Schwerpunkt auf Ingenieurmodellen, die auf Kontinuumsmechanik basieren, wie beispielsweise Finite-Elemente-Methoden (FEM) und Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Die Möglichkeiten von netzfreien Partikelmethoden für die Materialforschung wurden bislang nicht ausgeschöpft. Mit der Entwicklung der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) am EMI haben wir den Grundstein für die numerische Simulation extrem komplexer Impakt- und Fragmentierungsprozesse gelegt. Schlüssel dafür war unter anderem die Entwicklung eines Materialmodells, dessen Materialparameter aus den makroskopischen Materialeigenschaften abgeleitet werden. Erste Materialmodelle wurden für Aluminium sowie für orthotrope Materialien wie CFK entwickelt. Mit dem parallelisierbaren DEM-Rechenverfahren sind wir nun in der Lage, Kollisionen zwischen Satelliten sowie deren Trümmerverteilung sehr viel schneller als mit bestehenden Kontinuumsmechanik-Methoden zu berechnen.

Die Datenprozessierungseinheit (Data Processing Unit, DPU) des EMI ist ein leistungsfähiges Computersystem für Kleinsatelliten, das Daten von Erdbeobachtungsnutzlasten an Bord des Satelliten verarbeitet. Die DPU ist im Jahr 2022 im Rahmen der LisR-Mission erfolgreich auf der Internationalen Raumstation ISS demonstriert worden und ist in unserem Satelliten ERNST eingebaut. Nun wird eine vollständig redundant ausgelegte Version der DPU die Zuverlässigkeit der Einheit noch einmal signifikant erhöhen zum Einsatz in einer Satellitenkonstellation.

In unseren Satellitenlaboren kommen zunehmend Augmented-Reality(AR)-Systeme zur Fernsteuerung und Überwachung des Laborbetriebs zum Einsatz. Das am EMI entwickelte Verfahren ermöglicht eine effiziente Steuerung und Überwachung der gesamten Laborausstattung während umfassender Entwicklungs-, Qualifikations- und Testphasen von Satellitensystemen von einem entfernten Arbeitsplatz. Dabei werden auch holografische Headsets verwendet, mit denen verteilte Teams effizient zusammenarbeiten können.



Mit einzigartigen Methoden erhöhen wir die Sicherheit in der Raumfahrt und entwickeln wissenschaftliche Nutzlasten und resiliente Kleinsatellitensysteme für Anwendungen in der Erdbeobachtung.«

Prof. Dr. Frank Schäfer



Prof. Dr. Frank Schäfer
Geschäftsfeldleiter Raumfahrt
frank.schaefer@emi.fraunhofer.de

s.fhg.de/emi-raumfahrt

Menschen im Geschäftsfeld Raumfahrt



Hier lassen wir sieben
Forscher aus dem
Geschäftsfeld Raumfahrt
zu Wort kommen.

- 1 *Erkai Watson*
erkai.watson@emi.fraunhofer.de
- 2 *Clemens Horch*
clemens.horch@emi.fraunhofer.de
- 3 *Dr. Martin Schimmerohn*
martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de
- 4 *Robin Putzar*
robin.putzar@emi.fraunhofer.de

- 5 *Dr. Stephan Busch*
stephan.busch@emi.fraunhofer.de
- 6 *Konstantin Schäfer*
konstantin.schaefer@emi.fraunhofer.de
- 7 *Prof. Dr. Frank Schäfer*
frank.schaefer@emi.fraunhofer.de

Wann zerbricht ein Raumfahrzeug?

Ein Beitrag von Erkai Watson, erkai.watson@emi.fraunhofer.de

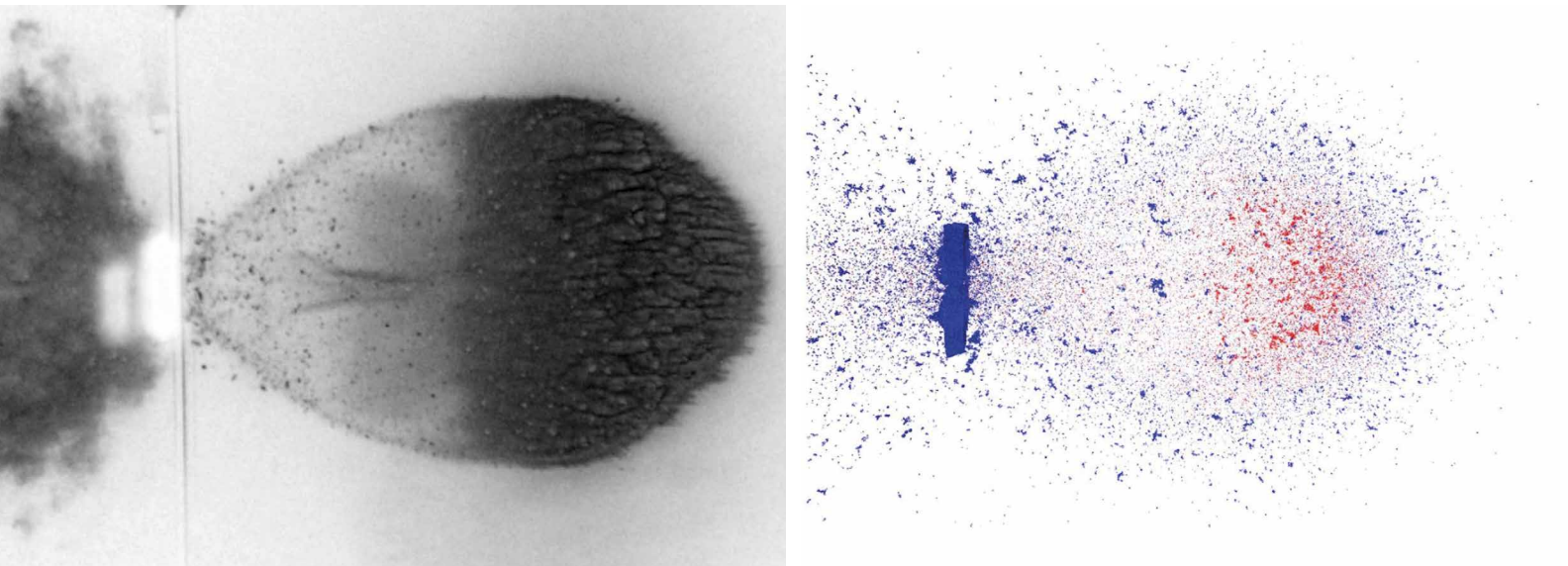
Diskrete-Elemente-Methoden helfen, komplexe Phänomene beim Hypervelocityimpakt zu simulieren.

Der Aufprall eines Weltraummüllteilchens auf einen Satelliten in der Erdumlaufbahn führt in der Regel zum Auseinanderbrechen und zur Zersplitterung des Satelliten in Tausende neuer Weltraummüllteilchen. Dieses komplexe Phänomen wird mit einer einzigartigen Art der numerischen Simulation auf der Grundlage von Millionen kleiner Partikel untersucht.

Die zunehmende Zahl von Weltraumraketenstarts in den letzten Jahren verschärft die Risiken, die Weltraummüll für Satelliten in der Erdumlaufbahn darstellt. Ein Worst-Case-Szenario, das so genannte Kessler-Syndrom, sagt eine Kaskade von Kollisionen voraus, bei denen Weltraummüll mit Raumfahrzeugen zusammenstößt und katastrophale Zerstörungen verursacht. Die bei solchen Kollisionen entstehenden Fragmente fügen sich in den wachsenden Bestand an Weltraummüll ein, wobei jedes Ereignis die Wahrscheinlichkeit weiterer Kollisionen erhöht. Dieser sich ständig verschlimmernde Kreislauf endet damit, dass bestimmte Erdumlaufbahnen für Generationen unbrauchbar gemacht werden.

Ein wichtiger Weg, um zu verhindern, dass das Kessler-Syndrom Realität wird, besteht darin, die komplexen Phänomene besser zu verstehen und zu modellieren, die auftreten, wenn Raumfahrzeuge von Weltraummüll getroffen werden, der sich mit einer relativen Geschwindigkeit von bis zu 15 000 Metern pro Sekunde bewegt. Ein Hypervelocity-Impakt (HVI) ist extrem energetisch, und selbst millimeter- bis zentimetergroße Trümmerteile können einen kleinen Satelliten zerstören. Größere Einschläge verursachen nicht nur örtlich begrenzte Schäden, sondern können auch zum Zerbrechen von großen Satelliten führen.

Bei der Simulation von HVI und dem Auseinanderbrechen von Satelliten mit numerischen Methoden kann es eine Herausforderung sein, den Übergang eines Materials von einem festen zu einem fragmentierten Zustand mit traditionellen kontinuumsbasierten Simulationscodes wie der Finite-Elemente-Methode genau zu erfassen. Am Fraunhofer EMI haben wir einen neuartigen Simulationsansatz entwickelt, der auf der Interaktion vieler Millionen diskreter Teilchen basiert, um die Fragmentierung von Raumfahrzeugen zu simulieren. Unser Code MD-Cube eignet sich hervorragend für die Modellierung des Übergangs von einem festen zu einem fragmentierten Zustand, der bei einer HVI-Kollision auftritt.



Simulationen mit Millionen von Partikeln

MD-Cube wurde speziell entwickelt, um die Fragmentierung genau zu simulieren. Dies wird durch die Verwendung von Millionen kleiner Partikel erreicht, die durch Federn miteinander verbunden sind, um ein festes Material zu bilden. Die Kräfte in den Federn sind insgesamt so kalibriert, dass sie die makroskopische Eigenschaft eines bestimmten Materials annähernd wiedergeben. Wenn das Material belastet wird, versagen die Federn bei Erreichen einer vordefinierten Ausdehnung, was zu Rissen und schließlich zum Versagen des Materials führt. Auf diese Weise wird eine natürliche und realistische Fragmentierung erreicht.

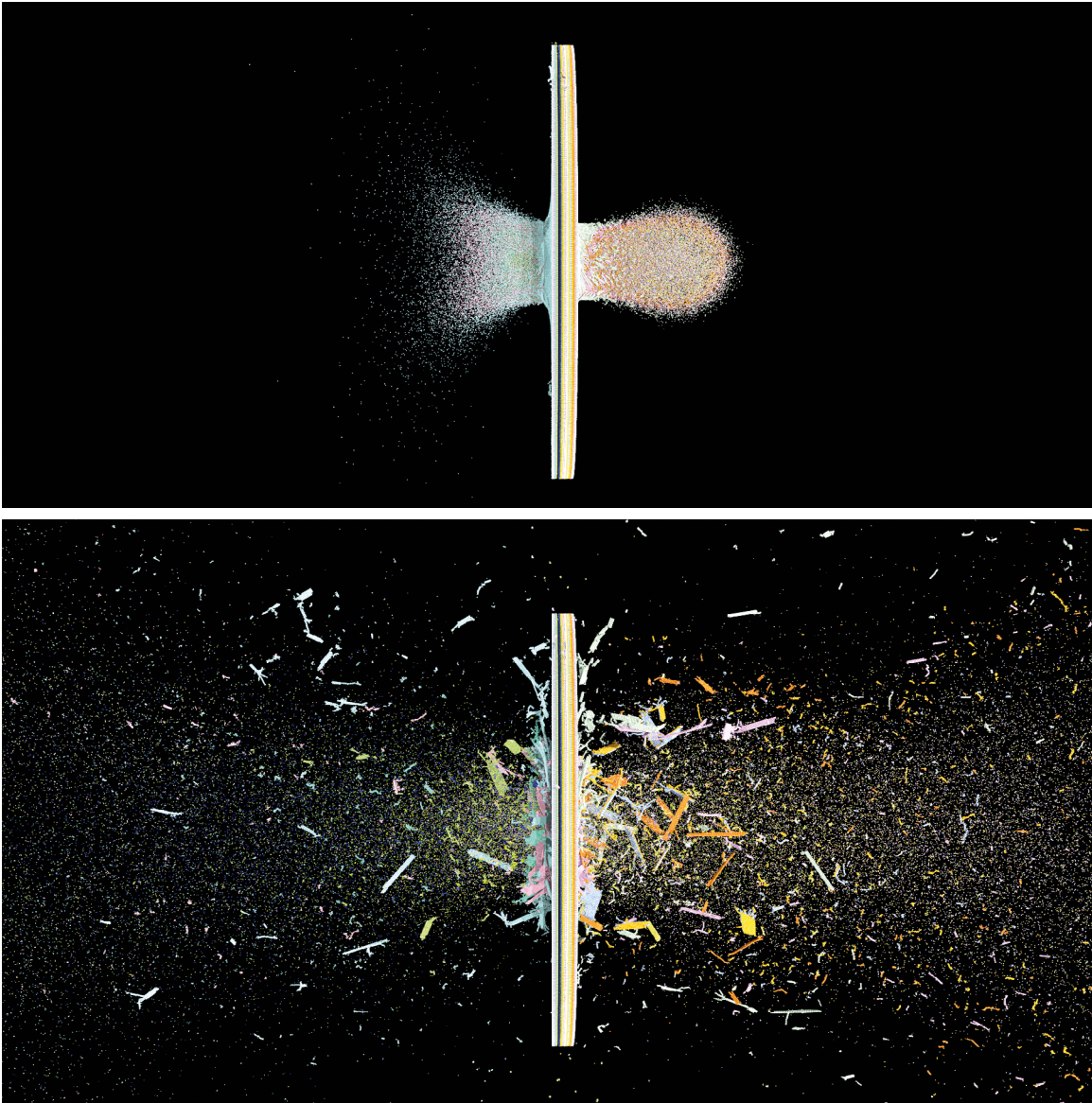
Ein Schlüsselaspekt für den Erfolg von MD-Cube bei der Simulation von Fragmentierungsereignissen ist sein hoch entwickeltes Parallelisierungsschema. MD-Cube ist mit dem Message Passing Interface (MPI) parallelisiert, das es ermöglicht, die rechenintensiven Aufgaben der Berechnung von Partikelwechselwirkungen auf Hunderte von CPUs parallel zu verteilen. Die Verwendung von Millionen von Partikeln ermöglicht eine sehr feine »Auflösung« der simulierten Materialien und erlaubt es, das gesamte Spektrum der fragmentierten Trümmer, von großen Brocken bis hin zu staubähnlichen Partikeln, genau zu reproduzieren.

Explosive Fragmentierung bei Hypervelocity-Impakt

Die explosive Fragmentierung, die in experimentellen HVI-Bildern zu sehen ist, wird in MD-Cube-Simulationen gut erfasst und reproduziert. Aluminium zum Beispiel versagt in unmittelbarer Nähe eines Hochgeschwindigkeitsaufpralls auf spröde Art und Weise, was zur Bildung von Tausenden von Fragmenten führt. Die MD-Cube-Simulationen geben dies gut wieder, insbesondere die breit gefächerte Verteilung der Fragmentgrößen.

Während die meisten Simulationsparameter für ein bestimmtes Material aus allgemeinen Materialeigenschaften wie dem Kompressionsmodul abgeleitet werden können, muss ein Simulationsparameter auf der Grundlage experimenteller HVI-Daten kalibriert werden. Wir führen diese Kalibrierung durch, indem wir die Form, Größe und Geschwindigkeit der Fragmentwolke zwischen experimentellen und simulierten Bildern direkt vergleichen. Außerdem kalibrieren wir das mechanische Verhalten bei niedrigen Geschwindigkeiten durch Vergleiche mit Ergebnissen von Impactexperimenten. ►

Der Diskrete-Elemente-Simulationscode MD-Cube bildet die Fragmentierung nach einem Hochgeschwindigkeitseinschlag in Aluminium genau ab. Links: Experiment; rechts: Simulation.



Hochgeschwindigkeitsimpakt auf eine CFK-Platte. Die Delaminierung des CFK und die langen Faserfragmente werden von der Simulation deutlich reproduziert.

Neben isotropem Aluminium ist MD-Cube derzeit auch in der Lage, anisotrope Materialien wie kohlenstofffaserverstärkte Polymere (CFK) zu simulieren. CFK ist ein wichtiges Material in modernen Satelliten und ersetzt oft Aluminium in vielen Strukturkomponenten neuerer Raumfahrzeuge. CFK wird simuliert, indem den Materialeigenschaften der Kohlenstofffasern beziehungsweise der Epoxidmatrix unterschiedliche Federtypen in verschiedenen Richtungen

zugeordnet werden. Mit diesem Ansatz wird nicht nur das orthotrope Verhalten erfasst, sondern auch das einzigartige Muster der Delaminierung und der Bildung langer, dünner Faserfragmente wird vollständig abgebildet. Die Fähigkeit, nicht nur die Anzahl und Größe der Fragmente, sondern auch ihre Form genau vorherzusagen, ist einer der vielen Vorteile der Simulation von Satelliteneinschlägen mit MD-Cube.

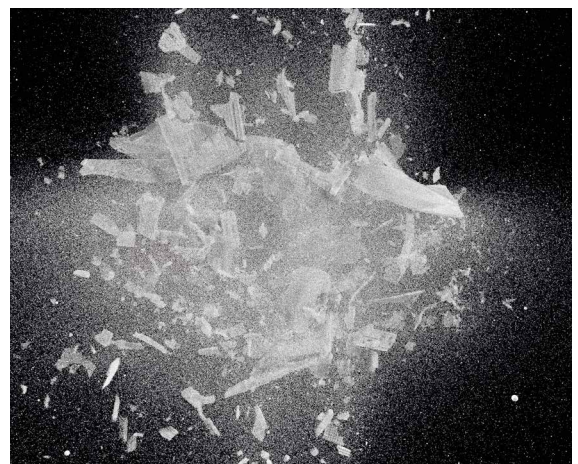
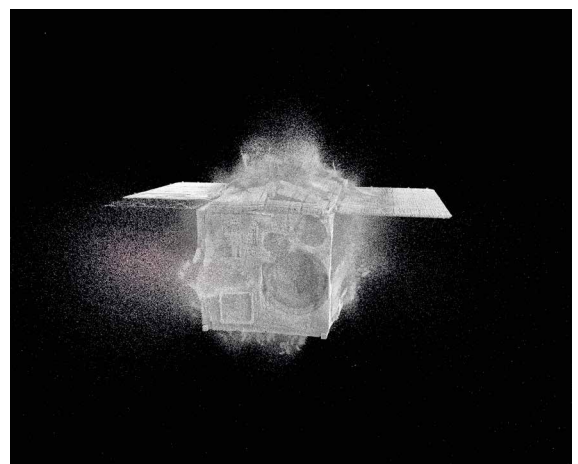
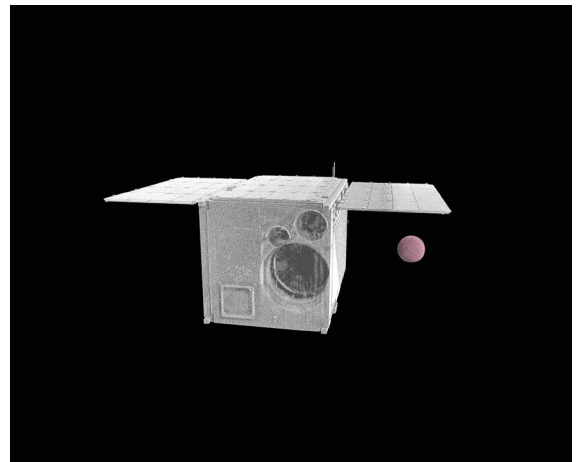
Der Weg zur Modellierung von Raumfahrzeugfragmentierung

Wir wenden MD-Cube auf eine Reihe von Einschlagsszenarien für Raumfahrzeuge an, um das Auseinanderbrechen von Raumfahrzeugen nach einem Einschlag von Weltraummüll besser zu verstehen und zu modellieren. Zunächst untersuchen wir das Auseinanderbrechen von vereinfachten CubeSats, indem wir die Verteilung der Fragmente nach verschiedenen Aufprallszenarien untersuchen, zum Beispiel wenn eine kleine Kugel auf einen CubeSat trifft oder zwei CubeSats zusammenstoßen. Die resultierenden Fragmentverteilungen stimmen gut mit bestehenden empirischen Modellen wie dem NASA Satellite Breakup Model bei der Simulation von Aluminiumsatelliten überein. Die Anwendung ähnlicher Vergleiche mit CFK-Satelliten hebt bekannte Diskrepanzen in bestehenden empirischen Modellen hervor, die mithilfe von Simulationsergebnissen möglicherweise verbessert werden könnten.

Satelliten in allen Details, bis hin zu einzelnen Schrauben und elektrischen Komponenten, können in MD-Cube durch einen einfachen Import aus einem CAD-Programm genau und effizient modelliert werden. Wir haben ERNST, einen 12U-Nanosatelliten, der derzeit am Fraunhofer EMI entwickelt wird, mit 13,5 Millionen Partikeln diskretisiert, um Parameterstudien durchzuführen, die das Auseinanderbrechen dieses bestimmten Satelliten unter einer Vielzahl von Einschlagsbedingungen untersuchen.

Wir untersuchen den Zerfall und die Verteilung der Fragmente, die sich aus dem Einschlag von ERNST mit Weltraummüll verschiedener Formen (Kugel, Stab, Scheibe) und Größen ergeben, sowie die Auswirkungen von Einschlägen auf verschiedene Teile des Satelliten und aus verschiedenen Richtungen. Die resultierenden Fragmentverteilungen werden verglichen und analysiert.

Wir sind der Meinung, dass numerische Simulationen, die auf Fragmentierung spezialisiert sind, wie MD-Cube, ein leistungsfähiges Instrument zur Untersuchung von Satellitenabbrüchen in der Umlaufbahn sind. Im Gegensatz zu bodengestützten Experimenten sind die Bandbreite der Bedingungen und die schier Anzahl der Parameterstudien, die effizient durchgeführt werden können, von unschätzbarem Wert für die Entwicklung neuer und verbesserter empirischer Modelle, die für das Verständnis der sich ständig verändernden orbitalen Umgebung um unsere Erde genutzt werden können. ■



Simulation des Nanosatelliten ERNST, der von einem acht Kilometer pro Sekunde schnellen Weltraummüllteil getroffen wird. Der energiereiche Aufprall führt zu einem katastrophalen Auseinanderbrechen des Satelliten.

On-board Data Processing für den New Space

Ein Beitrag von Clemens Horch, clemens.horch@emi.fraunhofer.de

Nach der erfolgreichen Demonstration der EMI-Technologie zur Datenprozessierung auf der Internationalen Raumstation ISS steht nun die nächste Generation bevor.

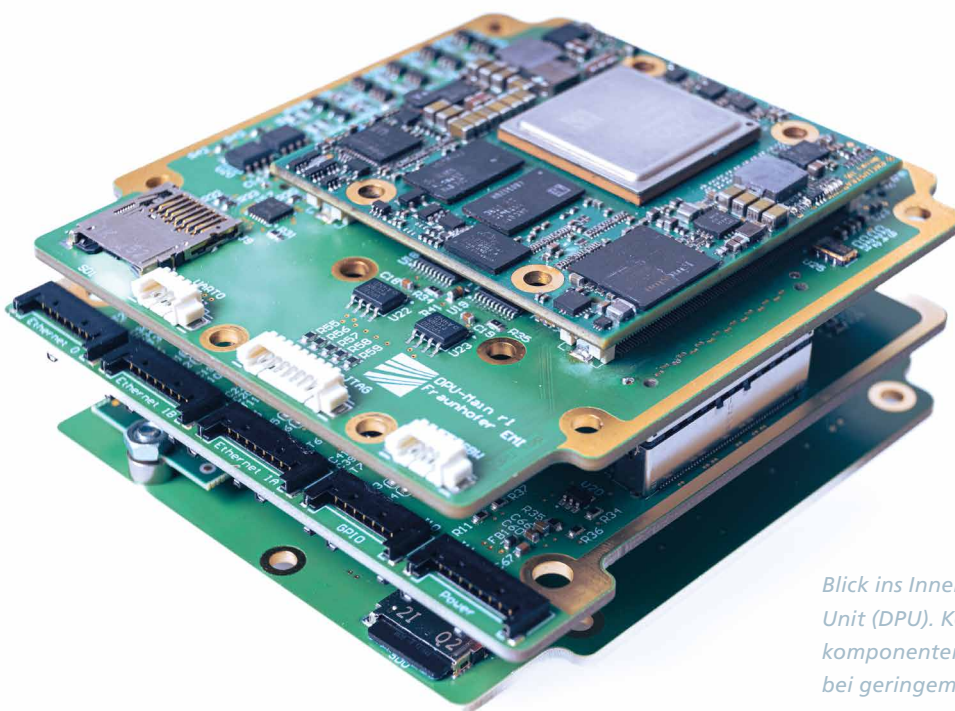
Im sogenannten New Space, also einer immer stärker von privaten Akteuren und Start-ups geprägten Raumfahrt, geht die Entwicklung hin zu großen Konstellationen von kleinen Satelliten. Speziell für diesen Markt arbeitet das Fraunhofer EMI seit einigen Jahren an Lösungen für die Datenverarbeitung an Bord solcher Kleinsatelliten.

Die Datenprozessierungseinheit (Data Processing Unit, DPU) des Fraunhofer EMI ist ein Computersystem speziell für den Einsatz in Nutzlasten für die Erdbeobachtung. Diese Kamerasysteme nehmen Bilder von der Erdoberfläche oder der Atmosphäre in unterschiedlichen Spektralbereichen auf. Die DPU basiert auf kommerzieller Elektronik und kann daher auf kleinstem Raum und mit minimalem Energiebedarf

eine hohe Leistung erzielen. Die geringere Zuverlässigkeit dieser Komponenten wird durch das Systemdesign der DPU zu einem großen Teil kompensiert.

