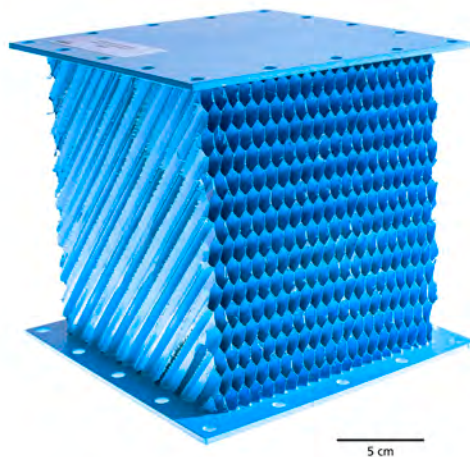


**JAHRESBERICHT**

**2015/2016**




*Für die Überprüfung der Craschauslegung spielen im Automobilbereich Crashtestbarrieren eine wichtige Rolle.*

*Sie simulieren beim Fahrzeugcrashtest einen deformierbaren normierten Crashtestpartner.*

*Diese Barrieren bestehen oft aus Aluminiumwabenstrukturen. Sie besitzen verschiedene Zonen unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften mit zusätzlichen Deck- und Trennlagen aus unterschiedlich dicken Aluminiumblechen.*

*Im Rahmen eines Projekts mit Industriepartnern werden am EMI unterschiedliche Wabenstrukturen sowie die zugrunde liegenden Aluminiumfolien und -bleche für verschiedene Barrieretypen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Dabei werden unterschiedliche anwendungsrelevante Belastungsfälle berücksichtigt. Beispielsweise wird der Winkel der Lasteinleitung variiert oder der Einfluss der eingeschlossenen Luft auf das Verhalten der Gesamtstruktur untersucht.*

*Das Titelfoto zeigt einen Ausschnitt aus einer Probe einer solchen Aluminiumwabenstruktur.*



JAHRESBERICHT  
2015/2016

# VORWORT



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

Liebe Leserinnen und Leser,

ein Strategieprozess mit anschließendem Audit, die Aufnahme des Forschungs- und Lehrbetriebs am angeschlossenen Lehrstuhl für Nachhaltige Ingenieursysteme und die Fraunhofer-Mitarbeiterbefragung – drei intensive Prozesse, die das vergangene Jahr am Fraunhofer EMI wesentlich geprägt und die Menschen gefordert haben. Alle drei hatten viel mit der neuen Rolle des Institutsleiters zu tun. Meine Doppelfunktion als Gründungsdirektor eines Universitätsinstituts verlangt nach einer neuen Art der Wahrnehmung der Aufgaben in der Leitung des Fraunhofer EMI. Sie erfordert starke Persönlichkeiten auf allen Führungsebenen, klare Führungsstrukturen und transparente Prozesse im Inneren. Das Auditverfahren hat wesentlich dazu beigetragen, dass wir uns selbst noch besser verstehen und die hervorragenden Chancen auf unseren Märkten noch gezielter wahrnehmen. Das ausgezeichnete Ergebnis der Mitarbeiterbefragung bestärkt uns in der Priorisierung von Personalthemen, insbesondere der Personalentwicklung.

Äußeres Zeichen für die Entwicklung des EMI ist unser Neubau in der Albertstraße. Mein täglicher Blick auf die Bautätigkeit motiviert neue Themen und Vorhaben. Mit den hier bald untergebrachten Büros und Labors werden wir in die Lage versetzt, unsere ambitionierten Ziele noch besser zu verfolgen.

Das intensive Engagement in Richtung und mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg trägt erste Früchte. Die drei gemeinsamen Pilotprojekte im Leistungszentrum laufen seit einem Jahr. Die Honorarprofessur von Prof. Dr. Schäfer in der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen bietet neue Anknüpfungspunkte mit der Geologie. Und die geplante Professur zur Resilienzforschung in der Technischen Fakultät wird ein wesentlicher Pfeiler des INATECH. Durch den engen fachlichen und persönlichen Austausch mit der Universität der Bundeswehr in München finden insbesondere unsere wehrtechnischen Themen ihre gewohnte universitäre Heimat.

# »VISIONÄRE FORSCHUNGSTHEMEN«

Resilienz ist nicht nur eines von drei Schwerpunktthemen des INATECH – Resilienz im weiten Feld der Kurzzeitdynamik ist auch das visionäre Forschungsthema des EMI. Ingenieursysteme resilient zu planen ist eine enorme Herausforderung, die zu bewältigen eines der spannenden Forschungsthemen schlechthin ist. Wenn wir katastrophale Ereignisse wie den Nuklearunfall in Fukushima, die Terroranschläge in Paris oder das Hochwasser in Simbach betrachten, so wird einerseits die Breite des zu untersuchenden Spektrums deutlich. Andererseits erkennt man, dass zu allermeist im Nachhinein Lösungs- und Verhinderungsstrategien überdeutlich werden, diese aber im Vorfeld zu identifizieren, die eigentliche Herausforderung für den Resilienzingenieur darstellt. Die dafür benötigten Kompetenzen zusammenzubringen, ist notwendige Voraussetzung für die gesuchte ganzheitliche Lösung. Und ein wesentlicher Beitrag zur Nachhaltigkeit unserer Gesellschaft.