Nach dem Einsatz der DPU in mehreren Missionen unserer Kunden, wurde im Jahr 2022 die DPU im Rahmen der LisR-Mission erfolgreich auf der Internationalen Raumstation ISS demonstriert.

Für die Satellitenkonstellation HiVE der EMI-Ausgründung constellr steht nun die nächste Evolutionsstufe der DPU in den Startlöchern. Speziell für Mikrosatelliten, also etwas größere Kleinsatelliten, kommt eine erweiterte Variante der DPU zum Einsatz. Das Gerät wird zur weiteren Erhöhung der Zuverlässigkeit vollständig redundant ausgelegt, um mögliche Fehler und Ausfälle kompensieren zu können. Darüber hinaus forscht das EMI an der Integration von künstlicher Intelligenz in die DPU. So könnten in Zukunft direkt im Weltall die eigentlichen Informationen aus den aufgenommenen Bildern gewonnen werden.

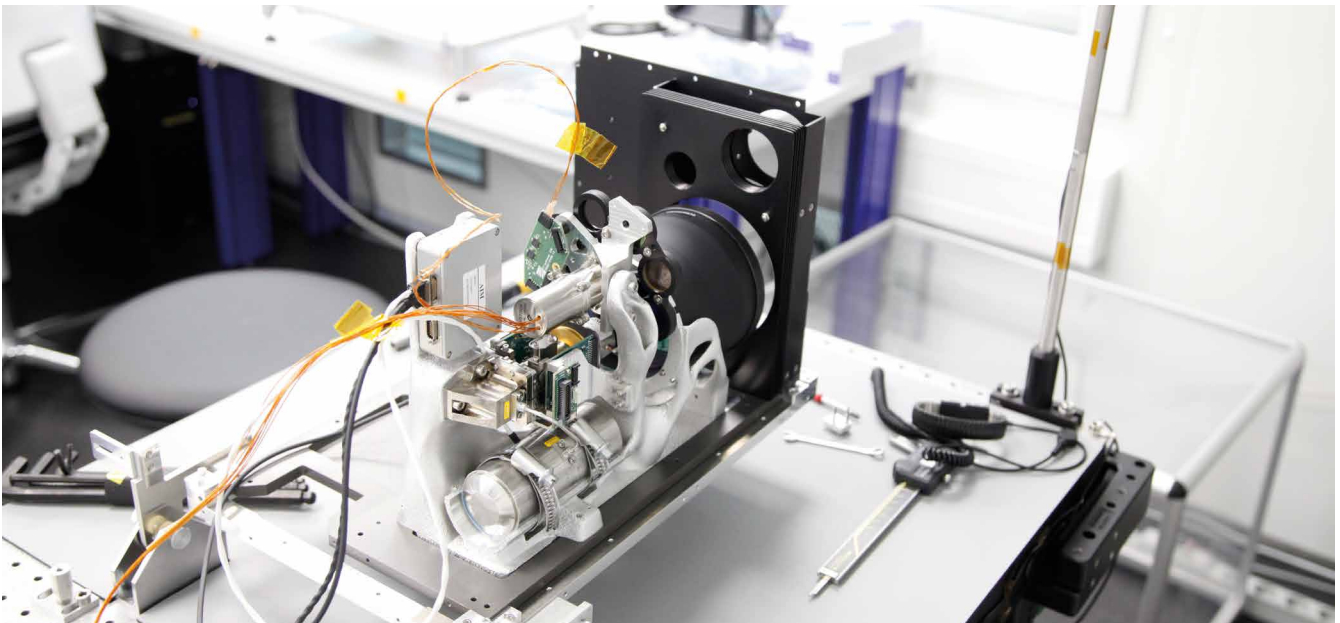


Blick ins Innere der EMI Data Processing Unit (DPU). Kommerzielle Elektronikkomponenten liefern höchste Leistung bei geringem Energiebedarf.

ERNST-Update – neue Rakete, neuer Starttermin

Ein Beitrag von Dr. Martin Schimmerohn, martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de

Das Jahr 2022 stand im Zeichen der finalen Integration des ERNST-Flugmodells. Dessen Auslieferung für den Raketenstart musste allerdings verschoben werden.



Fit-Check der ERNST-Infrarotnutzlast mit optischer Bank und Streulichtblenden für die Integration.

Gerne hätten wir an dieser Stelle über den Start von ERNST in den Orbit berichtet. Im vergangenen Jahr wurden am EMI die Subsysteme fertiggestellt und für die finale Integration und die Abnahmetests des Gesamtsystems vorbereitet. Ein Engpass bei den Startkapazitäten machte uns bislang allerdings einen Strich durch die Rechnung. ERNST startet als Teil einer Kooperation des BMVg mit dem US-Verteidigungsministerium in deren »Space Test Program«. Als Startsystem war ursprünglich die flugzeugbasierte LauncherOne vorgesehen, die aber nach einem Fehlstart und finanziellen Schwierigkeiten der Firma nicht mehr zur Verfügung steht. Stattdessen wurde ERNST zusammen mit anderen prominenten Kleinsatelliten aus Australien und dem Vereinigten Königreich auf die neue RS1-Rakete des US-Anbieters ABL Space Systems umgebucht.

Nach einem Erstflug, der nicht von Erfolg gekrönt war, wird derzeit der zweite Startversuch vorbereitet. Für ERNST bedeutet das eine Verschiebung des Starttermins in den April 2024.

Ein Ziel der ERNST-Mission ist es, das Potenzial des New Space, gekennzeichnet durch Konstellationen kleinerer Satelliten mit kurzen Entwicklungszeiten und neuen Startsystemen, für die Zwecke der Bundeswehr auszuloten. Insofern sind die aktuellen Verzögerungen durchaus repräsentativ für die Dynamik des Umbruchs in der Raumfahrt, auch wenn wir auf diesen Aspekt gerne verzichtet hätten. Die zusätzliche Zeit nutzen wir für ausgiebige Tests des Satelliten in sogenannter Flat-Sat-Konfiguration, die einen umfangreichen Systemzugriff und einfach durchzuführende Anpassungen und Vervollständigung an den Komponenten erlaubt.

Zuverlässiger Hitzeschutz für ESAs Space Rider

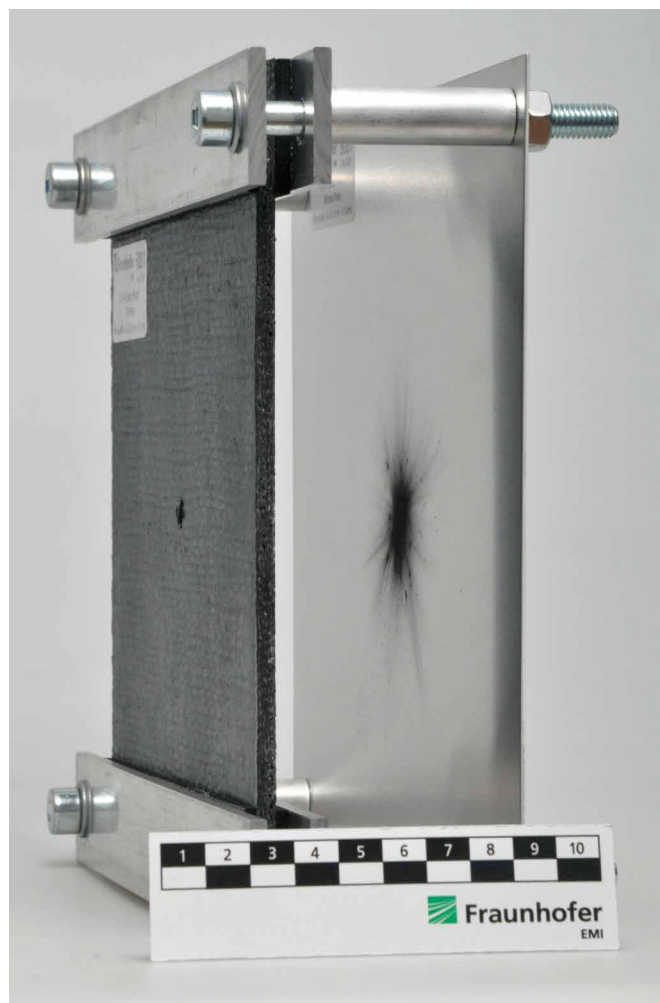
Ein Beitrag von Robin Putzar, robin.putzar@emi.fraunhofer.de

Mit Versuchen und Modellbildung trägt das Fraunhofer EMI dazu bei, dass der Space Rider der ESA erfolgreich wieder landen kann.

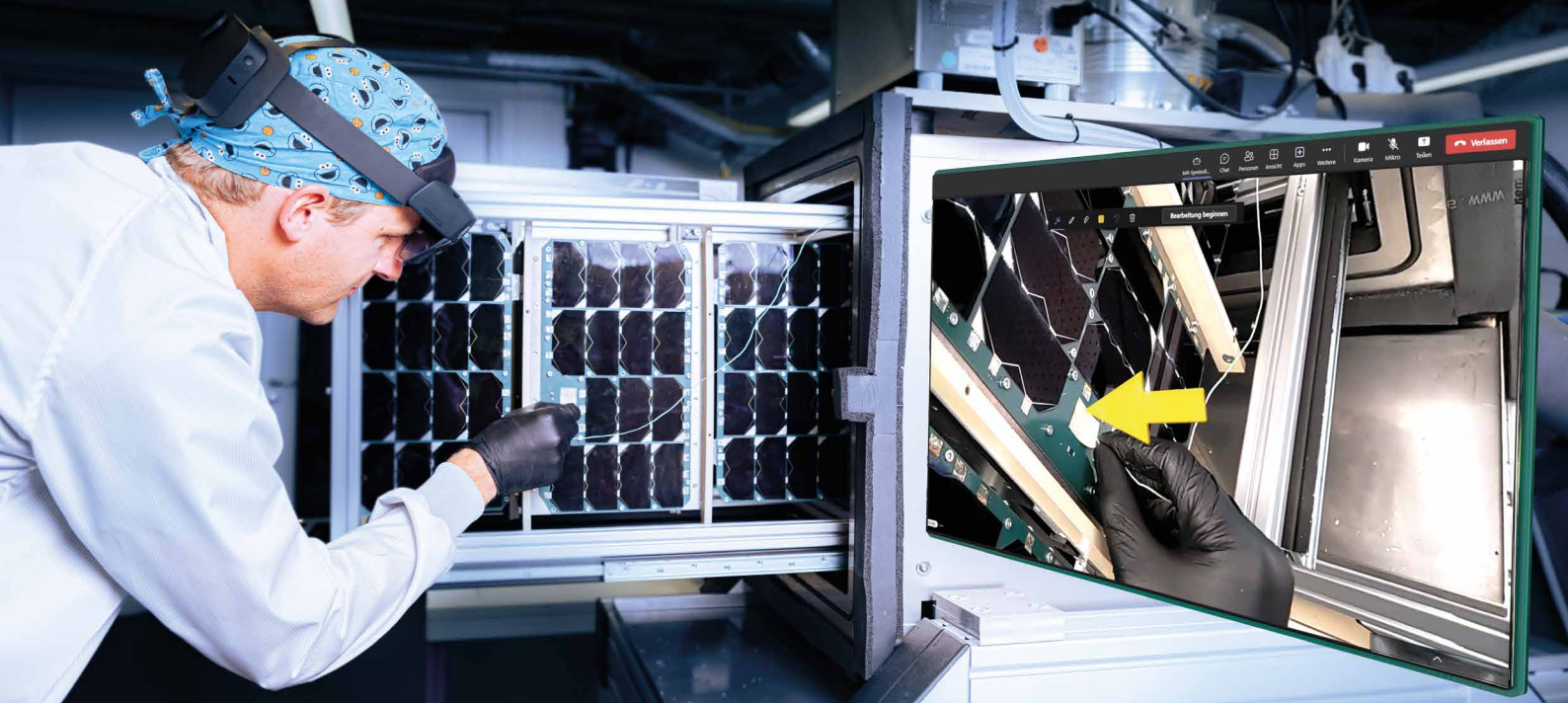
Mit dem Space Rider möchte die ESA 2024 erstmals ein wiederverwendbares unbemanntes Raumfahrzeug starten. Zum Ende jeder der derzeit vorgesehenen sechs Space-Rider-Missionen soll das Raumfahrzeug wieder in die Erdatmosphäre eintreten und danach sanft landen. Der dafür erforderliche Hitzeschutzschild wird während des Flugs im Erdorbit durch Einschläge von Mikrometeoroiden und Weltraumschrott beschädigt. Je nach Größe und Lage können derartige Schäden am Hitzeschutzschild beim Wiedereintritt unproblematisch sein, oder sie können zu einem Totalverlust des Raumfahrzeugs führen.

Um das tatsächliche Risiko durch solche Schäden beim Wiedereintritt bewerten zu können, sind geeignete Schadensmodelle erforderlich. Bisher wurden nur wenige vergleichbare Materialien in Impactversuchen getestet, sodass hierfür keine allgemeinen Modelle existieren. Das Fraunhofer EMI hat daher im Auftrag des italienischen Zentrums für Luft- und Raumfahrt-Forschung CIRA das Verhalten des verwendeten kohlenstofffaserverstärkten Siliziumkarbids in realistischen Impact-szenarien untersucht. CIRA ist beim Space Rider unter anderem für die Entwicklung des Hitzeschutzschields verantwortlich. Aus den bei den Impactversuchen gewonnenen Versuchsdaten wurden am Fraunhofer EMI anschließend die für Risikoanalysen erforderlichen Schadensmodelle entwickelt.

Einige der am EMI beschossenen Proben möchte der Auftraggeber in seinem Plasmawindkanal Scirocco einem simulierten Wiedereintritt aussetzen. Dadurch können die kombinierten Auswirkungen verschiedener Umwelteffekte auf den Hitzeschutz untersucht werden. Solche kombinierten Versuche sind derzeit noch die Ausnahme. Sie liefern aber besonders wertvolle Daten für die Space-Rider-Mission und auch zukünftige Raumfahrtmissionen.



Kohlenstofffaserverstärktes Siliziumkarbid (äußere Lage des Hitzeschutzschields) mit Aluminium-Deutblech nach einem Impactversuch am Fraunhofer EMI.



Externe Ansicht (links) und Ich-Perspektive (rechts) des Ingenieurs im Reinraum, der mit einem entfernten Assistenten zusammenarbeitet, der der gemischten virtuellen Umgebung Dokumentation und 3D-Assets hinzufügen kann.

Erweiterte Realität zur ferngesteuerten Unterstützung bei Satellitenintegration und Satellitentests

Ein Beitrag von Dr. Stephan Busch, stephan.busch@emi.fraunhofer.de, und Konstantin Schäfer, konstantin.schaefer@emi.fraunhofer.de

Die weitreichende Automatisierung von Satellitenintegration, -tests und -betrieb wird zu einem Schlüsselfaktor im Bereich New Space. Dabei kann Augmented Reality den Grad der Telepräsenz für komplexe Aufgaben der Fernunterstützung maximieren.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung einer leistungsfähigen und flexiblen Nanosatellitenplattform für Erdbeobachtungsmissionen hat das Fraunhofer EMI ein modulares Softwareframework entwickelt, das die einfache, ferngesteuerte und automatisierte Steuerung einer heterogenen Satellitentest- und Betriebsinfrastruktur ermöglicht. Das System erleichtert die flexible Interaktion zwischen Testingenieur und verteilter Infrastruktur. Darüber hinaus optimiert es die Effektivität, Reproduzierbarkeit und Auslastung der Geräte, um schnelle Design-, Integrations- und Testzyklen oder eine digitalisierte Serienproduktion zu ermöglichen.

Das System hat sich während der Coronapandemie als besonders vorteilhaft erwiesen, da es eine effiziente Fernsteuerung

und Überwachung der gesamten Laborausstattung während umfassender Satellitenintegrations- und Testkampagnen ermöglichte. In Phasen, in denen eine manuelle Interaktion mit der lokalen Hardware unabdingbar war, erwies sich das System als sehr hilfreich, um eine umfassende Fernunterstützung zu ermöglichen.

In Kombination mit holografischen Headsets kann der Grad der Telepräsenz bei komplexen Fernunterstützungsaufgaben in einem industriellen Hightechumfeld deutlich erhöht werden. Während sich im Technikbereich vor Ort eine einzelne Person ganz auf die Installation einer bestimmten Hardware konzentrieren kann, können weitere Expertinnen und Experten in einer Videokonferenzsitzung assistieren. Dabei haben sie den vollen Zugriff auf die Telemetrie- und Befehlsschnittstellen. Augmented Reality ermöglicht hier eine kontextsensitivere Interaktion, wenn die Kameraperspektive auf die relevante Szene in Echtzeit geteilt werden kann, während der assistierende Ingenieur die Szene mit kontextspezifischer Dokumentation und interaktiven 3D-Assets ergänzt.

Bundeswehr im Dialog, Berlin Congress Center, 31. Mai 2022

Ein Beitrag von Prof. Dr. Frank Schäfer, frank.schaefer@emi.fraunhofer.de

Die fünf Fraunhofer-Institute EMI, FHR, FKIE, INT und IOSB präsentierten aktuelle Forschungsarbeiten und Lösungen im Bereich der militärischen Aufklärung und Informationsgewinnung.

Das Bundesministerium der Verteidigung führte am 31. Mai 2022 in Berlin die Veranstaltung »Bundeswehr im Dialog« durch, die dem intensiven Dialog und Erfahrungsaustausch zwischen militärischen und zivilen Mitarbeitenden aus allen Bundeswehrstandorten diente. Parallel zu den Podiumsdiskussionen fanden fachliche Workshops mit Ausstellungen statt. Die Fraunhofer-Gesellschaft, die Universität der Bundeswehr München und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt waren eingeladen, am Workshop und der Ausstellung zum Thema Weltraum beizutragen.

Die Beiträge der fünf Fraunhofer-Institute EMI, FHR, FKIE, INT und IOSB wurden koordiniert durch die Fraunhofer-Allianz Aviation & Space, einen Zusammenschluss von rund 30 Fraunhofer-Instituten mit dem Ziel, die Luft- und Raumfahrtindustrie und Behörden mit angewandten Forschungsdienstleistungen zu unterstützen. Unter dem Motto »Früher wissen. Mehr sehen. Schneller entscheiden. Sicher kommunizieren.« präsentierten die fünf Institute EMI, FHR, FKIE, INT und IOSB Lösungen von Fraunhofer zur militärischen Aufklärung und Informationsgewinnung und zur satellitengestützten Frühwarnung. So wurden der Nanosatellit ERNST zur weltraumgestützten Frühwarnung und abbildenden Aufklärung (EMI), das Radarsystem GESTRA zur Luft- und Weltraumüberwachung (FHR), das System ABUL zur automatisierten Bildauswertung für Aufklärung und Überwachung (IOSB) und 3DMapping, ein System zur Erstellung von Geländemodellen (FKIE) vorgestellt.



Prof. Dr. Frank Schäfer (rechts) stellt Generalleutnant Dr. Ansgar Rieks, Stellvertreter des Inspektors der Luftwaffe, das Aufklärungsunterstützungstool RASCAT vor.

Rechts oben: Der Auftritt von Fraunhofer Aviation & Space stand unter dem Motto »Früher wissen. Mehr sehen. Schneller entscheiden. Sicher kommunizieren.«

Rechts unten: General (a. D.) Eberhard Zorn (rechts), bis zum 16. März 2023 Generalinspekteur der Bundeswehr, sowie Generalmajor Michael Traut (Mitte), Kommandeur des Weltraumkommandos der Bundeswehr, und Generalmajor Jürgen Setzer (Zweiter von rechts), Stellvertretender Inspekteur im Kommando Cyber- und Informationsraum und Chief Information Security Officer der Bundeswehr, lassen sich von Brigitta Soergel (vorne links) erklären, wie satellitengestützte Frühwarnung mit dem Nanosatelliten ERNST von einer erdnahen Umlaufbahn realisiert wird.





Kollisionsszenarien von Drohnen und Flugzeugen stellen eine wachsende Gefahr im Flugverkehr dar. © Adobe Stock



Geschäftsfeld Luftfahrt



Einleitung	76
Menschen im Geschäftsfeld Luftfahrt	78
SMAUG – was passiert, wenn ein Luftfahrzeug mit einer Drohne kollidiert?	80
Sicherere Nutzung von Laptops, Tablets und Smartphones im Flugzeug	84
Vortrag auf dem AIAA SciTech Forum 2023.....	85
Vortrag zur Drohnenkollision	86
Clean Aviation gestartet	87

Geschäftsfeld Luftfahrt

Feuer und Flugzeuge sind niemals eine gute Kombination. Am Fraunhofer EMI befassen wir uns mit Phänomenen, die einen Brand in einem Flugzeug auslösen können. Hierzu gehören beispielsweise Impaktvorgänge auf einen Treibstofftank (siehe Concorde-Unfall im Jahr 2000) oder thermisches Durchgehen von Batterien in tragbaren elektronischen Geräten wie Laptops oder Mobilfunkgeräten. Die folgenden Beiträge zeigen einen kleinen Ausschnitt aus diesen Aktivitäten.



The only time there
was too much fuel
aboard any aircraft
was if it was on fire.«

Ernest K. Gann (1910–1991),
US-amerikanischer Pilot und Autor



Dr. Michael May
Geschäftsfeldleiter Luftfahrt
michael.may@emi.fraunhofer.de

s.fhg.de/emi-luftfahrt

Menschen im Geschäftsfeld Luftfahrt



Hier lassen wir vier Forscher
aus dem Geschäftsfeld Luftfahrt
zu Wort kommen.

- 1 Benjamin Schaufelberger
benjamin.schaufelberger@emi.fraunhofer.de
- 2 Simon Holz
simon.holz@emi.fraunhofer.de
- 3 Dr. Georg Heilig
georg.heilig@emi.fraunhofer.de
- 4 Dr. Michael May
michael.may@emi.fraunhofer.de

SMAUG – was passiert, wenn ein Luftfahrzeug mit einer Drohne kollidiert?



Ein Beitrag von Benjamin Schaufelberger, benjamin.schaufelberger@emi.fraunhofer.de

Validierte Simulationsmodelle geben Einblicke in mögliche Kollisionen von Flugzeugen und Helikoptern mit Drohnen.

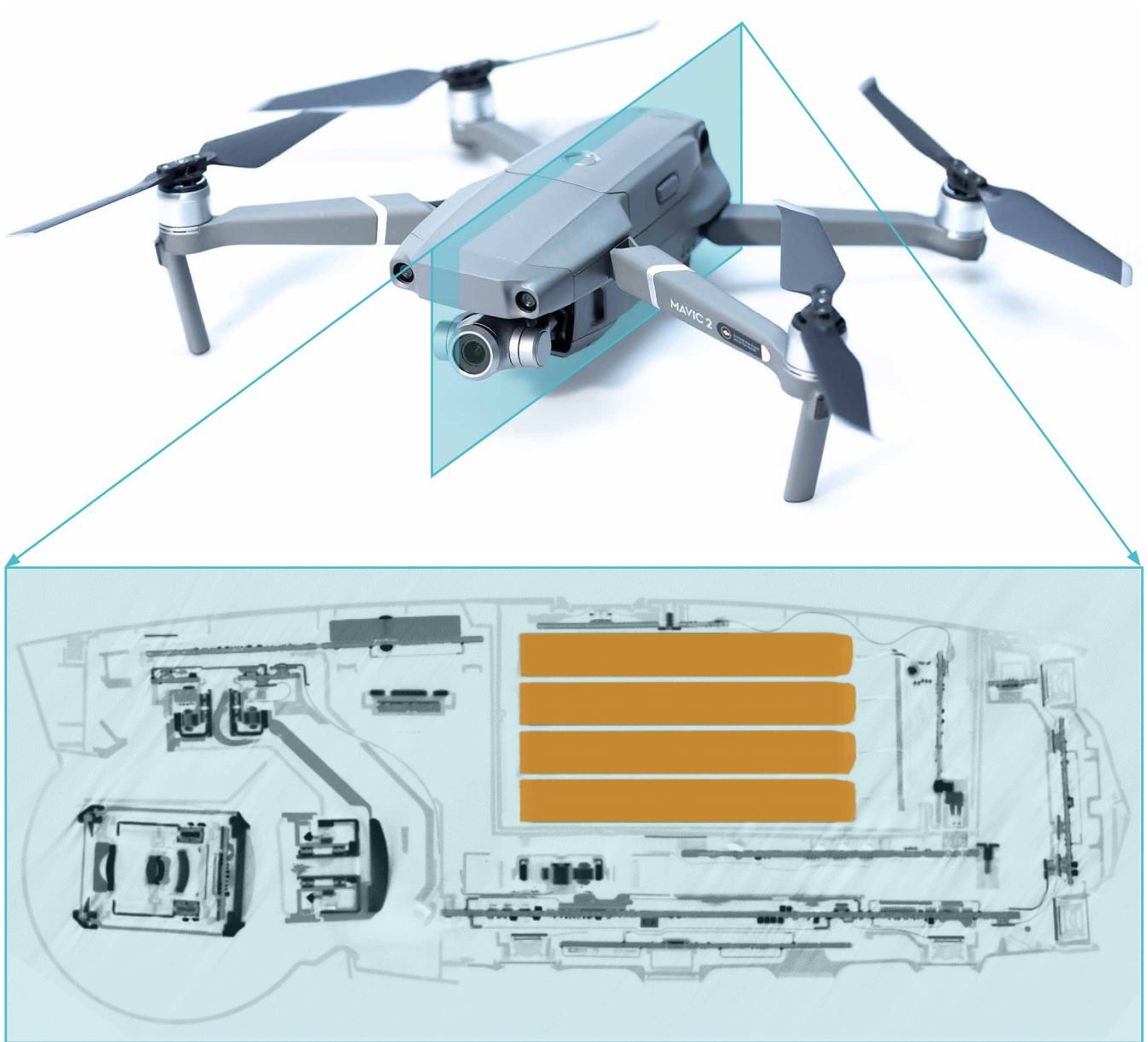
Mit zunehmender Verbreitung von Drohnen steigt auch die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision mit einem Flugzeug oder einem Helikopter. Ein umfassendes Verständnis des Impaktvorgangs ist dabei eine wesentliche Voraussetzung, um mögliche Kollisionen zu simulieren und anschließend zu bewerten.

Aktuell sind in Deutschland mehr als 400 000 Drohnen im Umlauf, die meisten davon werden privat genutzt. Ein Drohnenführerschein ist zwar für das Führen von Drohnen über 250 Gramm notwendig, dennoch kann eine Kollision mit einem Luftfahrzeug nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Folglich ist es von großem wissenschaftlichen Interesse zu erfahren, wie sich aktuelle Luftfahrtstrukturen bei Kollisionen mit Drohnen verhalten. Relevante Kollisionsszenarien orientieren sich dabei an typischen Start- und Landegeschwindigkeiten von Flugzeugen beziehungsweise an der Reisegeschwindigkeit von Helikoptern. Der zu berücksichtigende Geschwindigkeitsbereich liegt somit etwa zwischen 50 und 150 Metern pro Sekunde. In SMAUG – Simulationsmethoden zur Analyse von Zusammenstößen zwischen Drohnen und Flugzeugen – wurden Simulationsmodelle für entsprechende

Kollisionsszenarien entwickelt. Das Vorhaben wurde im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms VI vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

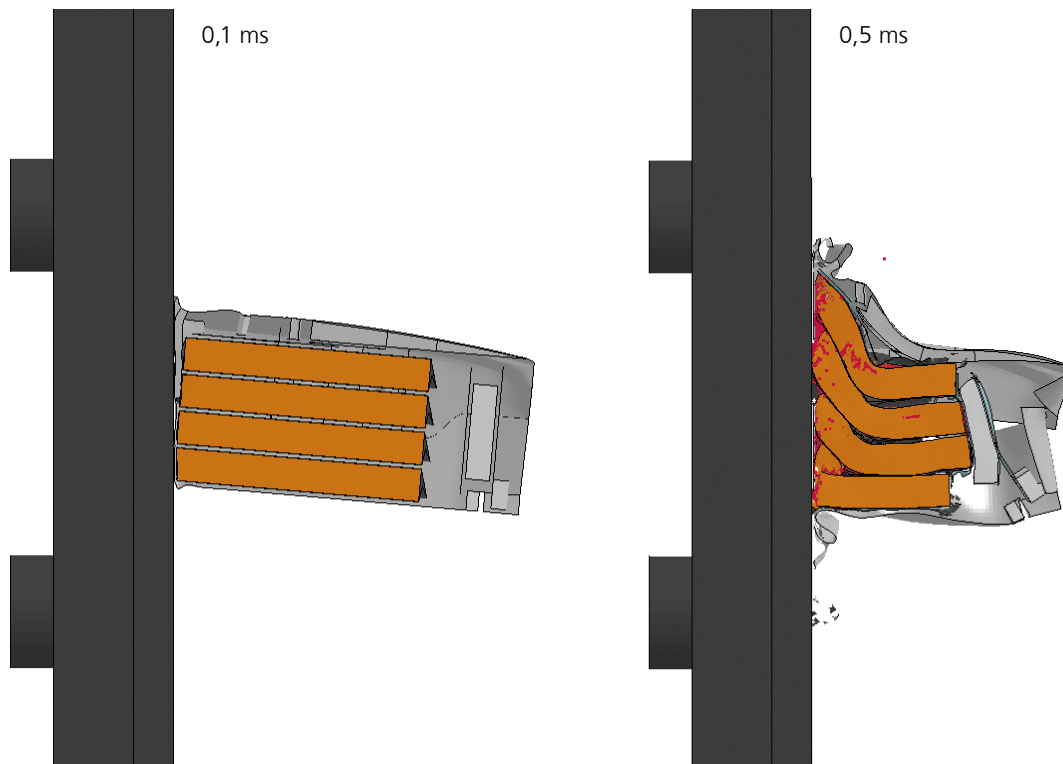
Auswahl der Drohne

Experimentelle und numerische Untersuchungen in SMAUG wurden anhand des beliebten Quadrocopters DJI Mavic 2 Zoom durchgeführt. Neben der weiten Verbreitung ist seine Masse von 907 Gramm (das entspricht zwei englischen Pfund) ein Auswahlkriterium gewesen. Durch Auswahl dieser Drohne konnte eine Analogie zu den Zulassungsvorschriften bei Kleinflugzeugen in Bezug auf Vogelschlag hergestellt werden, wo von einer Vogelmasse von zwei Pfund ausgegangen wird. Die ausgewählte Drohne besteht aus vier Armen, auf denen die Elektromotoren und Rotoren angebracht sind, sowie dem Rumpf, der Kamera und Batterie aufnimmt. Erste experimentelle Untersuchungen an den Komponenten Motor, Kamera und Batterie haben gezeigt, dass von den Motoren, aber insbesondere auch von der Batterie, ein besonderes Gefährdungspotenzial ausgeht. Die Batterie steht dabei aufgrund ihrer kompakten, aber sehr komplexen Bauform und der vergleichsweise hohen Masse von 292 Gramm besonders im Fokus. ►



Oben: Die DJI Mavic 2 Zoom – eine repräsentative Hobbydrohne mit einem Gewicht von circa einem Kilogramm.

Unten: Computertomografie-Aufnahme der Drohne (aufgenommen in einer zusammengeklappten Konfiguration), orange hervorgehoben sind die Batteriezellen.

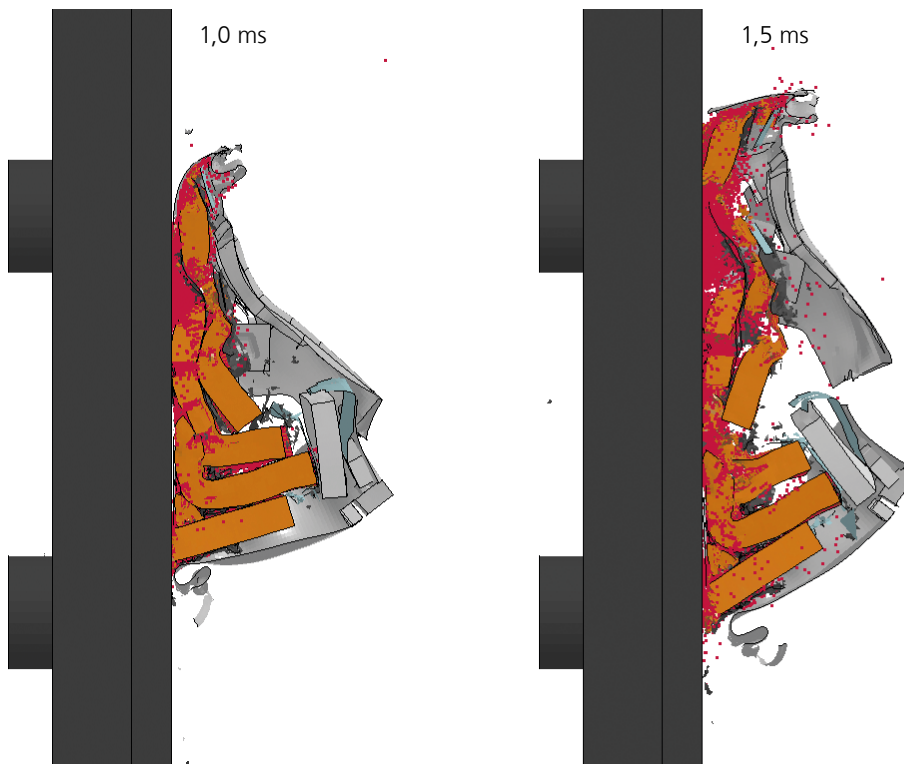


Charakterisierung der Drohnenbatterie

Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Drohnenbatterie erfolgte mit einem sogenannten Pyramidenansatz. Dabei wird das Verständnis des Gesamtsystems aufbauend auf dem Verhalten der einzelnen Komponenten und Materialien entwickelt. Die Drohnenbatterie, welche im Wesentlichen aus einem Kunststoffgehäuse, vier Batteriezellen sowie Platinen und Kabeln besteht, wurde zerlegt und mit unterschiedlichen optischen Methoden vermessen. Zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Simulation wurden Proben an ausgewählten Stellen entnommen und anschließend mechanisch geprüft. In einem nächsten Schritt wurde das mechanische Verhalten der Gesamtbatterie in Längs- und Querrichtung ermittelt. Anhand von statischen Druckversuchen konnten so die Steifigkeit und das Versagensverhalten der Batterie bestimmt werden.

Batteriemodell: Entwicklung, Validierung und Anwendung

Die fundierten experimentellen Daten bildeten eine sehr gute Grundlage für den Aufbau eines hochaufgelösten Simulationsmodells der Batterie. Allerdings kann mit dem beschriebenen Vorgehen ein für das Vorhaben wesentliches Phänomen noch nicht ausreichend erfasst werden: das Zerschellen der Drohnenbatterie bei höheren Geschwindigkeiten. Daher wurden an einem hierfür speziell adaptierten Prüfstand Impactversuche im luftfahrtrelevanten Geschwindigkeitsbereich von 100 Metern pro Sekunde durchgeführt. Mithilfe von Hochgeschwindigkeitskameras konnten somit das Aufbrechen des Gehäuses und das Fragmentieren der verbauten Batteriezellen optisch zugänglich gemacht werden. Das Fragmentieren der Batteriezellen soll in der Simulation durch einen Wechsel der Berechnungsmethode abgebildet werden: Die Batteriezellen werden zu Beginn des Aufpralls, so wie auch die anderen Komponenten, durch eine netzbasierte Methode (FEM, Finite-Elemente-Methode) beschrieben. Bei größeren Deformationen erfolgt dann eine Umwandlung in eine partikelbasierte Beschreibung (SPH, Smooth Particle Hydrodynamics). Durch diese adaptive



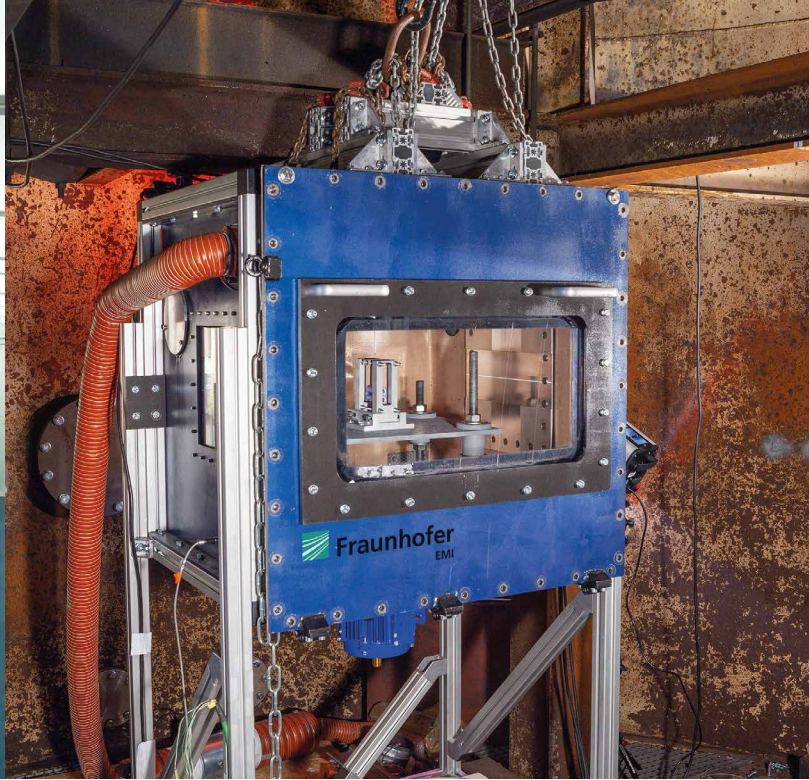
Simulierter Impakt der Drohnenbatterie auf eine Prallplatte. Die finiten Elemente der Batteriezellen (orange) werden bei starker Deformation (nach 0,5 Millisekunden) in Partikel (rot) umgewandelt.

Umwandlung gelingt es, das experimentelle Impaktverhalten der Batterie qualitativ und quantitativ zu simulieren. Nach der Validierung anhand der durchgeführten Impaktexperimente wurde die Anwendbarkeit des entwickelten Modells getestet. Dafür wurde der Impakt der Batterie auf die Windschutzscheibe einer generischen Helikopterstruktur modelliert. Helikopter sind dabei aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen Flughöhe und ihrem Einsatz in bewohntem Gebiet von besonderer Relevanz. In den virtuell untersuchten Kollisionsszenarien kam es zwar zu einer starken Deformation der Windschutzscheibe, allerdings nicht zu einem Aufreißen.

Mit Abschluss des Projekts SMAUG steht somit ein validiertes Modell einer Drohnenbatterie zur Verfügung. In einem nächsten Schritt ist nun geplant, ein Simulationsmodell der gesamten Drohne zu entwickeln, um damit zukünftig das Verhalten von Luftfahrtstrukturen bei Kollisionen mit Drohnen virtuell zu untersuchen. ■

Impakt auf Luftfahrzeuge

- Zukünftig soll eine Auslegung von Luftfahrtstrukturen gegenüber Impaktvorgängen überwiegend virtuell, das heißt basierend auf Simulationsmodellen, erfolgen.
- Experimentelle Impaktversuche bilden eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung eines detaillierten Modells einer Drohnenbatterie.
- Die Gefahr einer Kollision zwischen Drohne und Luftfahrzeug besteht insbesondere in urbanen Gebieten.



Links: Fluglabor des Fraunhofer IBP in Holzkirchen. ©Fraunhofer IBP

Rechts: Testkammer im Batterietestzentrum TEVLIB des Fraunhofer EMI in Efringen-Kirchen.

Sicherere Nutzung von Laptops, Tablets und Smartphones im Flugzeug

Ein Beitrag von Simon Holz, simon.holz@emi.fraunhofer.de

Die Risiken, die mit der Nutzung von Laptops, Tablets und Smartphones durch Passagiere im Flug einhergehen, werden im Rahmen des Projekts LOKI-PED (Lithium Batteries in Portable Electronic Devices – Risk of Fire and Smoke – Portable Electronic Devices), das durch die Europäische Agentur für Flugsicherheit gefördert wird, bewertet.

Während des Flugs führen viele Passagiere ihre tragbaren elektronischen Geräte (Portable Electronic Devices, PED) mit sich. Durch das Einklemmen im Sitz oder eine Überhitzung beim Laden können sich die Lithium-Ionen-Batterien in den PED erhitzen und aufblähen. Dabei treten heiße, toxische und brennbare Gase aus. Solche Ereignisse können die sichere Durchführung des Flugs und die Gesundheit der Passagiere und des Kabinenpersonals bedrohen. Die freigesetzte Wärme- und Gasmenge hängt stark vom Energieinhalt der Batterien ab. Aktuell sind PED an Bord auf 100 Wattstunden begrenzt. Leistungsstarke Elektrowerkzeuge und Laptops kommen dieser Grenze sehr nahe. Deshalb besteht die Notwendig-

keit, die Richtlinien und Maßnahmen zur Risikominimierung wissenschaftlich zu bewerten.

Im Rahmen des LOKI-PED-Projekts arbeiten die Fraunhofer-Institute für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, und Bauphysik IBP mit der Airbus Operations GmbH und dem Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zusammen. Mit leistungsstarken Prüfständen wie dem Batterietestzentrum TEVLIB des Fraunhofer EMI, dem Kabinenfeuerprüfstand am DLR und dem Fluglabor des Fraunhofer IBP werden die Konsequenzen von Rauch und Feuer, verursacht durch PED, untersucht. Die Experimente sind die Basis für numerische Simulationen und die anschließende Risikobewertung. Von den Projektergebnissen werden Fluglinien, Aufsichtsbehörden, das Kabinenpersonal und die Passagiere profitieren.

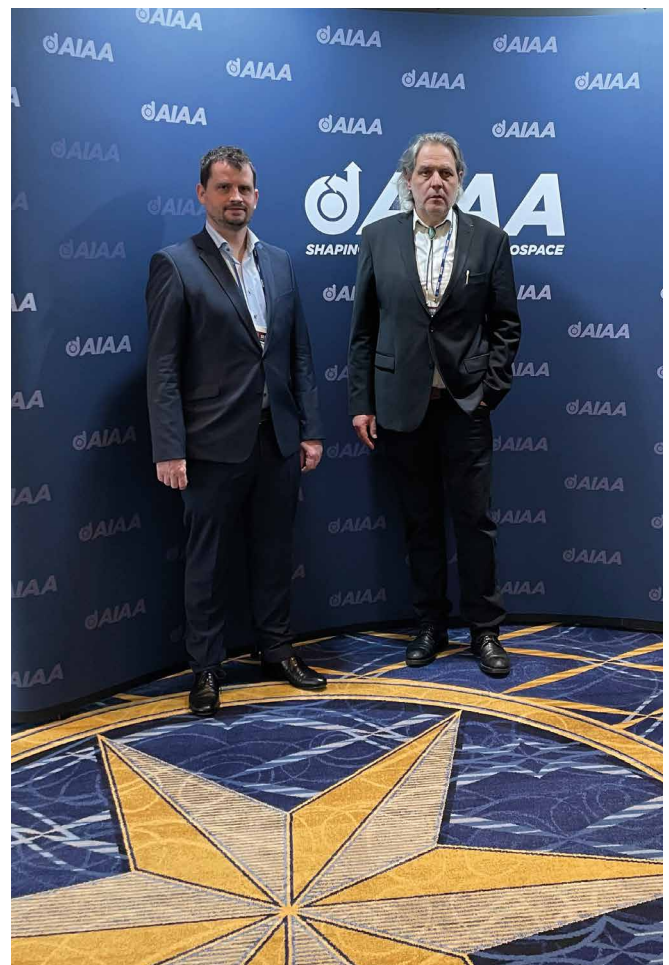


Vortrag auf dem AIAA SciTech Forum 2023

Ein Beitrag von Dr. Georg Heilig, georg.heilig@emi.fraunhofer.de,
und Dr. Michael May, michael.may@emi.fraunhofer.de

Das American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) – gegründet 1963 – organisiert jährlich Konferenzen, um die Luft- und Raumfahrt akademisch zu fördern. Die Konferenzen der AIAA sind die weltweit größten in diesem Gebiet, mehr als 5000 Fachleute aus 44 Ländern nehmen daran teil. Sie bieten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unter anderem die Möglichkeit, ihre Arbeit in Fachvorträgen zu präsentieren.

Im Januar 2023 fand das AIAA SciTech Forum in National Harbor in der Nähe von Washington, D.C., in den USA statt. Dr. Georg Heilig und Dr. Michael May vom Fraunhofer EMI hatten die Möglichkeit, ihre Ergebnisse zum hydrodynamischen RAM-Effekt (HRAM) in einer technischen Session vorzustellen. Der HRAM-Effekt spielt eine wichtige Rolle für die Sicherheit von zivilen und militärischen Flugzeugen, da Stoßwellen, die durch externe Lasten in einem Treibstofftank ausgelöst werden, zum vollständigen Verlust des Flugzeugs führen können. Ein prominentes Beispiel dafür ist der Absturz einer Concorde im Juli 2000 (Paris, Flughafen Charles de Gaulle). Am EMI werden experimentelle und rechnerische Ergebnisse erarbeitet, bei denen mit Wasser gefüllte Tanks von metallischen Projektilen mit Geschwindigkeiten von über 300 Metern pro Sekunde beaufschlagt werden. Die Initiierung und Ausbreitung von Stoßwellen im Wasser, die Hohlraumbildung (Kavität) und die verzögert einsetzende Strukturantwort der Tanks werden berechnet, gemessen und mittels Hochgeschwindigkeitskameras visualisiert.



Dr. Georg Heilig (rechts) und Dr. Michael May nach ihrem Vortrag am 26. Januar 2023 bei der AIAA SciTech Conference in National Harbor, USA.

Vortrag zur Drohnenkollision

Ein Beitrag von Dr. Michael May, michael.may@emi.fraunhofer.de



Das Risiko ungewollter Kollisionen zwischen Flugzeugen und Drohnen steigt. © Adobe Stock

Im Rahmen der 2nd European Conference on Crashworthiness of Composite Structures hielten Wissenschaftler des Fraunhofer EMI einen gemeinsamen Vortrag mit Kollegen der TU Braunschweig und von Airbus Defence and Space zum Thema Drohnenkollision mit Luftfahrzeugen.

Die zunehmende Verfügbarkeit von Drohnen auf dem Hobbymarkt erhöht das Risiko einer ungewollten Kollision zwischen Luftfahrzeugen und Hobbydrohnen. Während Kollisionen von Luftfahrzeugen mit Vögeln weitreichend erforscht worden sind, ist zum heutigen Zeitpunkt ist noch relativ wenig über die Auswirkungen einer Kollision zwischen einem Luftfahrzeug und einer Hobbydrohne bekannt. Aufgrund der hohen Steifigkeit und Festigkeit der verschiedenen Drohnenkomponenten

ist jedoch zunächst davon auszugehen, dass eine Drohne einen höheren Schaden an der Luftfahrtstruktur verursacht als ein Vogel gleicher Masse. In einem gemeinsamen Vortrag auf der 2nd European Conference on Crashworthiness of Composite Structures (ECCCS-2) in Toulouse stellten Wissenschaftler der TU Braunschweig, Airbus Defence and Space und Fraunhofer EMI ihre Erkenntnisse aus umfangreichen experimentellen und numerischen Studien vor. Basierend auf quasistatischen und dynamischen Versuchen an relevanten Drohnenkomponenten – wie den Motoren oder der Batterie – wurde ein vereinfachtes Finite-Elemente-Modell einer Gesamtdrohne aufgebaut und für parametrische Impaktstudien auf eine repräsentative Luftfahrtstruktur verwendet. Im untersuchten Parameterbereich stellte die Drohne keine erhöhte Gefahr für die Luftfahrtstruktur dar.



Das Clean-Aviation-Programm ist eine zentrale Säule auf dem Weg zum Ziel einer dekarbonisierten Luftfahrt. © Adobe Stock

Clean Aviation gestartet

Ein Beitrag von Dr. Michael May, michael.may@emi.fraunhofer.de

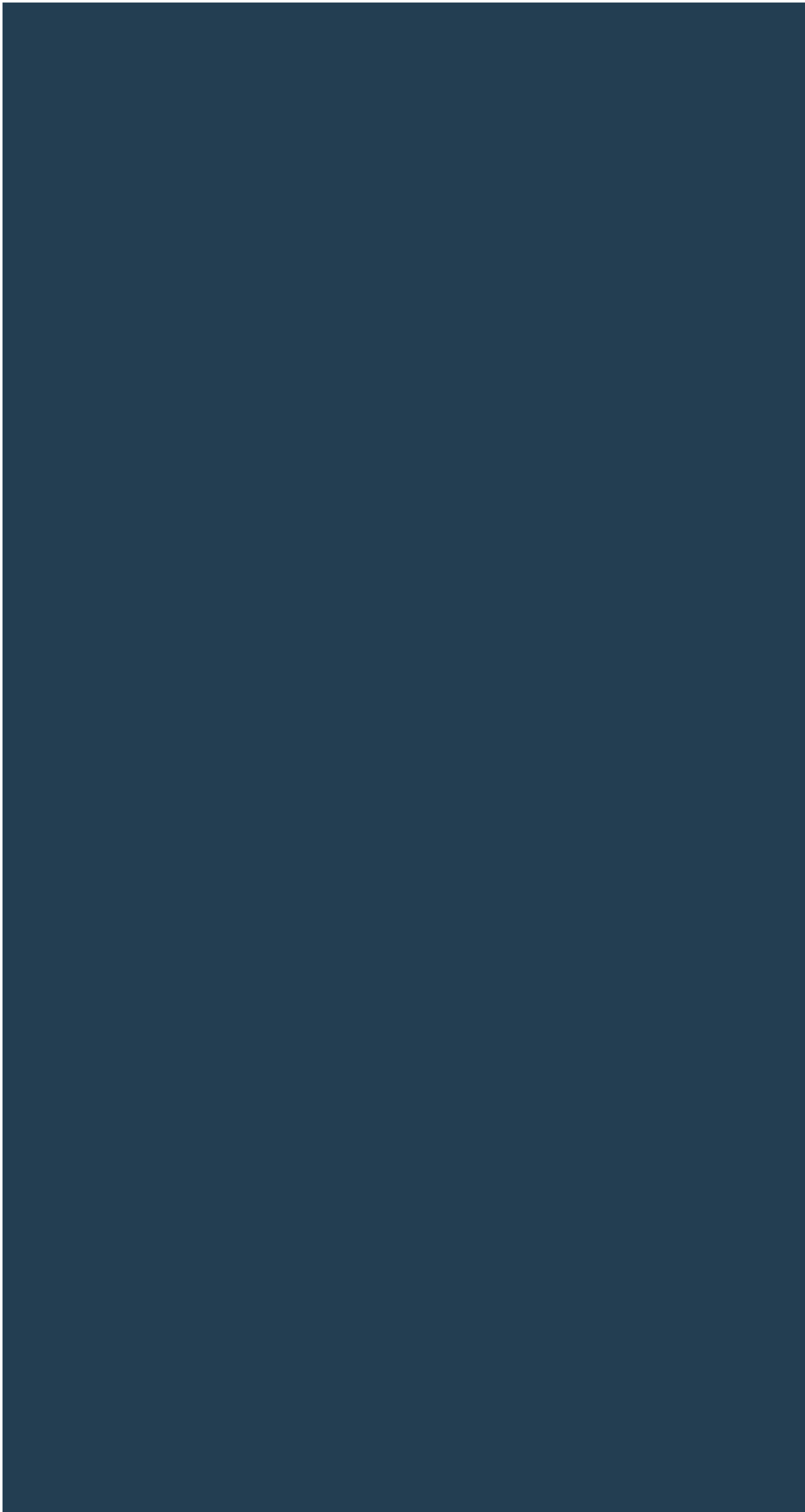
Clean Aviation ist Europas führendes Forschungs- und Innovationsprogramm mit dem Ziel, die Luftfahrt in eine nachhaltige und klimaneutrale Zukunft zu führen.