Dem Bedürfnis der Gesellschaft nach äußerer Sicherheit trägt die Verteidigungsforschung am Ernst-Mach-Institut in den Themenfeldern Schutz und Wirkung Rechnung. Der Strategieprozess hat die herausragende Bedeutung dieses Forschungsbereichs für das EMI wie auch die des Instituts für das Bundesministerium der Verteidigung bestätigt. Die Dynamik von Werkstoffen und Bauteilen unter militärisch relevanten Bedingungen zu untersuchen, neue Formen der Hochgeschwindigkeitsdiagnostik zu entwickeln und mit numerischen Methoden prognosefähige Aussagen zu treffen ist eine Sammlung von Kernkompetenzen, die das EMI als Alleinstellungsmerkmal aufzuweisen hat. Und die zu einer weiteren Form von »Resilient Dynamics« beitragen.

Mein herzlicher Dank gilt unseren Auftraggebern und Partnern. Besonders danke ich dem Bundesministerium der Verteidigung, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Land Baden-Württemberg.

Unser Erfolg ist nur möglich durch die Kreativität, die Motivation und das Engagement aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Fraunhofer EMI. Ihnen möchte ich an dieser Stelle ganz besonders danken.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß bei der Lektüre!

Ihr



Stefan Hiermaier

# INTERVIEW MIT PROF. DR.-ING. HABIL. STEFAN HIERMAIER



*Professor Stefan Hiermaier: »Ich wünsche mir, dass man die Stadt Freiburg mit Nachhaltigkeit in Forschung und Lehre verbindet.«*

**Frage:** Herr Professor Hiermaier, Sie sind nicht nur Institutsleiter des Fraunhofer EML, sondern auch Koordinator des Leistungszentrums Nachhaltigkeit und Gründungsdirektor des Instituts für Nachhaltige Technische Systeme an der Universität Freiburg, dem INATECH. Was genau stellen diese Einrichtungen dar, welche Ziele haben sie, und wie hängen sie zusammen?

**Antwort:** Das Leistungszentrum Nachhaltigkeit ist eine Kooperation zwischen der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und der Fraunhofer-Gesellschaft. Konkret wirken hier die fünf Institute der Fraunhofer-Gesellschaft in Freiburg mit. Diese Kooperation hat zum Ziel, einem bestimmten Schwerpunktprofilthema, das für den Standort charakteristisch ist und hier eine Zukunft hat, ein konkretes Umfeld zu geben. Im Falle Freiburgs ist dieses Thema die Nachhaltigkeit. Das Leistungszentrum bringt die Grundlagenforschung der unterschiedlichen Fakultäten der Universität mit der angewandten Forschung der fünf Fraunhofer-Institute in Freiburg zusammen. Im Leistungszentrum laufen bereits zwölf Pilotprojekte, die jeweils

Kooperationen zwischen mindestens einem Universitätsinstitut und einem Fraunhofer-Partner beinhalten und gemeinsam vom Land Baden-Württemberg und der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert werden. Das INATECH ist eines von drei Instituten an der Technischen Fakultät der Universität Freiburg. Bisher setzte sich diese aus dem Institut für Mikrosystemtechnik und dem Institut für Informatik zusammen. An diesem neuen Institut beschäftigen wir uns mit nachhaltigen Ingenieursystemen. Damit ist ein Institut entstanden, das eine neue universitäre Heimat für jene Bereiche bietet, zu denen die fünf Fraunhofer-Institute forschen. Institutionell äußert sich das zum einen darin, dass Institutsleiterstellen in Personalunion an die Uni angebunden werden können, wie eben in meinem Fall. Zum anderen werden Professuren aus den Forschungsgebieten unserer Institute ausgeschrieben, wodurch die thematische Anbindung an die Universität noch näher wird. Das heißt, auch das INATECH ist wie das Leistungszentrum eine Kooperation von Universität und Fraunhofer. Das schlägt sich auch darin nieder, dass die geplanten 14 Professuren je zur Hälfte über die Uni und über Fraunhofer finanziert werden.

**Frage:** Welche Rolle spielt das EMI in diesem Dreieck von universitärem Institut, Leistungszentrum und der Fraunhofer-Gesellschaft? Wo sehen Sie sich selbst darin?