Das Clean-Aviation-Programm ist eine zentrale Säule auf dem Weg zum Ziel einer dekarbonisierten Luftfahrt im Jahr 2050. Im Rahmen dieses Forschungsprogramms arbeiten die Luftfahrtindustrie, Forschungseinrichtungen (wie die Fraunhofer-Gesellschaft) und Universitäten gemeinsam an Technologien, welche zukünftig dekarbonisiertes Fliegen ermöglichen. Unter anderem werden hybrid-elektrische Antriebssysteme, Brennstoffzellenantriebe und Wasserstoffdirektverbrennung für die Luftfahrt entwickelt. Zu Beginn des Jahres 2023 wurden mehrere Forschungsprojekte im Rahmen von Clean Aviation gestartet. Das Fraunhofer EMI ist am Projekt UP Wing beteiligt, welches Technologiebausteine für ultraeffiziente Flügelstrukturen entwickelt.



**Co-funded by
the European Union**

UP Wing ist ein Clean-Aviation-Projekt, das von der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung ID: 101101974 gefördert wird.



Das EMI im Weitwinkel





In der Rubrik »EMI im Weitwinkel« öffnen wir unseren Blick und schauen auf Themen, die über die Geschäftsfelder hinweg im vergangenen Jahr wichtig waren. © Adobe Stock



Das EMI im Weitwinkel

Das EMI im Weitwinkel	92
Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg	94
Generative Fertigung – Nachhaltigkeitsaspekte im Fokus	95
Zerstörende Sicherheitstests großer Lithium-Ionen-Batterien	96
Geschicht das Eis brechen – ein Beitrag zur Kernfusionsforschung	98
Für die Forscherinnen von morgen: Girls' Day 2022 am Fraunhofer EMI	100

Das EMI im Weitwinkel



Mit dem EMI im Weitwinkel öffnen fünf Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter den Blick auf Themen, die über die Geschäftsfelder hinweg im vergangenen Jahr wichtig waren.

- 1 *Christiane Felder*
christiane.felder@emi.fraunhofer.de
- 2 *Dr. Klaus Hoschke*
klaus.hoschke@emi.fraunhofer.de
- 3 *Sebastian Schopferer*
sebastian.schopferer@emi.fraunhofer.de
- 4 *Dr. Pascal Matura*
pascal.matura@emi.fraunhofer.de
- 5 *Heide Haasdonk*
heide.haasdonk@emi.fraunhofer.de



Das Team der Geschäftsstelle des LZN (von links nach rechts): Lorenz Bayer, Dr. Juri Lienert, Jessica Nuss und Christiane Felder vom Fraunhofer EMI.

Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg

Ein Beitrag von Christiane Felder, christiane.felder@emi.fraunhofer.de

Das Leistungszentrum Nachhaltigkeit verknüpft den Forschungskosmos von Fraunhofer und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg mit der Anwendung in Wirtschaft und Gesellschaft.

Ein Leistungszentrum zur Förderung anwendungs- und zukunftsorientierter Lösungen der Umweltprobleme unserer Zeit

Mit der Kooperation der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg tragen Forschende im Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg (LZN) dazu bei, Lösungen für eine nachhaltige Zukunft zu entwickeln. Im LZN werden Projekte mit Nachhaltigkeitsbezug gefördert und Transferangebote in enger Zusammenarbeit mit Unternehmen, Verbänden und weiteren Akteuren aus der Region Freiburg und darüber hinaus entwickelt. Im Zentrum stehen dabei die Themenschwerpunkte Sustainable Materials, Energy Systems, Resilience Engineering und Ecological and Societal Transformation. Seit der Gründung des LZN haben sich Forschende des Fraunhofer EMI an verschiedenen Forschungsprojekten beteiligt – derzeit etwa im Pilotprojekt WEiTeR. Ziel des Projekts ist es, Lösungen zur Erweiterung der Nutzungszeit,

der Wiederverwendung bis hin zur hochwertigen Rückgewinnung von eingesetzten Carbonfasern in Wasserstoffbehältern zu entwickeln und der Industrie zur Verfügung zu stellen, um damit einen verbesserten CO₂-Footprint zu erreichen.

Stärkung des Innovationsstandorts Freiburg für Gründer:innen mit innovativen und nachhaltigen Ideen

Im Zuge der Gründungsunterstützung des LZN werden Fraunhofer-Teams mit Ambitionen zur Ausgründung finanziell sowie durch die Vermittlung von professioneller Beratung gefördert. Ziel hiervon ist es, die Gründer:innen-Szene der Stadt zu stärken und nachhaltige, technologische Ideen in die Anwendung zu bringen. Zur Unterstützung zählt zum Beispiel auch die jährliche Veranstaltung der Innovation Bar, bei der sich angehende Gründer:innen informieren, austauschen und vernetzen können.

Generative Fertigung – Nachhaltigkeitsaspekte im Fokus

Ein Beitrag von Dr. Klaus Hoschke, klaus.hoschke@emi.fraunhofer.de

Nachhaltigkeit im Leichtbau mit der generativen Fertigung: Für einen effizienten Fertigungsprozess ist das Design direkt mit dem digitalen Fertigungsplan verknüpft.

Ressourceneffiziente Fertigung von Leichtbauteilen

Die generative Fertigung eröffnet neue Möglichkeiten im Leichtbau und trägt damit zur Nachhaltigkeit bei. Am Fraunhofer EMI wird dieses Thema intensiv erforscht, um Bauteile leistungsfähiger zu machen und gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck zu verkleinern.

Der Leichtbau als Schlüsseltechnologie für ressourcenschonende Produkte ist in der generativen Fertigung von besonderer Bedeutung. Der 3D-Druck ermöglicht eine endkonturnahe Fertigung, wodurch leichtere Bauteile auch weniger Rohmaterial benötigen. Leichtbau führt also zur Verringerung des Materialverbrauchs und außerdem zu einem geringeren Energiebedarf bei der Herstellung.

Zuverlässige Modelle und optimierter Fertigungsplan

Das Fraunhofer EMI entwickelt Methoden und Analysen, die das Leichtbaudesign und den digitalen Fertigungsplan gezielt optimieren. Um Nachhaltigkeitsaspekte entlang der gesamten Prozesskette zu berücksichtigen, werden diese bereits im Produktdesign adressiert. Am Fraunhofer EMI wird dafür eine innovative Designmethode entwickelt.

Durch die Verknüpfung von Modellen für die Topologieoptimierung mit Analysen der Fertigung und der Lebenszyklusanalyse des Produkts können auch zentrale Aspekte der Nachhaltigkeit im Design berücksichtigt werden. Dies ermöglicht es, wichtige Entscheidungen bezüglich Nachhaltigkeit bereits in der frühen Designphase zu treffen, Materialien und Produktionsparameter zu vergleichen und den Fertigungsplan hinsichtlich Nachhaltigkeit zu optimieren.



Effiziente Skalierung und höchste Qualität: Durch optimierte Geometrie und optimale Anordnung können in einem Druckvorgang eine Vielzahl von Bauteilen gedruckt werden. Im Bild: mehrere Radträger mit Supportstrukturen nach dem Druck.

Zerstörende Sicherheitstests großer Lithium-Ionen-Batterien

Ein Beitrag von Dr. Sebastian Schopferer, sebastian.schopferer@emi.fraunhofer.de

Am Fraunhofer EMI wurde ein neues Labor für Untersuchungen zur Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien errichtet – finanziert durch das Land Baden-Württemberg, den Bund und von der Fraunhofer-Gesellschaft.

Die rasante Zunahme des Marktanteils von batterieelektrischen Fahrzeugen und die nach wie vor dynamische Entwicklung bei der Batterietechnologie machen erhebliche Testkapazitäten erforderlich, um die Industrie bei der Entwicklung sicherer Produkte zu unterstützen. Das EMI eröffnet daher ein neues Batterieprüflabor für die Durchführung zerstörender Sicherheitstests.

Zum Leistungsangebot im Geschäftsfeld Automotive gehören experimentelle und simulative Untersuchungen zum Crashverhalten von Batteriezellen, Modulen und Hochvoltspeichern. Außerdem können in der neuen Versuchsanlage die thermische Propagation – die gefürchtete Kettenreaktion innerhalb eines Batteriepacks – studiert und geeignete Gegenmaßnahmen erforscht werden. Aber auch bei stationären Batteriespeichern, welche durch den zunehmenden Ausbau der erneuerbaren Energien nun auch im Heimbereich Einzug halten, besteht noch viel Forschungsbedarf, um zu sichereren Systemen zu kommen.

Das neue Batterieprüflabor TEVLIB nimmt Fahrt auf

Die »Testanlage zur Erforschung des Versagens großer Lithium-Ionen-Batterien unter Missbrauchsbedingungen« – kurz TEVLIB – besitzt einen robusten Bunker, in welchem die Versuche ablaufen. Alleinstellungsmerkmale bei der Versuchstechnik bestehen in der neuen Batteriecrashanlage und der In-situ-Röntgentechnik. Die Tests enden nicht selten im Brand des Batteriespeichers, wobei erhebliche Mengen an Brandgasen und Partikeln ausgestoßen werden. Das Laborgebäude besitzt daher umfangreiche Sicherheitseinrichtungen und einen Gaswäscher zur Abluftreinigung, um die zerstörenden Tests an großen Batteriesystemen unter Einhaltung höchster Sicherheitsstandards für Mitarbeitende, Infrastruktur und Umwelt durchführen zu können.



*Oben: das neue Labor TEVLIB zur Erforschung des Versagens großer Lithium-Ionen-Batterien am EMI-Standort Efringen-Kirchen.
Unten: Kammer zur Untersuchung von Batterieversagen mittels In-situ-Röntgentechnik.*

Geschickt das Eis brechen – ein Beitrag zur Kernfusionsforschung

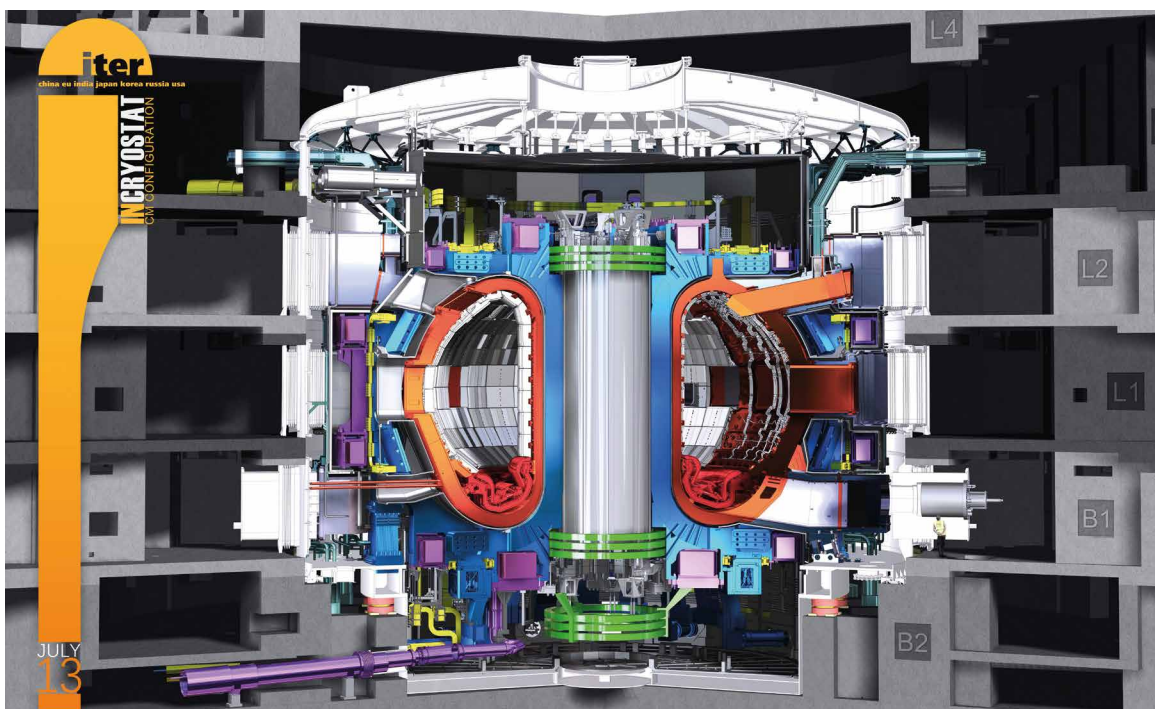
Ein Beitrag von Dr. Pascal Matura, pascal.matura@emi.fraunhofer.de

Aktuelle Prognosen gehen von einem weltweit steigenden Primärenergie- und Strombedarf aus. Um diesen zu decken und gleichzeitig den enormen Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen, spielen CO₂-neutrale regenerative Energiequellen wie Wind und Sonne eine wichtige Rolle. Doch auch Kernfusionskraftwerke könnten künftig ihren Beitrag zur Stromerzeugung für die Deckung der Grundlast leisten.

Bis zum ersten Kraftwerk dieser Art ist allerdings noch ein gewisser Weg zu gehen. Und auf diesem Weg befindet sich, im wahrsten Sinne des Wortes, das internationale Großforschungsprojekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Der bislang weltweit größte Kernfusionsreaktor, der sich derzeit im südfranzösischen Cadarache im Aufbau befindet, soll erstmals zeigen, dass ein Nettoenergiegewinn bei der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium technisch möglich ist – also mit einem Prozess, der in ähnlicher Weise

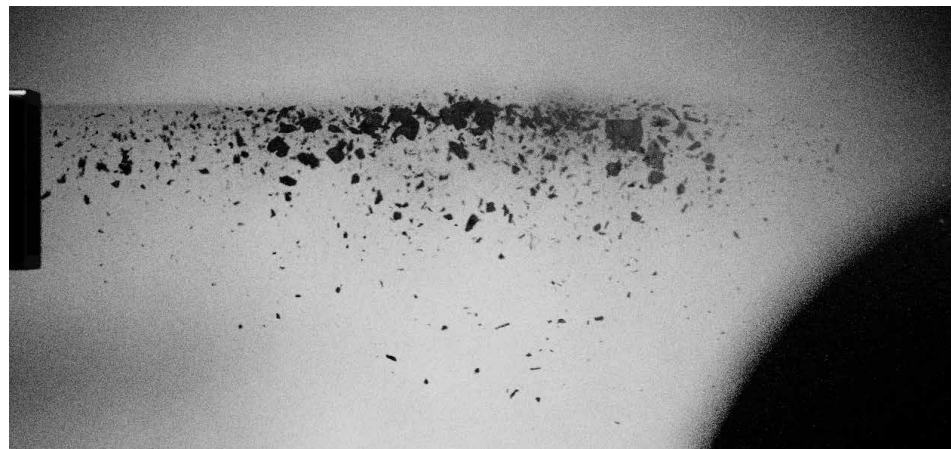
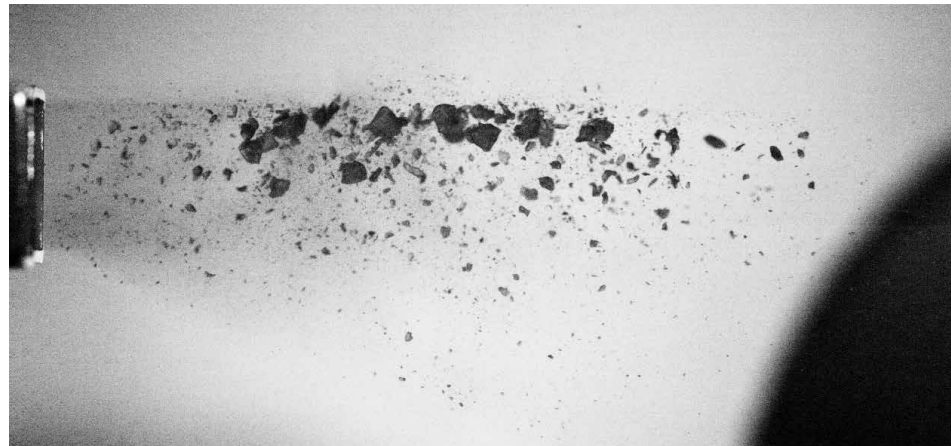
auch in der Sonne abläuft. Im Gegensatz zur Sonne werden hierzu aufgrund der höheren Effizienz die beiden Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium verwendet.

Dieser Energiegewinn speist sich aus der starken Kernkraft, die allerdings nur auf sehr kurzen Distanzen im Bereich der Atomkerne wirksam ist. Damit die Fusion überhaupt vonstattengeht, muss zunächst viel Energie aufgebracht werden, um die abstoßenden Kräfte der positiv geladenen Atomkerne zu überwinden: Der Wasserstoff wird dazu auf extrem hohe Temperaturen zwischen etwa 100 bis 200 Millionen Grad Celsius erhitzt, wobei er auch zusammengehalten werden muss. Da bei diesen Temperaturen der Wasserstoff nicht mehr als Gas, sondern als Plasma vorliegt, kann er mittels Magnetfeldern beeinflusst und so in einem ringförmigen Magnetfeldkäfig eingeschlossen werden (Tokamak-Prinzip). Ist dieses Plasma ausreichend dicht und lange genug bei hohen Temperaturen eingeschlossen (Lawson-Kriterium), kommen die Fusionsprozesse in Gang und setzen dabei enorme Mengen an Energie frei. Diese werden



Schnittmodell des ITER-Tokamaks. © ITER Organization

Fragmentwolke aus einem Laborimpaktexperiment (oben, ASDEX Upgrade SPI project of IPP Garching (MPG) and ITER Organization) und korrespondierender Simulation des Fraunhofer EMI mit der Software MD-Cube (unten).



zum einen für die weitere Heizung des Plasmas genutzt und zum anderen nach außen an das Blanket, die innere Struktur des Plasmagefäßes, abgegeben: Ein Kühlmittel wird erhitzt, und der über einen Wärmetauscher erzeugte Dampf treibt mittels einer Turbine einen Generator zur Stromerzeugung an.

Eine Herausforderung besteht darin, das Plasma in einem kontrollierten Zustand zu halten. Sogenannte Plasmadisruptionen – plötzlich auftretende Störungen, die zu einem Verlust des plasmaeinschließenden Plasmastroms führen und mit einer hohen Energiefreisetzung einhergehen – können dabei hohe thermische und mechanische Lasten auf Reaktorkomponenten verursachen und zu Schädigungen führen. Dies hätte zusätzliche Wartungszeiten für den Tausch dieser Komponenten zur Folge. Daher wird für ITER ein System installiert, genannt Disruption Mitigation System (DMS), das die Auswirkungen solcher Disruptionen abmildern soll. Sein Funktionsprinzip besteht darin, innerhalb kürzester Zeit Fragmente aus beispielsweise gefrorenem Wasserstoff und Neon in das Plasma einzuschleusen. Dazu werden zylindrische Pellets aus entsprechendem Material zuvor bei Temperaturen von minus 268 Grad Celsius eingefroren und mit Geschwindigkeiten von bis zu 1800 Kilometern pro Stunde auf eine schräg zur Flugrichtung stehende Prallplatte (Shattering Unit) geschossen, an der sie durch die

Wucht des Aufpralls fragmentieren. Die Wirksamkeit des DMS hängt von der optimalen Größen- und Geschwindigkeitsverteilung der Fragmente ab. Daher ist es wichtig zu wissen, wie die Aufprallbedingungen die Fragmentierungseigenschaften beeinflussen. Die ITER-DMS-Taskforce hat hierfür eigens ein Programm zur Charakterisierung und zur experimentellen Untersuchung der Fragmentierung aufgelegt.

Als Teil dieses Programms entwickelt das Fraunhofer EMI im Rahmen eines laufenden Forschungsprojekts numerische Modelle und Computercodes zur Simulation und Analyse des komplexen Fragmentierungsprozesses. Die oben erwähnten Experimente dienen unter anderem der Kalibrierung und Validierung der entwickelten Modelle und Verfahren. Mithilfe der validierten Modelle sollen dann die experimentell ermittelte Datenbasis deutlich erweitert und Vorhersagen für die Fragmentgrößenverteilung bei unterschiedlichen Randbedingungen gemacht werden. Die Ziele hierbei sind eine Optimierung des Designs der Shattering Unit und die Ableitung von Richtlinien für optimierte Aufprallbedingungen, um die gewünschten Fragmentierungseigenschaften zu erhalten. Oder etwas salopp formuliert: Es geht um die Beantwortung der Frage, wie man am geschicktesten das Eis bricht.

Für die Forscherinnen von morgen: Girls' Day 2022 am Fraunhofer EMI

Ein Beitrag von Heide Haasdonk, heide.haasdonk@emi.fraunhofer.de

Nach zwei Jahren coronabedingter Pause durfte das Fraunhofer EMI am 28. April 2022 wieder zum Girls' Day einladen.

Gegenüber: Impressionen vom Girls' Day (von links nach rechts und von oben nach unten): Bremssegel des Nanosatelliten ERNST, Exponat eines Schutzbetons nach Explosion, Lötarbeiten, Schlüsselanhänger als Werkstattsouvenir und Gruppenbild bei guter Laune.

Blick hinter die Kulissen

Ziel des deutschlandweiten Aktionstags Girls' Day, auch Mädchen-Zukunftstag genannt, ist es, Schülerinnen Berufe oder Studienfächer näherzubringen, in denen der Frauenanteil unter 40 Prozent liegt. Dank der regen Beteiligung vieler EMI-Mitarbeitender erwartete acht Besucherinnen aus Freiburg und Umgebung ein vielfältiges und fesselndes Programm. Bereits zum 16. Mal gewährte das EMI einen Blick hinter die Kulissen eines ingenieurwissenschaftlich-technischen Forschungsinstituts.

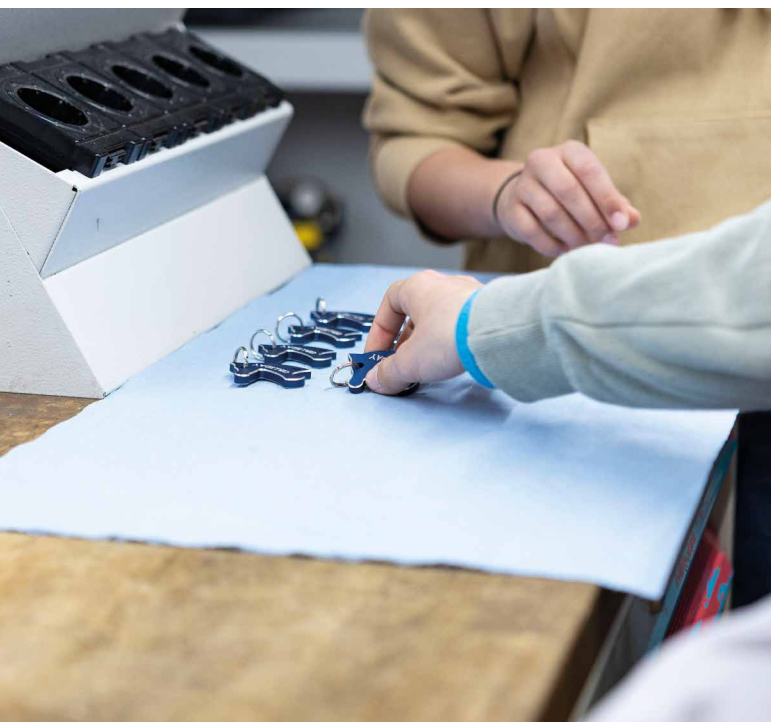
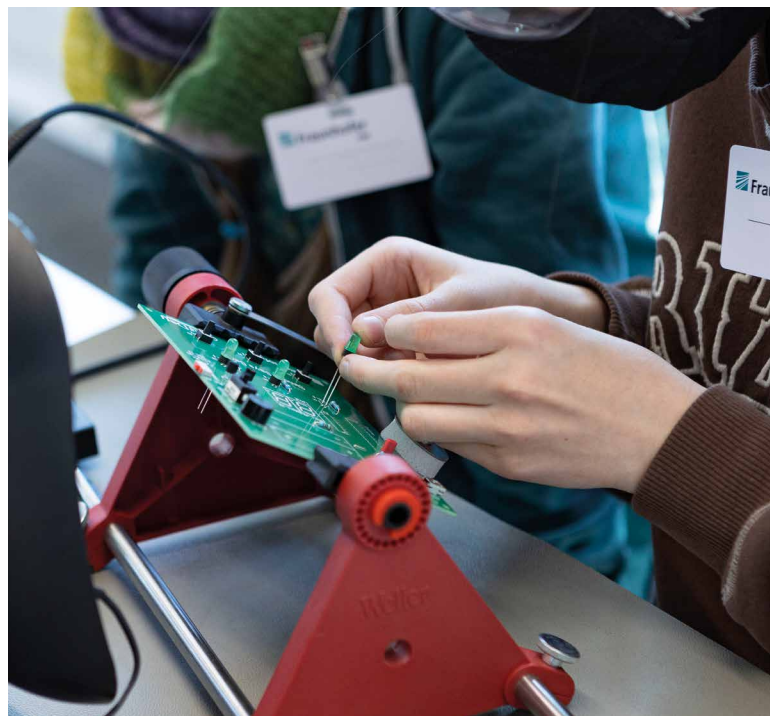
Ein Institut – viele Berufe und Tätigkeiten

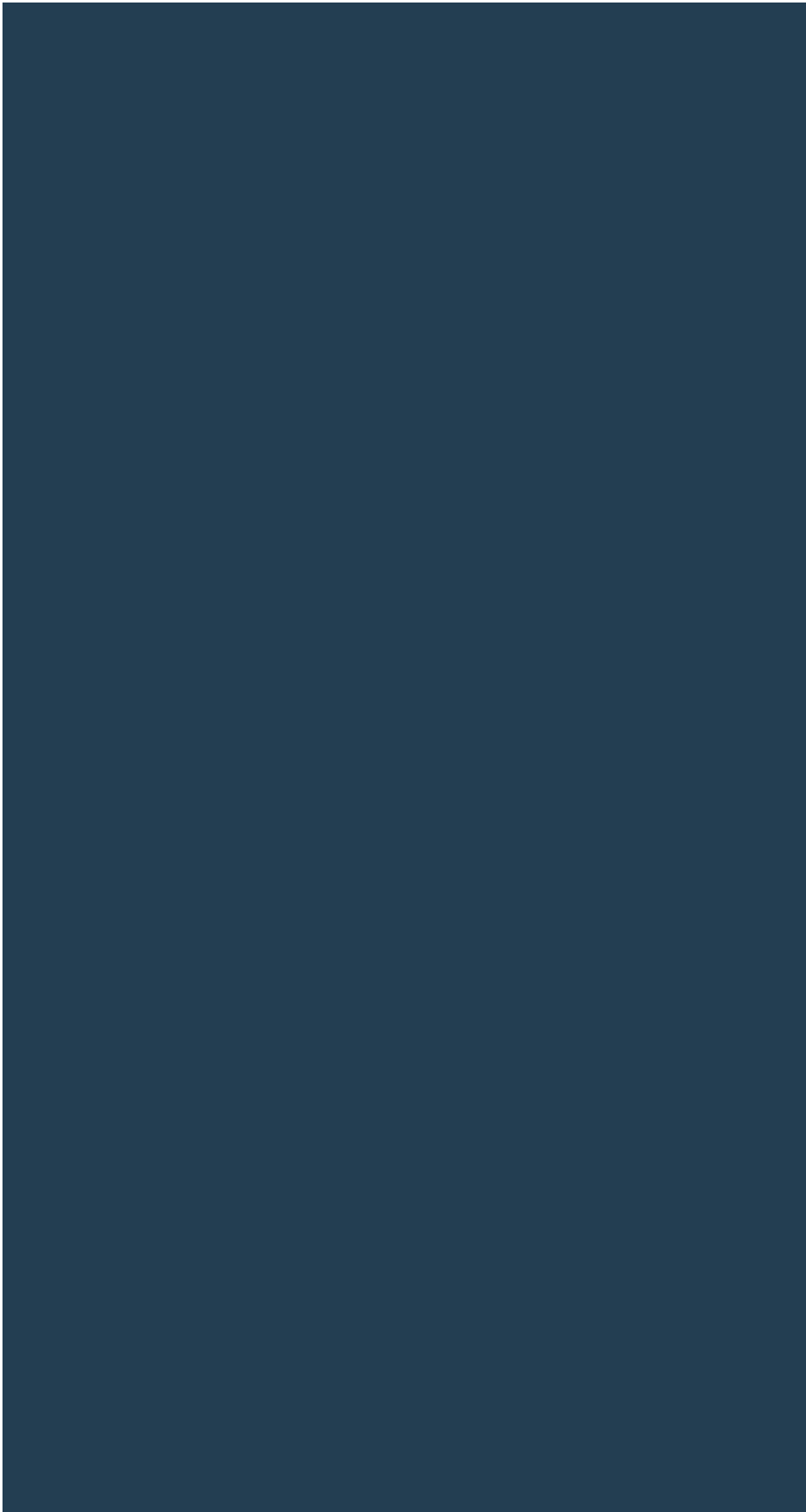
Die Schülerinnen hatten die Möglichkeit, verschiedene Berufe und Tätigkeitsfelder kennenzulernen. Eine Führung durch die Feinmechanische Werkstatt lud in die Welt von Fräsmaschinen und CAD-Programmen ein – samt Informationen aus erster Hand der dortigen Auszubildenden. In einem Beitrag zum Thema »Was macht eigentlich eine Bauingenieurin? Von Forschung bis Industrie, von Spanien nach Deutschland, eine Europa-reise in der Welt des Bauens« zeichneten

Wissenschaftlerinnen Stationen ihres beruflichen Werdegangs nach und ließen den Funken der Begeisterung für ihr Arbeitsfeld auf die Zuhörerinnen überspringen. Mitgebrachte Exponate von Experimenten aus Efringen-Kirchen dienten der eindrucksvollen Veranschaulichung. Der EMI-eigene Satellit ERNST ließ sogar einen gedanklichen Ausflug ins All zu. Für die beiden wissenschaftlichen Hilfskräfte, die dieses Space-Highlight unserem Publikum näherbrachten, bietet ERNST nicht nur den Stoff, aus dem die Träume sind, sondern handfestes Material für ihre jeweiligen Studienarbeiten.

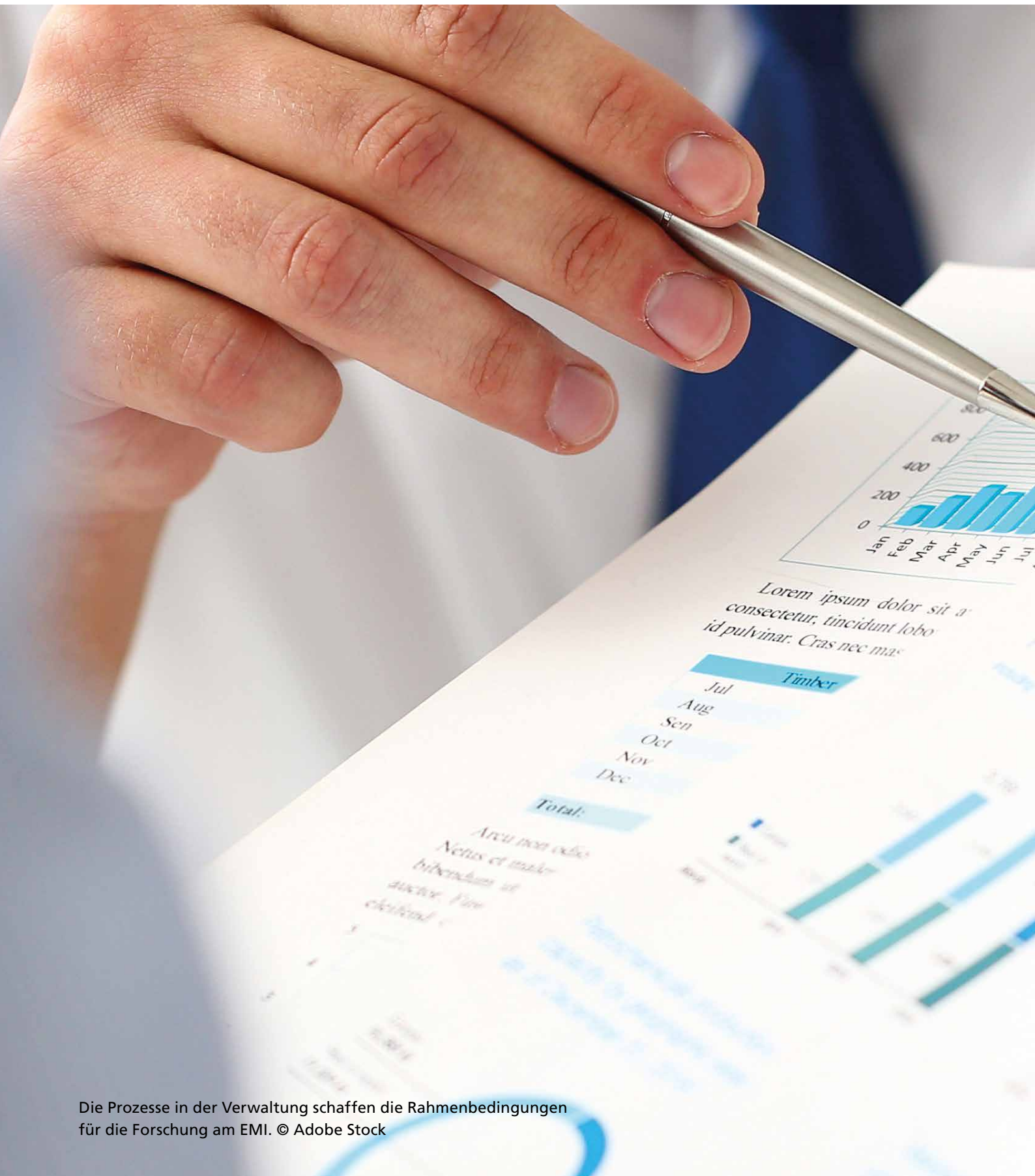
Do it yourself: Lötarbeiten für ein elektronisches Spiel

In einem ausgiebigen Praxisteil ließen die Schülerinnen unter Anleitung unserer Fachkräfte aus dem Elektronik-Labor gekonnt die Lötkolben schwingen und bauten sich jeweils selbst das elektronische Spiel »Simon Says«. Damit nahmen sie neben vielen Eindrücken auch etwas konkret Materielles aus dem EMI mit nach Hause.





Verwaltung



Die Prozesse in der Verwaltung schaffen die Rahmenbedingungen für die Forschung am EMI. © Adobe Stock



Verwaltung

Einleitung	106
Bereich Personal	108
Bereich Finanzen	110

Verwaltung

Der Beginn des Jahres 2023 sieht in mehrererlei Hinsicht unter dem besonderen Zeichen des Neuanfangs.

Seit Dezember 2022 leite ich die Verwaltung. Nach einer Phase unter kommissarischer Führung gilt es nun, sich mit voller Stärke und ungeteilter Aufmerksamkeit den Aufgaben der Abteilung zu widmen, Verbesserungspotenzial zu identifizieren und gegebenenfalls dementsprechend Prozesse zu definieren.

Das EMI hat in den zurückliegenden Jahren der Pandemie – in Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben zu den Maßnahmen des betrieblichen Infektionsschutzes – gute Lösungen gefunden und neue Strukturen und Abläufe etabliert, von denen unsere Mitarbeitenden mit einem neu gewonnenen Selbstverständnis profitieren. Es ist für uns alle möglich, unseren Arbeitsalltag mithilfe digitaler Instrumente und hybrider Zusammenarbeit zu gestalten. Gleichzeitig ist deutlich zu erkennen, dass die Möglichkeit, wieder in Präsenz am Institut zu arbeiten, verstärkt angenommen wird, was dem grundlegenden Bedürfnis nach persönlichen Begegnungen Ausdruck verleiht.

Die Situation auf dem Arbeitsmarkt stellt das Fraunhofer EMI vor Herausforderungen. Trotz des personellen Zuwachses in der Belegschaft, auch im forschungsbezogenen Stammpersonal, ist im Vergleich zum Vorjahr jedoch ein Rückgang bei den Bewerbungen für unsere Auszubildendenberufe und der DHBW-Studierenden zu verzeichnen.

Die Einführung von SAP konfrontiert uns weiterhin mit hohem Arbeits- und Kraftaufwand, besonders für unsere Verwaltungsmitarbeitenden. Viele Prozesse werden fortlaufend weiterentwickelt und angepasst.

Die geplanten Kürzungen im FuT-Haushalt der Bundesregierung werfen am EMI erste Schatten voraus. Unser Blick richtet sich nach vorne, und wir suchen nach geeigneten Möglichkeiten, um diese Entwicklungen zu kompensieren.

Wir bleiben optimistisch und blicken mit Zuversicht auf die kommenden Monate. Ich schätze mich glücklich, dass ich in allen Bereichen der Abteilung auf sehr gut qualifizierte und erfahrene Teams zählen kann, die mit mir bei dieser neuen Herausforderung zusammenarbeiten, um die anstehenden Aufgaben zu bewältigen und gleichzeitig unseren EMI-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern weiterhin einen guten Verwaltungsdienst zu bieten.

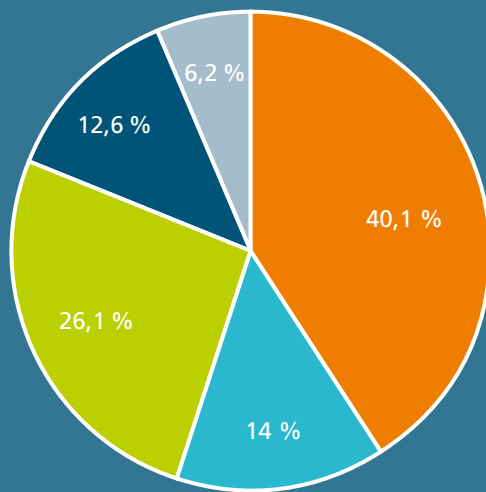


Mit dem New-Work-Konzept haben wir am EMI ein neues Selbstverständnis in der Gestaltung unseres Arbeitsalltags gewonnen. Wir haben mehr Chancen, Familie und Job zu vereinbaren.«

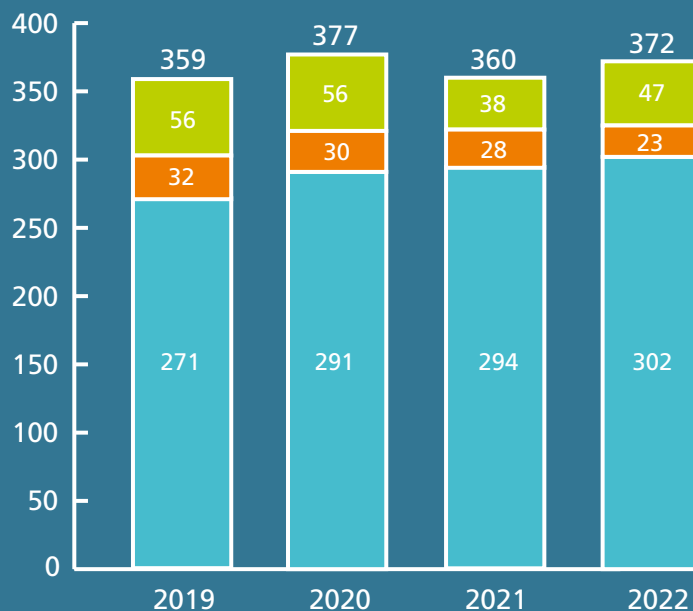
Bibiana Cortés



Bibiana Cortés
Verwaltungsleiterin
bibiana.cortes@emi.fraunhofer.de



- Wissenschaftliche Mitarbeitende in Fachabteilungen
- Nichtwissenschaftliche Mitarbeitende in Fachabteilungen
- Leitung und Infrastruktur
- Wissenschaftliche Hilfskräfte, Praktikantinnen und Praktikanten
- Auszubildende, DHBW-Studierende



- Wissenschaftliche Hilfskräfte, Praktikantinnen und Praktikanten
- Auszubildende, DHBW-Studierende
- Mitarbeitende Stammpersonal

Bereich Personal



Ende 2022 waren am Fraunhofer EMI insgesamt 372 Personen beschäftigt: 302 Mitarbeitende als Stammpersonal, 23 Auszubildende und DHBW-Studierende und 47 wissenschaftliche Hilfskräfte, Praktikantinnen und Praktikanten. Vom Stammpersonal waren 205 Mitarbeitende direkt in der Forschung und 97 Mitarbeitende im Bereich Leitung und Infrastruktur tätig. Der Anteil der weiblichen Beschäftigten des Stammpersonals betrug 24,8 Prozent.

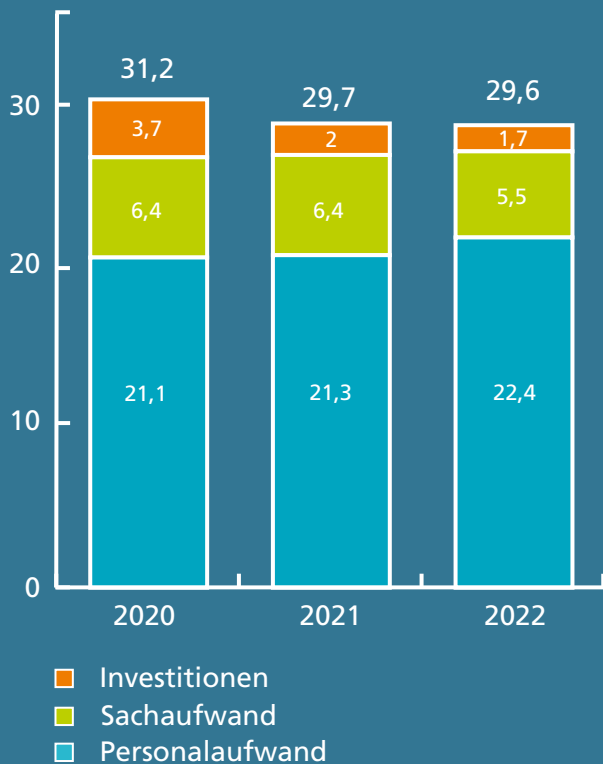
Von den insgesamt 23 Auszubildenden waren 15 in den Bereichen Feinwerkmechanik, Elektronik und Mediengestaltung tätig. 8 Mitarbeitende wurden zum Zweck ihrer Berufsausbildung oder im Rahmen ihres Studiums an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg am Fraunhofer EMI beschäftigt.

Bereich Finanzen

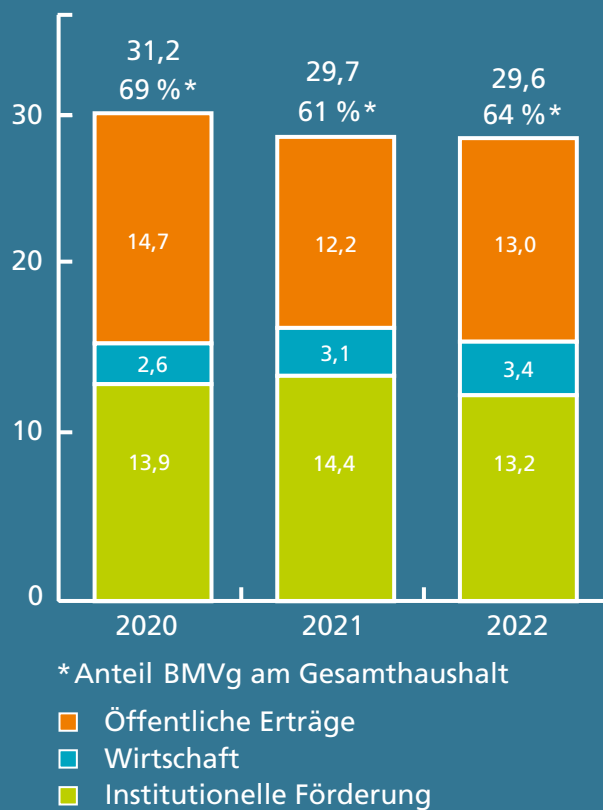


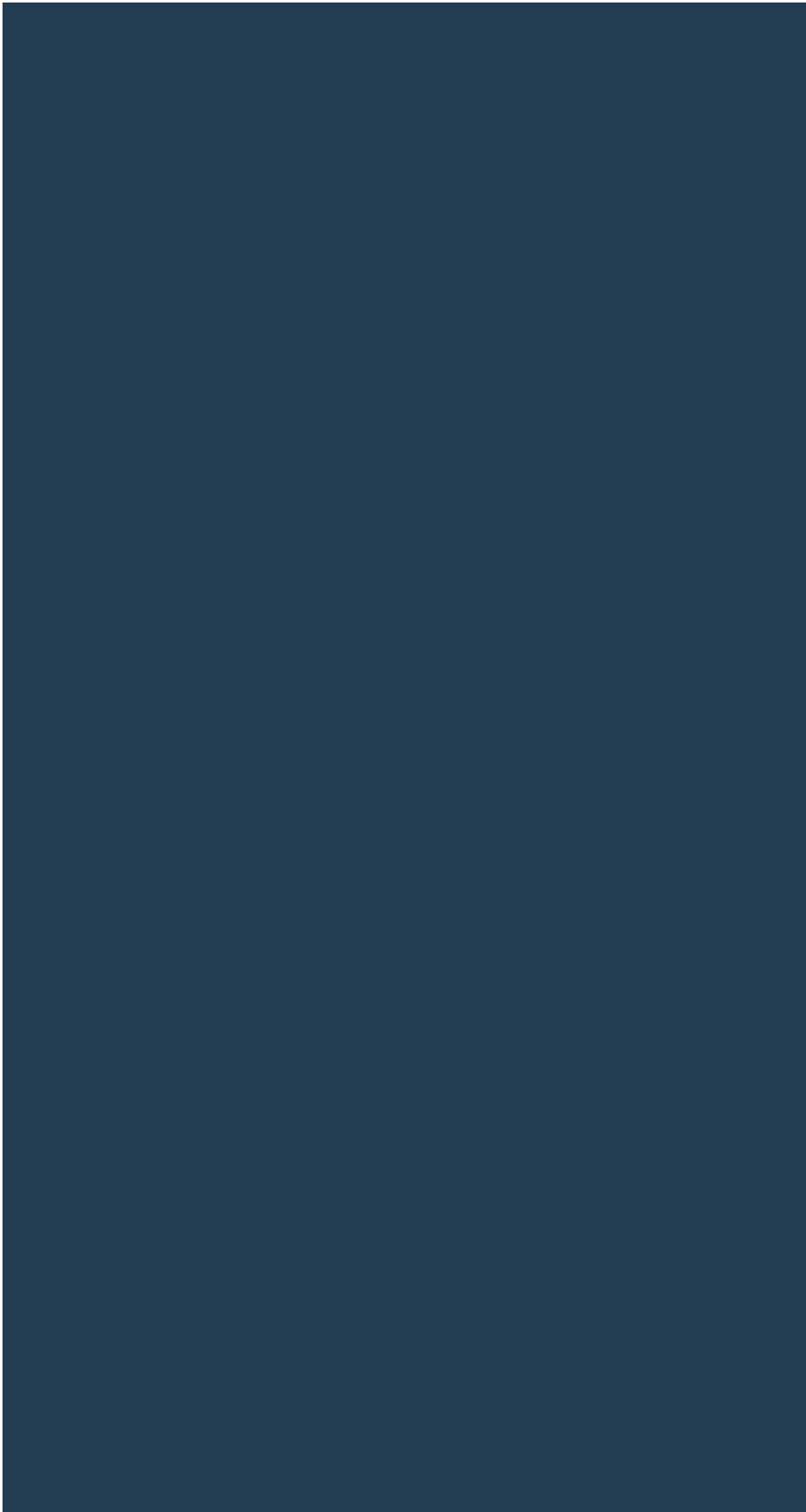
Der Gesamthaushalt des Fraunhofer EMI ist im Jahr 2022 mit circa 30 Millionen Euro etwa gleich wie im Vorjahr. Gewachsen ist der Betriebshaushalt mit 27,9 Millionen Euro (Personal- und Sachaufwendungen), während die laufenden Investitionen mit circa 1,7 Millionen Euro um 17 Prozent niedriger ausfielen. Hier spielt eine wichtige Rolle, dass es aufgrund der Pandemie bei fast allen Investitionsprojekten zu massiven Verzögerungen kam. Der Haushalt wird finanziert durch externe Erträge aus Industrie und öffentlicher Hand sowie durch die institutionelle Förderung (Grundfinanzierung) durch das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Mit 16,4 Millionen Euro externer Erträge im Jahr 2022 wurde im Vergleich zum Vorjahr ein besserer Wert erreicht (15,3 Millionen Euro im Jahr 2021), insbesondere sind die Aufträge von Industriekunden von 3,1 Millionen Euro (2021) auf jetzt 3,4 Millionen Euro (2022) sowie durch den Bund finanzierte Forschungsprojekte von 9,5 Millionen Euro (2021) auf 10,6 Millionen Euro (2022) angewachsen. EU-Erträge sind im Vergleich zum Vorjahr von 1,2 Millionen Euro (2021) auf 0,9 Millionen Euro (2022) gesunken. Der größte Teil des Betriebs- und des Investitionshaushalts wurde auch 2022 vom BMVg und nachgeordneten Dienststellen mit einem Anteil von 64 Prozent finanziert (2021: 61 Prozent).