**Antwort:** Das EMI ist das letzte der fünf Fraunhofer-Institute in Freiburg, das eine offizielle Anbindung an die Universität Freiburg gefunden hat. Das ist für das EMI von außerordentlicher Bedeutung. Die Möglichkeiten des gegenseitigen Austauschs, sowohl inhaltlich als auch personell, sind gar nicht hoch genug einzuschätzen. Masterandinnen und Masteranden sowie Doktorandinnen und Doktoranden können gezielt am EMI forschen.

Die Anbindung an die Universität bietet aber auch für unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die zusätzlich oder nach einer Stelle am EMI auch in der Lehre tätig werden wollen, neue Karrierepfade. Die Personalunion als Professor eines Lehrstuhls und Leiter eines Fraunhofer-Instituts macht es darüber hinaus möglich, öffentlich finanzierte Projekte künftig in engem Austausch mit einem universitären Institut durchzuführen. Das ist eine Bereicherung für das EMI. Doch die Personen, die diese Personalunion ausfüllen, sind weder eins zu eins zu vergleichen mit einem Hochschulprofessor, der nur an einem Lehrstuhl tätig ist, noch mit einem Institutsleiter, wie wir ihn in Klaus Thoma erlebt haben. Diese doppelte Verpflichtung bedeutet, dass es zusätzlicher und neuer Strukturen bedarf, angefangen von Stellvertretern, Leitungsbüros und Abteilungsleitern sowie Lehrstuhlmanagern, die den Betrieb am Institut und Lehrstuhl sicherstellen und koordinieren. Nur so bleibt diese Form der Personalunion auch durchführbar.

**Frage:** Was genau lehren Sie am INATECH, und was ist das Neue, das Sie mit diesem dritten Institut in die Forschung einbringen?

**Antwort:** Das dritte Institut beschäftigt sich mit der Nachhaltigkeit technischer Systeme. Damit wirft es in Freiburg einen ganz neuen Aspekt auf, weil wir jetzt Themen erforschen und in die Lehre bringen, die konkrete nachhaltige Ingenieurösungen betreffen. Wir sehen uns an, was wirklich nachhaltig an einer Idee ist, die zum Beispiel die Elektrifizierung der Automobilität betrifft. Ist es wirklich nachhaltig, wenn wir in Zukunft batteriebetriebene Elektrofahrzeuge produzieren, verkaufen und nutzen? Welche Aspekte muss man bedenken, damit die Entwicklung solcher Fahrzeuge wirklich nachhaltig ist? Wie viel Energie und welchen CO<sub>2</sub>-Ausstoß produziert man, wenn man einen gewissen Prozentsatz an Autos elektromobil machen will? Welche Ressourcen benötigen wir? Werden kritische Materialien eingesetzt, deren Vorkommen knapp ist oder deren vorwiegende Abbauländer politische und soziale Randbedingungen aufweisen, die wir als kritisch betrachten müssen? Solche und weitere Aspekte fließen in die Bewertung der Nachhaltigkeit einer Ingenieurlösung ein. Das Gleiche gilt für künftige Formen der Energiebereitstellung. Wie kann man die vorhandene und im weiteren Ausbau befindliche Nutzung von erneuerbarer Energie noch besser und nachhaltiger machen? Wie kann man durch neue Speichersysteme, durch intelligente Netze, durch die Mischung aus zentralen und dezentralen Methoden die Nachhaltigkeit in der Energieversorgung optimieren? Und wir wollen uns anschauen, wie man diese auf Ingenieurentwicklung basierenden Systeme, die der Gesellschaft dienlich sind, konstruiert. Systeme, die uns transportieren, uns beheimaten, uns Arbeitsraum und alle Formen von Annehmlichkeiten bieten, die wir im täglichen Leben gewohnt sind: Wie stellen wir sicher, dass diese Produkte und Systeme im Falle einer Naturkatastrophe, eines technischen Versagens, eines Fehlverhaltens oder im Falle eines Anschlags innerhalb kürzester Zeit wieder betriebsbereit sind? Diesen Aspekt der sogenannten Resilienz als einen wichtigen weiteren Aspekt der Nachhaltigkeit zu betrachten und in die Forschung zu integrieren ist jedenfalls in Freiburg etwas ganz Neues, das gerade auch für zukünftige

Generationen von Studentinnen und Studenten interessant sein kann. Wir werden ab dem Wintersemester 2016/2017 den englischsprachigen Masterstudiengang Sustainable Systems Engineering anbieten, der diese Aspekte reflektiert und damit ein Alleinstellungsmerkmal birgt. Denn Nachhaltigkeit ist zwar ein Thema, das weltweit bisher in verschiedensten Fachrichtungen erforscht und unterrichtet wird, aber die Nachhaltigkeit von Ingenieurlösungen, also das konkrete Einbringen des Aspekts Nachhaltigkeit in die Ingenieurplanung, gibt es weltweit selten. Hinsichtlich der Resilienz existiert dieser Ansatz dort, wo die Probleme schon konkret wurden, also etwa in New York oder Tokio, aber zukünftig eben auch in Freiburg.