Finanzierung Gesamthaushalt in Millionen Euro



Gesamthaushalt in Millionen Euro





Das Institut im Profil



Ansprechpersonen



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

Telefon 0761 2714-101
stefan.hiermaier@emi.fraunhofer.de



Stellvertretender Institutsleiter
Geschäftsfeldleiter Verteidigung
Dr. Matthias Wickert

Telefon 0761 2714-120
matthias.wickert@emi.fraunhofer.de



Geschäftsfeldleiter Luftfahrt
Dr. Michael May

Telefon 0761 2714-337
michael.may@emi.fraunhofer.de



Verwaltungsleiterin
Bibiana Cortés

Telefon 0761 2714-115
bibiana.cortes@emi.fraunhofer.de



Stellvertretender Institutsleiter
Geschäftsfeldleiter Raumfahrt
Prof. Dr. Frank Schäfer

Telefon 0761 2714-421
frank.schaefer@emi.fraunhofer.de



Geschäftsfeldleiter Sicherheit
und Resilienz
Geschäftsführer Fraunhofer SIRIOS
Daniel Hiller

Telefon 0761 2714-488
daniel.hiller@emi.fraunhofer.de



Geschäftsfeldleiter Automotive
Dr. Jens Fritsch

Telefon 0761 2714-472
jens.fritsch@emi.fraunhofer.de



Wissenschaftlicher Referent
des Institutsleiters
Leiter der Geschäftsstelle des
Leistungszentrums Nachhaltigkeit
Dr. Juri Lienert

Telefon 0761 2714-100
juri.lienert@emi.fraunhofer.de



Abteilungsleiterin Infrastruktur
Diana Zeitler

Telefon 0761 2714-370
diana.zeitler@emi.fraunhofer.de



Abteilungsleiter Rechenzentrum
Stephan Engemann

Telefon 0761 2714-380
stephan.engemann@emi.fraunhofer.de



Abteilungsleiterin Kommunikation
Birgit Bindnagel

Telefon 0761 2714-366
birgit.bindnagel@emi.fraunhofer.de



Kuratorium

Die Kuratorien der einzelnen Fraunhofer-Institute stehen der Institutsleitung beratend zur Seite. Das Kuratorium 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 Sicherheits-
forschung, Bundesministerium für Bildung
und 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 Meinel
Direktor Deutsch-Französisches Forschungs-
institut Saint-Louis ISL, Binzen

Michael Schätzle
Geschäftsleitung Baureihe Cayenne,
Porsche AG, Weissach

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

Dr. Tobias Schmidt
Abteilungsleiter Systementwicklung Groß-
kaliber, 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

Rechts: die Fraunhofer-Zentrale in München.

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie 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 mit an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft.

Interdisziplinäre Forschungsteams der Fraunhofer-Gesellschaft setzen gemeinsam mit Vertragspartnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand originäre Ideen in Innovationen um, koordinieren und realisieren systemrelevante, forschungspolitische Schlüsselprojekte und stärken mit werteorientierter Wertschöpfung die deutsche und europäische Wirtschaft. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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.

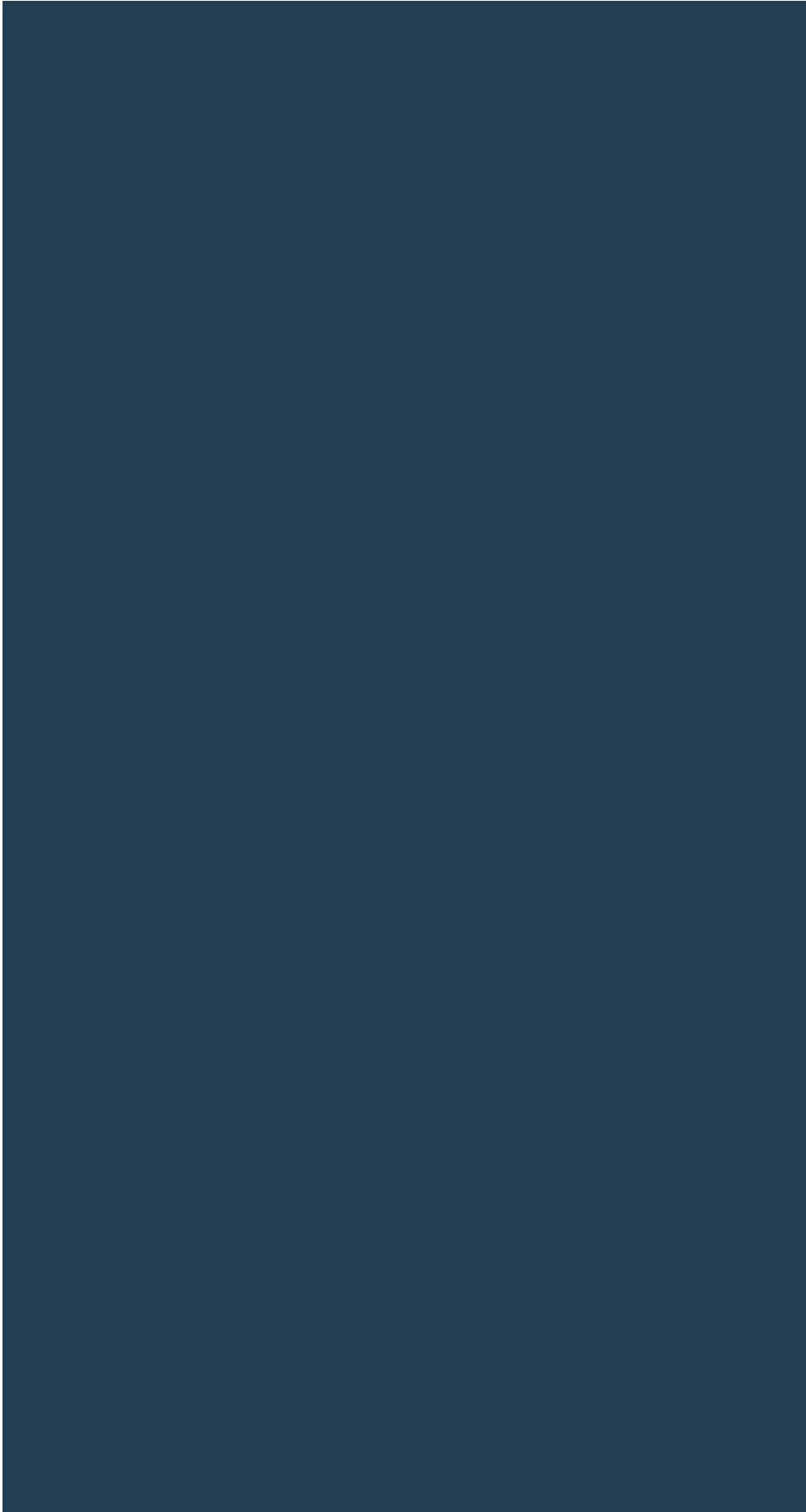
Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen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

Hochmotivierte Mitarbeitende auf dem Stand der aktuellen Spitzenforschung stellen für uns als Wissenschaftsorganisation den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Fraunhofer bietet daher die Möglichkeit zum selbstständigen, gestaltenden und zugleich zielorientierten Arbeiten und somit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung, die zu anspruchsvollen Positionen in den Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft befähigt. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und des frühzeitigen Kontakts mit Auftraggebern hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

Weitere Informationen finden Sie unter www.fraunhofer.de





Publikationen,
wissenschaftlicher
Austausch, Vorträge
2022/2023

Publikationen

Veröffentlichungen in Monografien, Fachzeitschriften und Proceedings mit Peer Review

- Bauer, S.; Butz, I.; Strassburger, E.; Sauer, M.; Hiermaier, S. (2022): Quantification of crack volumes in dynamically damaged soda-lime glass. In: *Glass Structures & Engineering* 35 (6), S. 1376. DOI: 10.1007/s40940-022-00190-0.
- Becker, M.; Kuball, A.; Ghavini, A.; Adam, B.; Busch, R.; Gallino, I.; Balle, F. (2022): Solid state joining of a cold rolled Zr-based bulk metallic glass to a wrought aluminum alloy by power ultrasonics. In: *Materials* 15 (21). DOI: 10.3390/ma15217673.
- 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: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 406 (3), S. 115894. DOI: 10.1016/j.cma.2023.115894.
- Bonneau, M.-H.; Petersen, L.; Havarneanu, G.; Crabbe, S. (2022): Protecting railway and metro infrastructure against combined cyber-physical attacks. In: *Proceedings of the World Congress on Railway Research, WCRR 2022*.
- Bulla, M.; Schmandt, C.; Kolling, S.; Kisters, T.; Sahraei, E. (2023): An experimental and numerical study on charged 21700 lithium-ion battery cells under dynamic and high mechanical loads. In: *Energies* 16 (1), S. 211. DOI: 10.3390/en16010211.
- Crabbe, S.; Roß, K.; Köpke, C.; Faist, K.; Villamor Medina, E.; Siebold, U. et al. (2022): SAFETY4RAILS information system platform demonstration at Madrid Metro simulation exercise. In: *Proceedings of the 32nd European Security and Reliability Conference (ESREL 2022)*. Singapore: Research Publishing Services, S. 2151–2158.
- D'haen, J.; May, M.; Boegle, C.; Hiermaier, S. (2022): Damage evolution analysis on compression-loaded multidirectional carbon fiber laminates using ex-situ CT scans. In: *Journal of Composites Science* 6 (2), S. 63. DOI: 10.3390/jcs6020063.
- Fischer, F.; Plappert, D.; Ganzenmüller, G.; Langkemper, R.; Heusinger-Hess, V.; Hiermaier, S. (2023): A feasibility study of in-situ damage visualization in basalt-fiber reinforced polymers with open-source digital volume correlation. In: *Materials* 16 (2). DOI: 10.3390/ma16020523.
- Fischer, G.; Bordoy, J.; Schott, D.; Xiong, W.; Gabbrielli, A.; Höflinger, F. et al. (2022): Multimodal indoor localization: fusion possibilities of ultrasonic and bluetooth low-energy data. In: *IEEE Sensors Journal* 22 (6), S. 5857–5868. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3148529.
- Fischer, K.; Ramin, M. von; Rosin, J.; Stolz, A.: *Baulicher Schutz als Teil resilienzsteigernder Maßnahmen vor terroristischen Anschlägen*. In: *Terrorismusforschung. Interdisziplinäres Handbuch für Wissenschaft und Praxis*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos (3), S. 641–656.
- Fischer, K.; van der Woerd, J.; Harwick, W.; Stolz, A. (3): Dynamic bearing capacity of point fixed corrugated metal profile sheets subjected to blast loading. In: *International Journal of Protective Structures* 13, S. 1–22. DOI: 10.1177/20414196211059.
- Gabbrielli, A.; Bordoy, J.; Xiong, W.; Fischer, G.; Schaechtle, T.; Wendeberg, J. et al. (2023): RAILS: 3-D real-time angle of arrival ultrasonic indoor localization system. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 72, S. 1–15. DOI: 10.1109/TIM.2022.3222485.
- Ganzenmüller, G. (Hg.) (2022): *Dynamic behaviour of additively manufactured structures & materials : DYMAT 2022, 26th Technical Meeting Conference Proceedings*. Unter Mitarbeit von Institut für Nachhaltige Technische Systeme, Department of Sustainable Systems Engineering und INATECH. Freiburg, 11.–14.9.2022: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Gutmann, F.; Stilz, M.; Patil, S.; Fischer, F.; Hoschke, K.; Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (2023): Miniaturization of non-assembly metallic pin-joints by LPBF-based additive manufacturing as perfect pivots for pantographic metamaterials. In: *Materials* 16 (5), S. 1797. DOI: 10.3390/ma16051797.

- Hahn, P.; Channammagari, H.; Imbert, M.; May, M. (2022): High-rate mode II fracture toughness testing of polymer matrix composites using the Transverse Crack Tension (TCT) test. In: *Composites Part B: Engineering* 233 (10–11), S. 109636. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109636.
- Häring, I.; Lüttner, F.; Frorath, A.; Fehling-Kaschek, M.; Ross, K.; Schamm, T. et al. (2021): Framework for safety assessment of autonomous driving functions up to SAE level 5 by self-learning iteratively improving control loops between development, safety and field life cycle phases. In: 2021 IEEE 17th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP): IEEE, S. 33–40.
- Häring, I.; Satsrisakul, Y.; Finger, J.; Vogelbacher, G.; Köpke, C.; Höflinger, F.; Gelhausen, P. (2022): Advanced markov modeling and simulation for safety analysis of autonomous driving functions up to SAE 5 for development, approval and main inspection. In: *Proceedings of the 32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2022)*. Dublin, 28.8.–1.9.2022.
- Häring, I.; Sudheendran, V.; Sankin, R.; Hiermaier, S. (2022): Joint functional safety ISO 26262 and cybersecurity STRIDE/HEAVENS assessment by developers within MBSE SPES framework using extended SysML diagrams and minor automations. In: *Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 2022*, 16th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 2022. Honolulu, 26.6.–1.7.2022.
- Herschel, R.; Wallrath, P.; Hofstätter, M.; Taupe, P.; Krüger, E.; Philippi, M. et al. (2022): UAV-borne remote sensing for AI-assisted support of search and rescue missions. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*.
- Huschka, M.; Hoschke, K.; Dlugosch, M.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Klotz, U. et al. (2022): Leichtbau: Datenvernetzung für additive Fertigung. In: *wt Werkstatttechnik online* (6), S. 372. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/fachmedien/wt-werkstattstechnik/fraunhofer-gesellschaft/leichtbau-datenvernetzung-fuer-additive-fertigung/>.
- Imbert, M.; Hahn, P.; Jung, M.; Balle, F.; May, M. (2022): Mechanical laminae separation at room temperature as a high-quality recycling process for laminated composites. In: *Materials Letters* 306, S. 130964. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130964.
- Ivanov, R.; Evans, D.; Smuk, S.; Rihtnesberg, D.; Höglund, L.; Gulde, M. et al. (2022): QWIP as versatile platform for advanced detection in LWIR. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Volume 12107*, Art. No. 121071T. DOI: 10.1117/12.2618756.
- Jakkula, P.; Cohen, A.; Lukić, B.; Levi-Hevroni, D.; Rack, A.; Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (2022): Split Hopkinson Tension Bar and universal testing machine for high-speed X-ray imaging of materials under tension. In: *Instruments* 6 (3), S. 38. DOI: 10.3390/instruments6030038.
- Jakkula, P.; Ganzenmüller, G.; Beisel, S.; Rüttnick, P.; Hiermaier, S. (2022): The Symmpact: A direct-impact Hopkinson Bar setup suitable for investigating dynamic equilibrium in low-impedance materials. In: *Experimental Mechanics* 62 (2), S. 213–222. DOI: 10.1007/s11340-021-00785-8.
- Jenerowicz, M.; Haase, T.; Linnenberg, M.; Hoschke, K.; Boljen, M.; Hiermaier, S. (2022): Comparison of rib bone surrogates from additive manufacturing, cast material and PMHS data under dynamic loading. In: *Proceedings of the IRCOBI Conference 2022*. IRCOBI. Porto, 14.–16.9.2022.
- Kappe, K.; Bihler, M.; Morawietz, K.; Hügenell, P. P. C.; Pfaff, A.; Hoschke, K. (2022): Design concepts and performance characterization of heat pipe wick structures by LPBF additive manufacturing. In: *Materials* 15 (24). DOI: 10.3390/ma15248930.
- Kappe, K.; Wahl, J. P.; Gutmann, F.; Boyadzhieva, S. M.; Hoschke, K.; Fischer, S. C. L. (2022): Design and manufacturing of a metal-based mechanical metamaterial with tunable damping properties. In: *Materials* 15 (16). DOI: 10.3390/ma15165644.
- 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* 41 (3), S. 667. DOI: 10.1007/s10669-022-09893-9.

Köpke, C.; Srivastava, K.; Miller, N.; Branchini, E. (2022): Resilience quantification for critical infrastructure: exemplified for airport operations. In: S. K. Katsikas, C. Lambrinouidakis, N. Cuppens-Boulahia, J. P. Mylopoulos, C. Kalloniatis und W. Meng (Hg.): *Computer Security. ESORICS 2021 International Workshops : CyberICPS, SECPRE, ADIoT, SPOSE, CPS4CIP, and CDT&SECOMANE*, Darmstadt, Germany, October 4–8, 2021, revised selected papers, Bd. 13106. Cham: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 13106), S. 451–460.

Köpke, C.; Walter, J.; Cazzato, E.; Linguraru, C.; Siebold, U.; Stolz, A.: Methodology for resilience assessment for rail infrastructure considering cyber-physical threats. In: *Computer Security. ESORICS 2022 International Workshops. ESORICS 2022. Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 13785, S. 346–361.

Langkemper, R.; Moser, S.; Büttner, M.; Rakus, D.; Sättler, A.; Nau, S. (2022): A priori information based time-resolved 3D analysis of the trajectory and spatial orientation of fast-moving objects using high-speed flash X-ray imaging. In: *Journal of imaging* 8 (2). DOI: 10.3390/jimaging8020028.

Matt, P.; Jenerowicz, M.; Schweiger, T.; Heisch, F.; Lienhard, J.; Boljen, M. (2022): Investigation of e-scooter drivers colliding with kerbs – a parametric numerical study. In: *Proceedings of the IRCOBI Conference 2022. IRCOBI. Porto, 14.9.–16.9.2022.*

May, M.; Hahn, P.; Manam, B. U.; Imbert, M. (2022): Mixed-mode I/II testing of composite materials – A refined data reduction scheme for the wedge-loaded asymmetric double cantilever beam test. In: *Journal of Composites Science* 6 (10), S. 319. DOI: 10.3390/jcs6100319.

May, M.; Jung, M.; Pfaff, J.; Schopferer, S.; Schaufelberger, B.; Matura, P.; Imbert, M. (2022): Vulnerability of aerostructures to drone impact – characterization of critical drone components. In: *AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA SciTech Forum 2022. San Diego, USA, 3.–7.1.2022.*

May, M.; Kilchert, S. (2022): The effect of loading rate on the in-plane shear strength of tri-axial braided composites. In: *Journal of Composite Materials* 56 (3). DOI: 10.1177/0021998321104768.

Nowok, S.; Wallrath, P.; Herschel, R.; Langkemper, R. (2022): Radar-based detection of hidden people at different frequency bands. In: *51st European Microwave Conference (EuMC)*. London: IEEE, S. 773–776.

Okafor, C. E.; Kebodi, L. C.; Kandasamy, J.; May, M.; Ekengwu, I. E. (2022): Properties and performance index of natural fiber reinforced cross-ply composites made from *Dioscorea alata* stem fibers. In: *Composites Part C: Open Access* 7 (4), S. 100213. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100213.

Oliveira, P. R.; Kilchert, S.; May, M.; Panzera, T. H.; Scarpa, F.; Hiermaier, S. (2022): Environmental assessment of discarded plastic caps as a honeycomb core: An ecomechanical perspective. In: *Journal of Industrial Ecology* 26 (2), S. 643–654. DOI: 10.1111/jiec.13211.

Oliveira, P. R.; Kilchert, S.; May, M.; Panzera, T. H.; Scarpa, F.; Hiermaier, S. (2022): Numerical and experimental investigations on sandwich panels made with eco-friendly components under low-velocity impact. In: *Journal of Sandwich Structures & Materials* 24 (1). DOI: 10.1177/109963622110204.

Oliveira, P. R.; May, M.; Panzera, T. H.; Hiermaier, S. (2022): Bio-based/green sandwich structures: A review. In: *Thin-Walled Structures* 177, S. 109426. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109426.

Oliveira, P. R.; May, M.; Panzera, T. H.; Hiermaier, S. (2022): Bio-based/green sandwich structures: A review. In: *Thin-Walled Structures* 177 (12), S. 109426. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109426.

Padmanabha, V.; Schäfer, F.; Rae, A. S. P.; Kenkmann, T. (2023): Dynamic split tensile strength of basalt, granite, marble and sandstone: strain rate dependency and fragmentation. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 56 (1), S. 109–128. DOI: 10.1007/s00603-022-03075-4.

- Peltoniemi, J. I.; Zubko, N.; Virkki, A. K.; Gritsevich, M.; Moilanen, J.; Roulet, J.-C. et al. (2022): Light scattering model for small space debris particles. In: *Advances in Space Research*. DOI: 10.1016/j.asr.2022.09.022.
- Pfaff, J.; Fransson, M.; Broche, L.; Buckwell, M.; Finegan, D. P.; Moser, S. et al. (2023): In situ chamber for studying battery failure using high-speed synchrotron radiography. In: *Journal of synchrotron radiation* 30 (Pt 1), S. 192–199. DOI: 10.1107/S1600577522010244.
- Pham, A. T.; Brenneis, C.; Roller, C.; Tan, K. H. (2022): Blast-induced dynamic responses of reinforced concrete structures under progressive collapse. In: *Magazine of Concrete Research* 28 (4), S. 1–14. DOI: 10.1680/jmacr.21.00115.
- Plech, A.; Ziefuß, A. R.; Levantino, M.; Streubel, R.; Reich, S.; Reichenberger, S. (2022): Low efficiency of laser heating of gold particles at the plasmon resonance: an X-ray calorimetry study. In: *ACS Photonics* 9 (9), S. 2981–2990. DOI: 10.1021/acsp Photonics.2c00588.
- Pour, M.; Algergawy, A.; Buche, P.; Castro, L.; Chen, J.; Dong, H. et al. (2022): Results of the ontology alignment evaluation initiative 2022. In: *CEUR Workshop Proceedings 17th International Workshop on Ontology Matching, OM 2022*, 23.10.2022, S. 84–128.
- Premanand, A.; Balle, F. (2022): Development of an axial loading system for fatigue testing of textile-composites at ultrasonic frequencies. In: *Materials Letters: X* 13 (8), S. 100131. DOI: 10.1016/j.mblux.2022.100131.
- Reich, S.; Göbel, A.; Goesmann, M.; Heunoske, D.; Schäffer, S.; Lück, M. et al. (2022): 2D and 3D triangulation are suitable in situ measurement tools for high-power large spot laser penetration processes to visualize depressions and protrusions before perforating. In: *Materials* 15 (11). DOI: 10.3390/ma15113743.
- Reich, S.; Klügl, Y.; Ziefuss, A.; Streubel, R.; Göttlicher, J.; Plech, A. (2022): Speciation in nanosecond laser ablation of zinc in water. In: *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 65 (7), S. 1493. DOI: 10.1007/s11433-021-1857-1.
- 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, Art. No. 104465. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104465.
- Roller, C.; Ramin, M. von; Stolz, A. (2022): Pre-stressed reinforced concrete elements under blast loading: numerical analysis and shock tube testing. In: *WIT Transactions on the Build Environment* 209, S. 167–175. DOI: 10.2495/HPSU220151.
- Roth, A.; Ganzenmüller, G.; Gutmann, F.; Jakkula, P.; Hild, F.; Pfaff, A. et al. (2022): 2D numerical simulation of auxetic metamaterials based on force and deformation consistency. In: *Materials* 15 (13), Artikel Art. No. 4490. DOI: 10.3390/ma15134490.
- Ruiz-Ripoll, M. L.; Rey de Pedraza, V.; Roller, C. (2022): Influence of the projectile shape on the dynamic tensile characterization of concrete using a Split Hopkinson Bar. In: *WIT Transactions on the Build Environment* 209, S. 155–166. DOI: 10.2495/HPSU220141.
- Rüthnick, P.; Ledford, N.; Imbert, M.; May, M. (2022): Mechanical behavior of multi-material single-lap joints under high rates of loading using a Split Hopkinson Tension Bar. In: *Metals* 12 (7), S. 1082. DOI: 10.3390/met12071082.
- Sauer, C.; Bagusat, F.; Ruiz-Ripoll, M.-L.; Roller, C.; Sauer, M.; Heine, A.; Riedel, W. (2022): Hugoniot data and equation of state parameters for an ultra-high performance concrete. In: *Journal of Dynamic Behavior of Materials* 8 (1), S. 2–19. DOI: 10.1007/s40870-021-00315-6.
- Schaechtle, T.; Kar, B.; Fischer, G. K. J.; Gabbrielli, A.; Höflinger, F.; Wallrabe, U.; Rupitsch, S. J.: Acoustically coupled passive wireless sensor system with mechanical resonant sensor. In: *2022 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, S. 39–43.
- Schäffer, S.; Allofs D.; Gruhn, P.; Gülhan, A.; Lück, M.; Osterholz, J. (2022): Experimental investigation of high-power laser irradiation of missile materials in subsonic and supersonic

flows. In: Proceedings of SPIE 12273, High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures. SPIE Security + Defence. Berlin.

Signetti, S.; Heine, A. (2022): Transition regime between high-velocity and hypervelocity impact and related energy partition in metals: state-of-the-art review, characterization and modeling. In: Proceedings of the 16th Hypervelocity Impact Symposium. Alexandria, Virginia, USA, 18.–22.9.2022.

Signetti, S.; Heine, A. (2022): Transition regime between high-velocity and hypervelocity impact in metals – A review of the relevant phenomena for material modeling in ballistic impact studies. In: International Journal of Impact Engineering 167, S. 104213. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104213.

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 studies’ [Int J Impact Eng 167 (2022) 104213]. 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, S. 5077. DOI: 10.1007/s40870-022-00362-7.

Soot, T.; Dlugosch, M. Fritsch, J.; Ichinose, N.; Hiermaier, S.; Duddeck, F. (2022): ‘Grey-Box-Processing’: a novel validation method for use in vehicle safety applications. In: Engineering with Computers. DOI: 10.1007/s00366-022-01622-9.

Srivastava, K.; Köpke, C.; Walter, J.; Faist, K.; Berry, J.; Porretti, C.; Stolz, A. (2022): Modelling and simulation of railway networks for resilience analysis. In: S. K. Katsikas, C. Lambri-noudakis, N. Cuppens-Bouahia, J. P. Mylopoulos, C. Kallo-niatis und W. Meng (Hg.): Computer Security. ESORICS 2021 International Workshops : CyberICPS, SECPRE, ADIoT, SPOSE, CPS4CIP, and CDT&SECOMANE, Darmstadt, Germany, October 4–8, 2021, revised selected papers, Bd. 13785. Cham: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 13106), S. 308–320.

Stilz, M.; dell’Isola, F.; Giorgio, I.; Eremeyev, V. A.; Ganzemüller, G.; Hiermaier, S. (2022): Continuum models for pantographic blocks with second gradient energies which are incomplete. In: Mechanics Research Communications 125 (3), S. 103988. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2022.103988.

Stilz, M.; Plappert, D.; Gutmann, F.; Hiermaier, S. (2022): A 3D extension of pantographic geometries to obtain metamaterial with semi-auxetic properties. In: Mathematics and Mechanics of Solids 27 (4), S. 673–686. DOI: 10.1177/10812865211033322.

Tu, H.; Fung, T. C.; Tan, K. H.; Riedel, W. (2022): An analytical model to predict spalling and breaching of concrete plates under contact detonation. In: International Journal of Impact Engineering 160, S. 104075.

Valmalle, M.; Vintache, A.; Smaniotto, B.; Gutmann, F.; Spagnuolo, M.; Ciallella, A.; Hild, F. (2022): Local–global DVC analyses confirm theoretical predictions for deformation and damage onset in torsion of pantographic metamaterial. In: Mechanics of Materials 172, S. 104379. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104379.

Watson, E.; Sandoval Murillo, J.-L.; Büttner, M.; Matura, P.; Schimmerohn, M. (2022): Simulating hypervelocity impact with a discrete element approach. In: Acta Astronautica 199 (9), S. 425–435. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.07.044.

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.

Zakharova, M.; Mikhaylov, A.; Reich, S.; Plech, A.; Kunka, D. (2022): Bulk morphology of porous materials at submicrometer scale studied by dark-field X-ray imaging with Hartmann masks. In: Physical Review B 106 (14). DOI: 10.1103/PhysRevB.106.144204.

Zalitis, I.; Dolgicers, A.; Zemite, L.; Ganter, S.; Kopustinskas, V.; Vamanu, B. et al. (2022): Mitigation of the impact of

disturbances in gas transmission systems. In: International Journal of Critical Infrastructure Protection 39, S. 100569. DOI: 10.1016/j.ijcip.2022.100569.

Ziesche, S.; Goldberg, A.; Kappert, H.; Schopferer, S. (2022): Mehrlagenkeramische Sensorlösungen für die turbinennahe Druck- und Temperaturbestimmung. In: Sensoren und Messsysteme – 21. ITG/GMA-Fachtagung. 21. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme – 21st ITG/GMA Conference on Sensors and Measuring Systems. Nürnberg, 10.–11.5.2022, S. 122–123.

Veröffentlichungen in Monografien, Fachzeitschriften und Proceedings ohne Peer Review

Becker, M.; Imbert, M.; May, M. (2022): 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. Greece.

Busch, S.; Koss, P.; Horch, C.; Schäfer, K.; Schimmerohn, M.; Schäfer, F.; Kühnemann, F. (2022): Magnetic cleanliness verification of miniature satellites for high precision pointing. In: Proceedings of the 73rd IAC International Astronautical Congress. Paris, 18.–22.9.2022.

Fischer, K.; Mitschke, A.; Klapproth, O.; Schirrmann, A.; Stolz, A. (2022): Resilience assessment of industrial processes within the aircraft industry. In: 13th Complex Systems Design & Management (CSD&M) Conference. Paris.

Fischer, K.; Ramin, M. von; Rosin, J.; Stolz, A. (2022): Baulicher Schutz als Teil resilienzsteigernder Maßnahmen vor terroristischen Anschlägen. In: L. Rothenberger, J. Krause, J. Jost und K. Frankenthal (Hg.): Terrorismusforschung. Interdisziplinäres Handbuch für Wissenschaft und Praxis. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos (Nomos eLibrary Politikwissenschaft, Band 3), S. 641–656.

Heimbs, S.; May, M.; Woidt, M.; Hansen, J.; Jung, M.; Pfaff, J.; Calomfirescu, M. (2022): Physics-based drone impact analysis of composite aerostructures. In: Proceedings of the 2nd 2022 European Conference on Crashworthiness of Composite Structures. Toulouse, 14.–16.11.2022.

Hoschke, K.; Kilchert, S.; Kim, J.; Kappe, K.; Patil, S.; Pfaff, A.; May, M. (2022): Sustainability-oriented topology optimization of aircraft components and best practices in LPBF-based metal additive manufacturing. In: Towards Sustainable Aviation Summit TSAS 2022.

Hoschke, K.; Patil, S.; Dellith, T.; Kappe, K.; Riedel, W. (2022): Multimodal topology optimization for design exploration and solving nonlinear stiffness-strength-based design problems. In: NAFEMS Seminar Generative Design und Optimierung. Wiesbaden.

Huschka, M.; Dlugosch, M.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Hoschke, K.; Klotz, U. et al. (2022): The »AluTrace« use case: harnessing lightweight design potentials via the materials data space. In: TRUSTS – Trusted Secure Data Sharing Space Workshop: Data Spaces & Semantic Interoperability. Wien, 3.6.2022. Online verfügbar unter <https://www.trusts-data.eu/wp-content/uploads/2022/06/01-The-AluTrace-Use-Case-Harnessing-Lightweight-Design-Potentials-via-the-Materials-Data-Space.pdf>.

Huschka, M.; Hoschke, K. (2022): Leichtbau: Datenvernetzung für additive Fertigung. In: wt Werkstatttechnik online (7).

Imbert, M.; Hohe, J.: Peeling-basiertes Recycling. In: CU Reports German Edition 01/2022, S. 31.

Jäcklein, M. (2022): Werkstoffdesign für ballistische Anwendungen am Beispiel von 3D-gedrucktem Wolfram-Komposit. In: Wehrwissenschaftliche Forschung, Jahresbericht 2021 des BMVg.

Kappe, K.: Finite element modeling concepts for the dynamic compression response of additively manufactured lattices structures. In: Dynamic behaviour of additively manufactured structures & materials: DYMAT 2022.

Kappe, K. (2022): Dynamic behaviour of additively manufactured structures & materials : DYMAT 2022, 26th Technical Meeting Conference Proceedings. Unter Mitarbeit von Institut für Nachhaltige Technische Systeme, Department of Sustainable Systems Engineering und INATECH. In: DYMAT 2022, 26th Technical Meeting Conference Proceedings. Freiburg, 11.–14.9.2022.

Klaß, M.; Drolshagen, G.; Putzar, R.; Koschny, D.; Poppe, B. (2021): Impact flux predictions with MASTER. In: ESA (Hg.): From Measurements to Understanding: MASTER Modelling Workshop, 3.3.2021. ESA.

Kopustinskas, V.; Vamanu, B.; Ganter, S.; Finger, J.; Häring, I.; Zālītis, I.; Zemīte, L. (2022): Gas network modelling to support pipeline hub area risk assessment study. In: Remenytė-Prescott, R., Sanderson, K., Kopustinskas, V., Simola K. (Hg.): Advances in modelling to improve network resilience: Proceedings of the 60th ESReDA Seminar. Grenoble, 4.–5.5.2022: Publications Office of the European Union, S. 159–162.

May, M.; Jung, M.; Pfaff, J.; Schopferer, S.; Schaufelberger, B.; Matura, P.; Imbert, M. (2022): Vulnerability of aerostructures to drone impact – characterization of critical drone components. In: AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA SciTech Forum 2022. San Diego, USA, 3.–7.1.2022.

Mejia, M.; Schäfer, K.; Horch, C.; Busch, S.; Schäfer, F. (2022): IAC International Astronautical Congress 18–22 September 2022, Paris, France (IAC-22,B4,IP,x71406) M. Mejia, K. Schaefer, C. Horch, S. Busch, F. Schaefer, On-board image processing with FPGA acceleration using deep neural network inference. In: Proceedings of the 73rd IAC International Astronautical Congress. Paris, 18.–22.9.2022.

Moonen, J.; Ryan, S.; Barter, S.; Marzocca, P.; Forrester, C.; Shekhter, A. et al. (2022): Evaluating UHMWPE-stuffed aluminium foam sandwich panels for protecting spacecraft against micrometeoroid and orbital debris impact. In: Proceedings of the Hypervelocity Impact Symposium. Hypervelocity Impact Symposium. Alexandria, Virginia, USA, 18.–22.9. 2022.

Patil, S.: Towards programming the strain rate dependency into mechanical metamaterials. Unter Mitarbeit von Institut für Nachhaltige Technische Systeme, Department of Sustainable Systems Engineering und INATECH. In: Dynamic behaviour of additively manufactured structures & materials: DYMAT 2022.

Sauer, C.; Heine, A.; Riedel, W. (2022): Development of numerical models for the ballistic response of building materials. In: Periodic Bulletin of the International Ballistics Society (11).

Schaufelberger, B.; Altes, A.; Trondl, A.; Kisters, T.; Fehrenbach, C.; Matura, P.; May, M. (2022): A detailed simulation model to evaluate the crash safety of a Li-ion pouch battery cell. In: Proceedings of the 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII). 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics. Online, 31.7.2022–5.8.2022.

Schimmerohn, M.; Horch, C.; Busch, S.; Ledford, N.; Schäfer, K.; Maue, T. et al. (2022): ERNST: Demonstrating advanced infrared detection from a 12U CubeSat. In: Proceedings of the 36th Small Satellite Conference. Logan, UT, USA, 6.–11.8.2022.

Signetti, S.; Heine, A. (2022): Transition regime between high-velocity and hypervelocity impact and related energy partition in metals: state-of-the-art review, characterization and modeling. In: Proceedings of the 16th Hypervelocity Impact Symposium. Alexandria, Virginia, USA, 18.–22.9.2022.

Wissenschaftlicher Austausch, Vorträge

Vorträge auf Tagungen, Symposien, Kolloquien, auswärtigen Seminaren und wichtigen Arbeitssitzungen

Bauer, S.; Strassburger, E. (2022): On the strength of soda-lime glass under ballistic impact. Lightweight Armour Group for Defence and Security (LWAG). EMI. Freiburg, 16.9.2022.

Bauer, S.; Strassburger, E. (2022): Festigkeit von Kalk-Natron-Glas bei ballistischem Impakt. 24. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. WTD 91. Meppen, 19.10.2022.

Becker, M. (2022): An inverse model for the peeling-based recovery of unitary layers from laminated structures. 11th International Conference on Mathematical Modeling in the Physical Sciences. Online, 5.9.2022.

Becker, M.; Imbert, M. (2022): Numerische Simulation. Online-Workshop: Digitale Traceability für effizientes Recycling von Composite-Tapes, 1.2.2022.

Busch, S. (2022): Radiation hardening by software: Advanced FDIR and redundancy concepts with COTS in space. 18th International School on the Effects of Radiation on Embedded Systems for Space Applications (SERESSA) at CERN. Genf, 7.12.2022.

Busch, S. (2022): OPM-Anwendung: Satelliten magnetisch vermessen. Industrie-Workshop Quantenmagnetometrie; Technologische Trends in der Quantenmagnetometrie. Fraunhofer IPM. Freiburg, 8.12.2022.

Chen, Y.; Hartrott, P. von; Huschka, M.; Olbricht, J.; Pirkawetza, S.; Schilling, M. et al. (2022): Ontopanel: a diagrams.net plugin for graphical semantic modelling. MSE Congress, 29.9.2022.

Crabbe, S.: Präsentation des SAFETY4RAILS-Projekts auf der Abschlusskonferenz.

Crabbe, S.: Präsentation des SAFETY4RAILS-Projekts bei der Demonstration in Ankara.

Crabbe, S.: Präsentation des SAFETY4RAILS-Projekts bei der Demonstration in Madrid.

Crabbe, S.: Präsentation des SAFETY4RAILS-Projekts bei der Demonstration in Mailand.

Crabbe, S.: Präsentation des SAFETY4RAILS-Projekts bei der Demonstration in Rom.

Crabbe, S.: Präsentation des SAFETY4RAILS-Projekts vor Entscheidungsträgern der Europäischen Kommission und weiteren relevanten EU-Beamten sowie von der EU eingeladenen Experten und Vertretern anderer relevanter europäischer Projekte auf der Tagung der GD HOME CERIS INFRA »Wie unterstützt die Forschung die Richtlinie über die Widerstandsfähigkeit kritischer Einrichtungen?«.

Finger, J. (2022): SifoLIFE-Projekt FreiburgRESIST Sicher Leben in Freiburg: Resilienz-Management für die Stadt. BMBF-Innovationsforum »Zivile Sicherheit« 2022. SifoLIFE – Informationsveranstaltung. Berlin, 2.5.2022.

Fischer, K.; Andreae, M. (2022): Städtebauliche risikobasierte Resilienzanalyse – Exposition und Vulnerabilität. 9. Workshop Bau-Protect: Schutz der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen. Neubiberg, 22.11.2022.

Fischer, K.; Mitschke, A.; Klaproth, O.; Schirrmann, A.; Stolz, A. (2022): Resilience assessment of industrial processes within the aircraft industry. 13th Complex Systems Design & Management (CSD&M) Conference. Paris, 15.12.2022.

Früh, P.; Heine, A.; Wickert, M. (2022): Reaktivschutz für schwere Landsysteme – Potenzial zur Abwehr von KE-Penetratoren. 24. Tagung Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung. Meppen, 18.10.2022.

Gebbeken, N.; Fischer, K. (2022): Gebäude und kritische Infrastrukturen – baurechtliche Grundlagen, Risiko und Resilienz. 9. Workshop Bau-Protect: Schutz der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen. Neubiberg, 22.11.2022.

Gutmann, F.: Additive manufacturing of miniaturized pin joints for non assembly metallic metamaterials. ICoNSoM 2022. Alghero, Italy.

Hanke, T.; Huschka, M.; Klawonn, A.; Muth, T.; Olbricht, J.; Schweizer, C. et al. (2022): Mat-O-Lab Demonstrator: a web application showing the benefits of rich semantic material science data and exemplar usage. MSE Congress, 28.9.2022.

Heimbs, S.; May, M.; Hansen, J.; Jung, M.; Pfaff, J.; Calomfirescu, M. (2022): Physics-based drone impact analysis of composite aerostructures. 2nd European Conference on Crashworthiness of Composite Structures ECCCS2. Toulouse, 14.11.2022.

Heine, A.; Sauer, C.; Riedel, W. (2022): Modeling the interaction of a generic hollow projectile with different types of masonry. 3rd International Conference on Impact Loading of Structures and Materials (ICILSM). Trondheim, Norwegen, 14.6.2022.

Hoschke, K. (2022): Multimodale Topologieoptimierung für die Design Exploration und Lösung nichtlinearer, steifigkeits-basierter Entwurfsprobleme. NAFEMS Seminar »Generativ Design und Optimierung«, 19.5.2022.

Hoschke, K. (2022): Protection potential of cellular structures and graded steels by metal additive manufacturing. Light-weight Armour Group for Defence and Security (LWAG), 15.9.2022.

Hoschke, K. (2022): Potenziale von KI-basierten Methoden für die Strukturoptimierung von Bauteilen und Optimierung von 3D-Druck Materialien. Internes KI-Symposium, 5.10.2022.

Hoschke, K. (2022): Sustainability-oriented topology optimization of aircraft components and best practices in LPBF-based metal additive manufacturing. Towards Sustainable Aviation Summit TSAS. Toulouse, 18.10.2022.

Huschka, M.; Dlugosch, M.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Hoschke, K. (2022): The »AluTrace« use case: harnessing lightweight design potentials via the materials data space.

TRUSTS – Trusted Secure Data Sharing Space Workshop: Data Spaces & Semantic Interoperability. Wien, 3.6.2022.

Huschka, M.; Dlugosch, M.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Hoschke, K.; Klotz, U. et al. (2022): The »AluTrace« use case: harnessing lightweight design potentials via the materials data space. IDSA Ecosystem Building Call, 26.7.2022.

Huschka, M.; Dlugosch, M.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Hoschke, K.; Klotz, U. et al. (2022): Harnessing lightweight potentials in LPBF-based additive manufacturing by integration of distributed materials and process data from the cross-institutional Materials Data Space®. MSE Congress, Highlight Lecture, 29.9.2022.

Imbert, M. (2022): Peeling-based recycling of thermoplastic composites: stat of the art, potential and challenges. Workshop des Lehrstuhls AWESOME. Pau, France, 25.5.2022.

Imbert, M. (2022): Review and evaluation of alternative characterization methods for the fracture resistance measurement of high toughness line pipe steels. EPRG-PRCI-APGA – Joint Technical Meeting. Edinburgh, 7.6.2022.

Jenerowicz, M. (2022): Materialcharakterisierung von Rippenurrogaten. Digitaler Workshop im Rahmen der Untersuchungen von Letalitätsgrenzen. WTD 52. Oberjettenberg, 26.1.2022.

Jenerowicz, M. (2022): Present research activities at Fraunhofer EMI« – Comparison of rib bone surrogates from additive manufacturing, cast material and PMHS data under dynamic loading. 2. Dummy.Crashtest.Konferenz. Münster, 8.9.2022.

Jenerowicz, M. (2022): Vergleich von Rippenknochen-Surrogaten aus additiver Fertigung, Gussmaterial (CTS PRIMUS breakable) und PMHS-Daten unter dynamischer Belastung. Workshop »Surrogat«. WTD 52. Oberjettenberg, 7.12.2022.

Jenerowicz, M.; Haase, T.; Linnenberg, M.; Hoschke, K.; Boljen, M.; Hiermaier, S. (2022): Comparison of rib bone surrogates

from additive manufacturing, cast material and PMHS data under dynamic loading. IRCOBI Conference. Porto, 15.9.2022.

Jenerowicz, M.; Matt, P.; Boljen, M. (2022): Verletzungsprognosen über Simulationsmethoden und anthropomorphe Messmethoden für den Schutz von Soldatinnen und Soldaten. DWT-Tagung: Angewandte Forschung für Verteidigung und Sicherheit in Deutschland. Bonn, 9.3.2022.

Jenerowicz, M.; Matt, P.; Boljen, M. (2022): Qualification of Human Body Models and Anthropomorphic Test Devices for Ballistic Injury Protection. Lightweight Armour Group for Defence and Security (LWAG). Freiburg, 15.9.2022.

Kappe, K. (2022): Finite element modeling concepts for the dynamic compression response of additively manufactured lattices structures. DYMAT 2022. Freiburg, 13.9.2022.

Köpke, C.; Walter, J.; Cazzato, E.; Linguraru, C.; Siebold, U.; Stolz, A. (2022): Methodology for resilience assessment for rail infrastructure considering cyber-physical threats. ESORICS, CPS4CIP Workshop. Kopenhagen, 30.10.2022.

Kruse, A.; Köpke, C. (2022): Warning strategies for large scale public events. Social Simulation Conference 2022. Mailand, 13.9.2022.

Martini, T. (2022): Research Outside of Academia – Scientific career at the Fraunhofer-Gesellschaft for the advancement of applied research. Retreat of the Research Training Network »Rethinking Quantum Field Theory«. Päwesin, 4.10.2022.

Matt, P.; Jenerowicz, M.; Boljen, M. (2022): Investigation of e-scooter drivers colliding with curbs – a parametric numerical study. 1. Spring Conference Series 2022 of Tech Center i-protect, Session 1 Human Body Models. Online, 27.4.2022.

Matt, P.; Jenerowicz, M.; Schweiger, T.; Heisch, F.; Lienhard, J.; Boljen, M. (2022): Investigation of e-scooter drivers colliding with curbs – a parametric numerical study. IRCOBI Conference. Porto, 16.9.2022.

Matura, P.; Signetti, S.; Moser, S.; Sandoval Murillo, J.-L.; Durr, N.; Watson, E. et al. (2022): Modelling and simulation of the pellet shattering process related to the SPI technology for the ITER DMS. Second Technical Meeting on Plasma Disruptions and their Mitigation. ITER Headquarters. France, 19.7.2022.

May, M.; Jung, M.; Pfaff, J.; Schopferer, S.; Schaufelberger, B.; Matura, P.; Imbert, M. (2022): Vulnerability of aerostructures to drone impact – characterization of critical drone components. AIAA-SciTech-Forum. Online, 4.1.2022.

Niklas, W.; Ramin, M. von (2022): Softwaregestützte Sicherheitsanalysen von Freifeldszenarien mit Hochenergie-Laserstrahlung. Symposium Lasertechnologie in der Wehrtechnik. WTD 91, Meppen, 1.6.2022.

Patil, S. (2022): Towards programming the strain rate dependency into mechanical metamaterials. DYMAT 2022, 13.9.2022.

Pfaff, A.: Thermal history and phase analysis of functionally graded steel microstructures by L-PBF. Alloys for Additive Manufacturing Symposium.

Ramin, M. von (2022): Auslegung von Bauteilen gegen dynamische Belastung aus Störlichtbogenereignissen. Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH), Online-Workshop »Störlichtbögen«, 5.4.2022.

Ramin, M. von (2022): Aktuelles aus der Forschung. 9. Workshop Bau-Protect: Schutz der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen. Neubiberg, 22.11.2022.

Ramin, M. von; Hupfuf, M. (2022): Strukturverhalten im hochdynamischen Bereich. 9. Workshop Bau-Protect: Schutz der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen. Neubiberg, 22.11.2022.

Reich, S. (2022): Untersuchungen zur Hochenergie-Laserwirkung auf metallische Materialien. Lasersymposium. Meppen, 1.6.2022.

Reich, S. (2022): Metal penetration with 120 kw high-power fiber laser. Optica Laser Congress and Exhibition, Laser Applications Conference, Defense Applications Session. Barcelona, 11.12.2022.

Rietkerk, R.; Früh, P.; Riedel, W.; Heine, A. (2022): Machine learning as an alternative approach to quantify the thermal softening of HHA and UHA armor steels. Lightweight Armour Group for Defence and Security (LWAG). Freiburg, 15.9.2022.

Rietkerk, R.; Heine, A.; Riedel, W. (2022): Maschinelles Lernen für Schutz und Wirkung – Modellierung des hochdynamischen Verhaltens von Werkstoffen unter Beschuss. Angewandte Forschung für Verteidigung und Sicherheit in Deutschland. Bonn, 8.3.2022.

Rietkerk, R.; Heine, A.; Riedel, W. (2022): Anwendung von maschinellem Lernen für Analysen zu Endballistik und zu endballistischem Werkstoffverhalten. KI-Kolloquium. Freiburg, 14.9.2022.

Rosin, J. (2022): Stability of steel tanks with unintentional pre-deformation due to installation. Conference on Flat Bottom Storage Tanks. München, 19.10.2022.

Sauer, M.; Dörfler, M.; Klomfass, A. (2022): Simulation von Fragmentierungsvorgängen bei Impakt. Reactive Materials Workshop. WTD 91. Meppen, 31.5.2022.

Schaukelberger, B.; Trondl, A. (2022): Detailliertes FE-Modell und Ersatzmodellierung zur Bewertung der Crash-Sicherheit einer Li-Ionen Zelle. Spring Conference Series #4 (Battery Safety) des Tech Center i-protect. Online, 12.7.2022.

Schimmerohn, M. (2022): Ballistic limit equations – history, limits and need for future development. 2nd European Hypervelocity Impact Risk Assessment Forum. Cranfield University, 22.11.2022.

Signetti, S.; Heine, A. (2022): Transition regime between high-velocity and hypervelocity impact and related energy partition in metals: state-of-the-art review, characterization, and

modeling. 16th Hypervelocity Impact Symposium. Alexandria, Virginia, USA, 21.9.2022.

Srivastava, K.; Köpke, C.; Walter, J.; Faist, K.; Berry, J.; Porretti, C.; Stolz, A. (2022): Modelling and simulation of railway networks for resilience analysis. ESORICS, CPS4CIP Workshop. Kopenhagen, 30.10.2022.

Stolz, A. (2022): Engineering resilience against natural and man-made disasters. TexXPlore (TXP) Day, Home Team HTX. Singapore, 29.11.2022.

Strassburger, E.; Bauer, S. (2022): Transparente Panzerung mit erhöhter Effizienz. 24. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. WTD 91. Meppen, 18.10.2022.

Strassburger, E.; Bauer, S.; Amlung, E. (2022): Einfluss von Störplatten auf Projektile mit Wolframcarbidkern. 24. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. WTD 91. Meppen, 18.10.2022.

Strobl, M.; Aurich, H. (2022): Characterization of progressive damage evolution in polymer bonded explosives. 51st International Annual Conference of the Fraunhofer ICT. Karlsruhe, 29.6.2022.

Watson, E.; Durr, N.; Büttner, M.; Matura, P.; Schimmerohn, M. (2022): DEM-O II. Final Presentation Meeting. Freiburg, 7.11.2022.

Seminarvorträge im EMI

- Goesmann, M. (2022): Numerische Simulation der Laser-Materie-Wechselwirkung. EMI-Doktorandenseminar, 21.10.2022.
- Holz, S. (2022): Analyse und Simulation der Aerosolausbreitung, Aspekte des Projekts »AVATOR« (Anti-Virus-Aerosol: Testing, Operation, Reduction). EMI-Hausseminar. Freiburg, 17.2.2022.
- Jäcklein, M. (2022): Entwicklung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen im LPBF-Verfahren. EMI-Doktorandenseminar, 3.6.2022.
- Jenerowicz, M. (2022): Meso-mechanical simulation methods for predictive analysis of bone structures under dynamic loads. EMI-Doktorandenseminar. EMI Freiburg, 16.12.2022.
- Jenerowicz, M.; Haase, T.; Linnenberg, M.; Hoschke, K. (2022): EMIdee »SAMBIT« Surrogates from Additive Manufacturing for Ballistic Impact Tests. EMI-Hausseminar. EMI Freiburg, 30.6.2022.
- Kappe, K. (2022): Optimierungsmethoden für additiv gefertigte zelluläre Gitterstrukturen unter dynamischer Belastung. EMI-Doktorandenseminar, 25.11.2022.
- Köpke, C. (2022): Vorstellung des Projektes »SATIE (Security of Air Transport Infrastructure of Europe)«. EMI-Hausseminar, 17.3.2022.
- Mert, D. (2022): Untersuchung des Ausatemvorgangs mittels Schlierentechnik, Aspekte des Projekts »AVATOR« (Anti-Virus-Aerosol: Testing, Operation, Reduction). EMI-Hausseminar. Freiburg, 17.2.2022.
- Patil, S. (2022): The auxetic friction cell – towards programming the strain rate dependency into lattice structures. EMI-Doktorandenseminar, 14.6.2022.
- Pfaff, A. (2022): Functionally graded lattice structures. EMI-Doktorandenseminar, 21.10.2022.
- Reich, S. (2022): Challenge accepted: Was bekommt der 120-kW-Laser als Erstes durchbohrt? EMI-Hausseminar. EMI Freiburg, 21.7.2022.
- Rosin, J. (2022): Überblick über das Projekt »ResCentric« – Climate Risk Analyses. EMI-Hausseminar, 21.7.2022.
- Sauer, M.; Bagusat, F.; Rühnick, P.; Pfändler, S.; Maurer, M.; Günther, W. et al. (2022): Bestimmung hochdynamischer Materialeigenschaften mit »Taylor-Tests«. EMI-Hausseminar, 8.12.2022.
- Soot, T. (2022): »Grey Box Processing«. Integrales Validierungsverfahren für Struktursimulationen in der Fahrzeugsicherheit. EMI-Doktorandenseminar. EMI Freiburg, 3.6.2022.

Lehrgänge der Carl-Cranz-Gesellschaft

- Heine, A. (2022): Verhalten von Bauwerkstoffen bei Projektilimpakt. Seminar VS 1.42 »Ballistik und Effektivität moderner Hochleistungsgeschosse«. Oberpfaffenhofen, 13.10.2022.
- Heine, A. (2022): Wissenschaftliche Untersuchungsmethoden für die Geschosswirkung. Seminar VS 1.42 »Ballistik und Effektivität moderner Hochleistungsgeschosse«. Oberpfaffenhofen, 13.10.2022.
- Signetti, S. (2022): Simulationsmodelle der Innenballistik. Seminar »Innenballistik von Rohrwaffen«. EMI Efringen-Kirchen, 27.9.2022.
- Strassburger, E. (2022): Endballistik kleinkalibriger Geschosse – Keramik für den ballistischen Schutz. Seminar VS 1.43 »Endballistik – Grundlagen und Anwendungen«. ISL. Saint-Louis, 21.6.2022.

Lehrgänge des Bildungszentrums der Bundeswehr, Mannheim

Boljen, M.; Jenerowicz, M.; Matt, P.: Qualifikation numerischer und experimenteller Methoden zur Prognose und zum Schutz vor ballistischer Wirkung auf den menschlichen Körper. Ballistik in Forschung und Technologie. BiZBw Mannheim.

Früh, P.; Heine, A.; Wickert, M. (2022): Reaktivschutz für schwere Landsysteme – Potenzial zur Abwehr von KE-Penetratoren. Symposium Ballistik in Forschung und Technologie 2022. BiZBw Mannheim, 20.9.2022.

Rietkerk, R.; Heine, A.; Riedel, W. (2022): Anwendung von maschinellem Lernen für Analysen zu Endballistik und zu endballistischem Werkstoffverhalten. Symposium Ballistik in Forschung und Technologie 2022. Mannheim, 21.9.2022.

Sauer, C.; Bagusat, F.; Ruiz-Ripoll, M.-L.; Roller, C.; Sauer, M.; Heine, A.; Riedel, W. (2022): Untersuchung von Stoßwelleneigenschaften eines ultrahochfesten Faserbetons durch Kombination von Experiment und Simulation. Symposium Ballistik in Forschung und Technologie 2022. Mannheim, 21.9.2022.

Strassburger, E. (2022): Transparente Panzerungen mit erhöhter Effizienz gegen Geschosse mit Hartmetallkern. Symposium Ballistik in Forschung und Technologie (BFT). BiZBw Mannheim, 19.9.2022.

Thoma, O. (2022): Mündungssignatur und Funkenbildung bei Handwaffen. Symposium Ballistik in Forschung und Technologie 2022. BiZBw Mannheim, 20.9.2022.

Thoma, O. (2022): Untersuchungen zur Abgangsballistik von Unterkalibergeschossen. Symposium Ballistik in Forschung und Technologie 2022. BiZBw Mannheim, 20.9.2022.

Lehrveranstaltungen

Balle, F. (Wintersemester 2021/2022): Lightweight Design and Materials. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Balle, F. (Wintersemester 2021/2022): Materials Selection and Sustainable Development for Mechanical Engineering. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Balle, F. (Wintersemester 2021/2022): Sustainable Materials – Functional Materials: Einführung. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Balle, F. (Wintersemester 2021/2022): Sustainable Systems Engineering: Studienprojekt. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Balle, F. (Wintersemester 2021/2022): Werkstofftechnik und -prozesse. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Balle, F. (Sommersemester 2022): Lab Course Engineering Materials and Testing Methods. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Balle, F. (Sommersemester 2022): Methodenpraktikum Master Sustainable Materials – Functional Materials. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Balle, F. (Sommersemester 2022): Nachhaltige Materialien. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Balle, F. (Sommersemester 2022): Ringvorlesung Methoden der Materialwissenschaften. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Balle, F. (Sommersemester 2022): Technische Funktionswerkstoffe. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Balle, F.; Kilchert, S.; Hiermaier, S. (Sommersemester 2022): SSE-Studienseminar. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Busch, S. (Wintersemester 2021/2022): Cansat Design Lab. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Wintersemester 2021/2022.

Busch, S. (Wintersemester 2021/2022): New Space. Seminar, Wintersemester 2021/2022.

Busch, S. (Wintersemester 2021/2022): Spacecraft System Analysis. Vorlesung. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Wintersemester 2021/2022.

Busch, S. (Sommersemester 2022): Spacecraft System Analysis Repetitorium. Vorlesung. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Sommersemester 2022.

Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (Wintersemester 2021/2022): Fundamentals of Resilience. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (Wintersemester 2021/2022): Grundlagen der mechanischen Werkstoffcharakterisierung/ Basics of mechanical testing. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (Wintersemester 2021/2022): Physics of Failure. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (Sommersemester 2022): Angewandte Finite Elemente für die Strukturmechanik. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S. (Sommersemester 2022): Werkstoffdynamik: Werkstoffcharakterisierung / Dynamics of Materials: Material Characterization. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Häring, I. (Wintersemester 2021/2022): Quantitative Risikoanalyse. Vorlesung. Hochschule Furtwangen, Wintersemester 2021/2022.

Häring, I. (Wintersemester 2021/2022): Resilienzquantifizierung/Quantification of Resilience. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Häring, I. (Sommersemester 2022): Funktionale Sicherheit – Aktive Resilienz / Functional Safety: Active Resilience. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Harwick, W. (Wintersemester 2022/2023): Werkstoffkunde. Vorlesung. DBHW Lörrach, Wintersemester 2022/2023.

Hiermaier, S. (Sommersemester 2022): Climate Change. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Hiermaier, S. (Sommersemester 2022): Grundlagen resilienter Systeme. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Kilchert, S.; Hiermaier, S. (Wintersemester 2021/2021): Lebenszyklusanalyse. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2021.

Kilchert, S.; Hiermaier, S. (Sommersemester 2022): Material Flow Analysis. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Kilchert, S.; Hiermaier, S.; Ganzenmüller, G. (Wintersemester 2021/2022): Material Life Cycles. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Matura, P. (Wintersemester 2021/2022): Numerische Methoden in der Mathematik. Vorlesung. DBHW Lörrach, Wintersemester 2021/2022.

Matura, P. (Wintersemester 2022/2023): Numerische Methoden in der Mathematik. Vorlesung. DBHW Lörrach, Wintersemester 2022/2023.

Matura, P.; Hiermaier, S. (Wintersemester 2021/2022): Kontinuumsmechanik. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Matura, P.; Hiermaier, S. (Wintersemester 2022/2023): Kontinuumsmechanik. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2022/2023.

May, M.; Imbert, M.: Composite Materials. Vorlesung. Wintersemester 2022/2023. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Osterholz, J. (Sommersemester 2022): High-Energy-Density Physics. Vorlesung. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Sommersemester 2022.

Ramin, M. von (Sommersemester 2022): Lehrbeauftragter im Masterstudiengang »Katastrophenvorsorge und Katastrophenmanagement«, Unterrichtseinheit 3 »Bauliche Prävention im Bevölkerungsschutz« im Modul »Ausgewählte Konzepte und Maßnahmen der Katastrophenvorsorge«. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Sommersemester 2022.

Riedel, W.: Schutz baulicher Infrastrukturen. Vorlesung. Wintersemester 2021/2022 und 2022/2023. Hochschule Furtwangen.

Sauer, M. (Wintersemester 2022): Laborpraktikum. Universität der Bundeswehr München, Wintersemester 2022.

Sauer, M. (Wintersemester 2022): Numerische Simulationsverfahren. Vorlesung. Universität der Bundeswehr München, Wintersemester 2022.

Sauer, M. (Wintersemester 2022): Werkstoffcharakterisierung. Vorlesung. Universität der Bundeswehr München, Wintersemester 2022.

Schäfer, F. (Wintersemester 2021/2022): Charakterisierung von Geomaterialien unter Stoßbelastung I, Characterization of Geomaterials under Shock Loads I. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Schäfer, F. (Wintersemester 2021/2022): Shock Waves in Rocks I. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Schäfer, F. (Sommersemester 2022): Charakterisierung von Geomaterialien unter Stoßbelastung II, Characterization of Geomaterials under Shock Loads II. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Stolz, A. (Wintersemester 2021/2022): Robustness of Structures. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2021/2022.

Stolz, A. (Sommersemester 2022): Design and Monitoring of Large Urban Infrastructures. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Stolz, A. (Wintersemester 2022/2023): Structural Robustness: Resilient Designs. Vorlesung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Wintersemester 2022/2023.

Stolz, A.; Lickert, B. (Sommersemester 2022): Resilience of Supply Networks. Vorlesung und Übung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Sommersemester 2022.

Gastwissenschaftler und Gastwissenschaftlerinnen im EMI

Fischer, Frank, 18.10.2021–17.10.2022.

Fransson, Matilda, 7.10.2022–21.10.2022.

Gonzalez Virgen, Georgina, 1.12.2021–30.3.2022.

Jain, Atin, 16.11.2020–31.8.2023.

Nasr, Engy, 1.3.2021–28.2.2022.

Plappert, David, 15.5.2021–30.4.2023.

Resende Oliveira, Pablo, Stipendiat, 1.6.2018–31.5.2022.

Rey de Pedraza, Victor, 1.4.2022–30.6.2022.

Roth, Antonina, 16.1.2019–30.6.2024.

Schalm, Tobias, 1.1.2022–31.7.2022.

Promotionen

Becker, M. (2022): Arlequin-coupling of 2-D peridynamic finite elements with an analytical Jacobian matrix. Dissertation. TU München, München.

Becker, M. (2022): Energieeffizientes Punktschweißen von Aluminium/Stahl-Strukturen durch Leistungultraschall. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.

Benz, M. (2022): Automatisierbare direkte Kalibrierung von Materialmodellen auf Basis digitaler Bildkorrelation. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.

D'haen, J. (2022): On the behavior of compression loaded multidirectional carbon fiber laminates after first ply failure. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.

Heunoske, D. (2022): Zeitaufgelöste Untersuchungen von Plasmaeffekten bei der Wirkung intensiver Laserstrahlung auf Metalle. Dissertation. Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf.

Rehra, J. (2022): Beitrag zur Beschreibung des mechanischen Materialverhalten von Metall-Faser- Hybrid-Verbund-Werkstoffen am Beispiel von stahl- und kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz. Dissertation. TU Kaiserslautern, Kaiserslautern.

Resende Oliveira, P. (2022): Eco-mechanical characterization of sandwich panels based on an environmentally-friendly honeycomb core with upcycled plastic caps. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.

Schlamp, M. (2022): Der Einfluss elliptischer Krümmung auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten glasfaserverstärkter Kunststoffstrukturen. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.

Staab, F. (2022): Verbundeigenschaften, Mikrostruktur und Prozessanalyse ultraschall-geschweißter Leichtmetall/CFK-Verbunde. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.

Watson, E. (2022): Fragment tracking in hypervelocity impact experiments. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.

Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten

Arikan, E. (2022): A Comparative Study on Graph-based Path Planning Algorithms. Master's Thesis. EMI-Report A 01/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Biernacki, J.-B. (2022): Room impulse response filtering for application in an indoor sonar system. Master 's Thesis. EMI-Report A 13/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Burtsche, J. (2022): Auswertung quantitativer Schädigungsinformationen an Betonelementen nach lokaler, hochdynamischer Belastung. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 24/22. DHBW Lörrach.

- Feix, W.: Smart Coating – Materialcharakterisierung von Polyurea als Beschichtung zum Explosionsschutz. Bachelorarbeit.
- Giebfried, R. (2022): Entwicklung einer Generative Engineering Implementierung zur Topologieoptimierung eines wehrtechnischen Bauteils unter dynamischer Last für den metallischen 3D-Druck. Bachelorarbeit. DBHW Lörrach.
- Grau, P. (2022): Sicherheitsbezogene Betrachtungen zu einem Leichtgasbeschleuniger. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 03/22. Hochschule Furtwangen.
- Grenier, R. (2022): Innovativer Recyclingansatz für thermoplastische Composites: Einfluss der Temperatur und der mechanischen Belastungsbedingungen auf das Lagetrennverhalten. Masterarbeit. EMI-Bericht A 41/22. RWTH Aachen.
- Hardt, L. (2022): Optimierung einer Messeinrichtung zur Untersuchung abgangsbalistischer Vorgänge mit Röntgenstrahlung. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 42/22. DHBW Mannheim.
- Kim, J. (2022): Methodology for integration of life cycle assessment into a generative design process of 3D-printed products. Master's Thesis. EMI-Bericht A 39/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- König, L. (2022): Sichtbarkeits- und Hörbarkeitsberechnungen unter Ausnutzung von Grafikprozessoren. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 21/22. DHBW Lörrach.
- Labusch, C. (2022): Numerische Strömungssimulation zur Untersuchung hybrider Lüftungskonzepte in Klassenräumen im Hinblick auf exhalierete Aerosole. Masterarbeit. FH Münster.
- Maura Aláez, V. (2022): Sun simulation for a thermal-vacuum test facility for small satellite and payload testing. Master's Thesis. EMI Report A 05/22. University of the Basque Country.
- Pätzold, Q. (2022): Studie über ein strahlungstolerantes Überwachungssystem für die Nutzlast eines Kleinsatelliten. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 19/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Ronge, F. (2022): (Energie-)Effizienz und Resilienz von Gebäudebegrünungen im Hinblick auf zukünftige Klimaszenarien – Simulativer Vergleich von verschiedenen Begrünungssystemen, Pflanzenarten und Flächenbedeckungskonfigurationen sowie Ermittlung und Optimierung von deren Einfluss auf die Innentemperatur und den Energiehaushalt eines mitteleuropäischen Referenzgebäudes. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 12/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Sakhala, S. (2022): Numerical simulation of gas explosions considering turbulent flame propagation. Masterarbeit. EMI-Bericht A 40/22. Universität Paderborn.
- Sasi, S. K. (2022): FEM simulation of the mechanical loading on solid fuels. Master's Thesis. EMI-Bericht A 37/22. Universität Duisburg Essen.
- Schlegel, N. (2022): Numerische Simulation der Laser-Materie-Wechselwirkung. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 26/22. DHBW Lörrach.
- Schneider, N. (2022): Modellierung und Impaktsimulation ausgewählter Drohnenkomponenten Modeling and Impact Simulation of Selected Drone Components. Master's Thesis. EMI Report A 16/22. Berliner Hochschule für Technik.
- Schütz, B. (2022): Charakterisierung von Berstmembranen für Crashanwendungen. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 27/22. DHBW Lörrach.
- Siebert, A. (2022): Fusionsalgorithmen für eine MEMS-IMU basierte Orientierungsbestimmung bei transienter Überlast. Masterarbeit. EMI-Bericht A 18/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Speck, R. (2022): Aufbau und Umsetzung eines Konzepts zur Steuerung einer optischen Nutzlast zum Einsatz auf der ISS. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 15/22. FH Aachen.
- Steiert, M. (2022): In-Situ-Wärmebehandlung von Gitterstrukturen im L-PBF-Verfahren. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 32/22. Hochschule Offenburg.

Strahinger, S. (2022): Eco-mechanical characterization of sandwich panels based on an environmentally-friendly honeycomb core with upcycled plastic caps. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 25/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Thalwaththe Gedara, M. (2022): Lithium-ion battery thermal runaway investigation using conventional computed tomography (CT) and energy resolved CT with the Medipix3RX detector. Master's Thesis. EMI-Bericht A 04/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Thiedecke, N. (2022): System concept for evaluation of planar sparse microphone array geometries regarding sound source localization performance. Master's Thesis. EMI Report A 14/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Tisha, L. S. (2022): Development of Ta-W Composite Using Laser Powder Bed Fusion. Master's Thesis. EMI Report A 22/22. TU Chemnitz.

Tsao, Y. H. (2022): Behavior of granular material soil under high speed flood events. Master's Thesis. EMI Report A 23/22. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Wandel, L. (2022): Entwicklung von Reflexionsmessungen zur Verbesserung des Verständnisses von Hochleistungslaserprozessen. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 29/22. Hochschule Furtwangen.

Welp, P. (2022): Empirische Optimierung von L-PBF-Parametern zur Verarbeitung von Rein-Kupfer. Bachelorarbeit. EMI-Bericht A 31/22. DBHW Lörrach.

Patente

Hoschke, K.; Gutmann, F.: Method for producing a bone replacement element. Anmeldenummer: EP22191063.1.

Imbert, M.: Method and apparatus for detaching a fiber layer from a multilayer fiber composite material. Anmeldenummer: EP22181631.7.

Pfaff, A.: Method for post-treating additively manufactured structures by means of ultrasound. Anmeldenummer: EP22214871.0.

Pfaff, A.: Reduction of oxygen content in a process chamber. Anmeldenummer: EP22181901.4.

Rosin, J.; Delleske, C.; Lüttner, F.: Method and apparatus for indicating the presence of a buried person in a building after a collapse of the building. Anmeldenummer: Europäische Patentanmeldung: 21 154 793.0.

Rosin, J.; Delleske, C.; Lüttner, F.: Multifunktionale Sensoreinheit zur automatisierten und schnellen Detektion verschütteter Personen. Anmeldenummer: US-amerikanische Patentanmeldung: 17/585,941.

Workshops und Veranstaltungen

9. Workshop Bau-Protect. Fachliche Leitung seitens Fraunhofer EMI. Neubiberg.

Doktoranden Summer School, Fraunhofer EMI + INATECH-SSE (Sustainable Systems Engineering). Naturfreundehaus Breitenau.

Workshop ASASP. 8.–10.11.2022. EMI Efringen-Kirchen.

Haase, T. (2022): 5. Gesamtprojekttreffen »AIMM«. EMI Freiburg, 6.10.2022.

Hoschke, K.: Formnext 2022 (15.–18.11.2022): Standbetreuung für Fraunhofer Kompetenzfeld Additive Fertigung und Ausstellung mehrerer Exponate; Nennung des Fraunhofer EMI in Pressemitteilung des Fraunhofer Kompetenzfeld (1.11.22).

Hoschke, K.: Rapid.Tech 2022 (17.–19.6.2022): Standbetreuung für Fraunhofer Kompetenzfeld Additive Fertigung und Ausstellung mehrerer Exponate; Nennung des Fraunhofer EMI in Pressemitteilung des Fraunhofer Kompetenzfeld.

Matt, P.; Léost, Y.; Kurfiß, M.; Schweiger, T.; Lienhard, J.; Boljen, M. (2022): E-Scooter-Unfälle an Bordsteinkanten – Dummies und Menschmodelle im Einsatz. Freiburger Dialog, 26.10.2022.

Pfaff, A.: auf ICoNSOM 2022 (13.–16.6.2022): Organization und Durchführung des Mini-Symposiums »Additive Manufacturing and characterization of metamaterials« International Conference on Nonlinear Solid Mechanics, Alghero, Italien.

Mitwirkung in Fachgremien, Fachverbänden und Programmkomitees

Heine, A.: Organizing Committee, 4th International Conference on Impact Loading of Structures and Materials (ICILSM 2024).

Heine, A.: Scientific Committee, Light-Weight Armour Group (LWAG).

Heine, A.; Strassburger, E.: Co-Chairs of the LWAG 2022 Light-Weight Armour for Defence and Security.

Hoschke, K.: Kompetenzfeld Additive Fertigung.

Köpke, C.: Mitglied Programm Committee des CPS4CIP 2022 Workshops.

Köpke, C.: Mitgliedschaft in der »Young academy for sustainability research« des FRIAS der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

May, M.: Editorial Board »Journal of Dynamic Behavior of Materials«.

May, M.: Editorial Board »Unizik, Journal of Technology, Production and Mechanical Systems« (UJTPMS), Nnamdi Azikiwe University Awka, Nigeria.

May, M.: Member International Honors and Awards Development Committee, AIAA, USA.

May, M.: Mitglied der Fraunhofer VINTAGE Class seit Januar 2022.

May, M.: Project Management Committee Vertreter der Fraunhofer-Gesellschaft in Clean Sky 2 AIRFRAME.

May, M.: Scientific Committee 2nd European Conference on Crashworthiness of Composite Structures ECCCS2, Toulouse, 14.–16.11.2022.

May, M.: Stellv. POC des Fraunhofer VVS für den FCAS-Masterplan.

May, M.: Stellv. Steering Committee Vertreter der Fraunhofer-Gesellschaft in Clean Sky 2 AIRFRAME.

May, M.: Working Group Member International Activities Advisory Committee, AIAA, USA.

Putzar, R.: Repräsentant des Ernst-Mach-Instituts in der Aeroballistic Range Association (ARA). Bis 2022-08: Past Chairman 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)«.

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.

Schimmerohn, M.: Chairman of Working Group 3 »Protection« of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC), external DLR Delegate.

Signetti, S.: Organizing Committee, 4th International Conference on Impact Loading of Structures and Materials (ICILSM 2024), 13.–17.5.2024, Freiburg, Germany.

Wissenschaftliche Preise und Auszeichnungen

Burtsche, J.: Förderpreis 2022 der Gisela und Erwin Sick Stiftung in der Fakultät Technik der DHBW Lörrach für herausragende wissenschaftliche Leistungen in der Bachelorarbeit.

Evaluierte Exzellenzforschung – Projekte, die vom DFG, BMBF oder European Research Council gefördert werden

BMBF-Verbundvorhaben »Handwaffen mit selbstgedruckten Teilen – eine Risikoabschätzung (HamsTeR)«, Förderkennzeichen 13N16030.

Kooperationspartner im BMBF SifoLIFE-Projekt »Ganzheitliche zivile Sicherheitslösungen für die Stadt Wilhelmshaven als Bundeswehr- und maritimer Standort an der Schnittstelle städtischer Lebensräume (ZisSch)«.

Impressum

Redaktion

Birgit Bindnagel (verantwortlich), Heide Haasdonk

Redaktionelle Mitarbeit

Johanna Holz, Cosima Banuls-Nessler, Laurin Schürer

Layout und grafische Bearbeitung

Deborah Kabel, Sonja Weber

Bildredaktion

Birgit Bindnagel, Heide Haasdonk, Deborah Kabel, Dr. Kilian Krebs, Sonja Weber

Redaktionsanschrift

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
Presse und Öffentlichkeitsarbeit
Ernst-Zermelo-Straße 4
79104 Freiburg

Telefon 0761 2714-366
birgit.bindnagel@emi.fraunhofer.de

Druck

Fraunhofer Verlag, gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier.

© Fraunhofer EMI, Freiburg 2023

Hier halten wir Sie auf dem Laufenden:



s.fhg.de/emi-jahresberichte



s.fhg.de/fraunhofer-emi-linkedin



s.fhg.de/fraunhofer-emi-youtube

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