**Frage:** Lassen Sie uns nun über das Leistungszentrum Nachhaltigkeit sprechen. Das Leistungszentrum in Freiburg soll auch den Standort stärken. Was genau passiert hier für die Region?

**Antwort:** Die Forschung, die das EMI gemeinsam mit der Albert-Ludwigs-Universität zum Thema Nachhaltigkeit im Leistungszentrum betreibt, hat natürlich das Ziel, dass sie auch industrielle Umsetzung findet. Durch die Zusammenarbeit mit sogenannten Ankerpartnern aus der Industrie wollen wir die Wirtschaft in die Forschung einbinden. Die für das Leistungszentrum relevante Region heißt Baden-Württemberg. Deshalb sind unsere Partner auch große baden-württembergische Unternehmen wie Daimler, Bosch, Endress und Hauser und weitere Firmen aus dem Bundesland. Darüber hinaus haben wir auch Kontakte zum Wirtschaftsverband Industrieller Unternehmen Baden und zur Industrie- und Handelskammer aktiviert und sind inzwischen wiederholt im Austausch mit kleineren und mittelständischen Unternehmen aus der engeren Region. Ziel ist es, das Leistungszentrum für KMUs überhaupt erst einmal bekannt und attraktiv zu machen. Formen der Zusammenarbeit mit einem großen Forschungsinstitut mögen auf den ersten Blick kaum erkennbar sein. Daher müssen wir vonseiten der Forschung ganz konkrete Möglichkeiten der

Kooperation ersichtlich machen und zeigen, wie man unsere Forschungsarbeiten konkret im Betrieb verwerten kann.

**Frage:** Und gibt es auch Projekte des Leistungszentrums, die man konkret in Freiburg sehen kann?

**Antwort:** Ja, das Leistungszentrum kooperiert mit der Stadt Freiburg. Diese hat vor, in naher Zukunft das Thema Nachhaltigkeit in der Planung eines neuen Quartiers sowie in der Planung künftiger Mobilität in der Stadt miteinzubeziehen. Insofern wird die Nachhaltigkeitsforschung im Leistungszentrum insgesamt auch für die Bürgerinnen und Bürger Freiburgs spürbar werden.

**Frage:** Das Besondere am Leistungszentrum ist unter anderem seine Inter- und Transdisziplinarität. Wie gestaltet sich diese fachübergreifende Zusammenarbeit von Technik- und Naturwissenschaften auf der einen und Geistes- und Sozialwissenschaften auf der anderen Seite?

**Antwort:** Für die Forschung im Bereich Nachhaltigkeit ist eine interdisziplinäre, holistische Herangehensweise elementar. Nachhaltigkeit ist per se ein Thema, das nicht nur die Natur, sondern auch die Gesellschaft betrifft. Auch die ökonomischen Aspekte sind relevant. Nur wenn alle diese Aspekte berücksichtigt werden, kann man in einem Entwicklungsprozess tatsächlich nachhaltig werden. Im Lenkungskreis des Leistungszentrums haben wir von Anfang an die unterschiedlichen Fakultäten integriert. In der Ausschreibung für die Pilotprojekte haben wir zur Bedingung gemacht, dass die Anträge einen interdisziplinären Charakter haben. Durch Kooperationen innerhalb der Pilotprojekte haben sich gemeinsame Themen manifestiert. So arbeiten beispielsweise im Pilotprojekt »Bio-inspirierte selbstreparierende Werkstoffe für eine nachhaltige Entwicklung«, bei dem es um die Untersuchung von Selbstreparaturprozessen bei ausgewählten Pflanzenarten geht, Biologen der Universität mit Ingenieuren des Fraunhofer EMI zusammen. Dabei war es nicht einmal nur so, dass



immer nur vonseiten der Technik- und Naturwissenschaftler Anträge kamen, die dann Sozialwissenschaftler mit an Bord genommen haben. Auch vonseiten der Rechtswissenschaften und der Ökonomie kamen Vorschläge, wie man zusammenarbeiten könnte. Das hat uns in der Zuversicht bestärkt, dass wir gemeinsame Forschungsprojekte zum Thema Nachhaltigkeit machen können und gerade diese interdisziplinäre Ausrichtung relevant und effizient ist.

**Frage:** Wie passt die anwendungsorientierte Forschung der Fraunhofer-Institute mit der eher theoretischen Ausrichtung der Universität zusammen?

**Antwort:** Grundlagenforschung ist die Basis für die Entwicklung jeder neuen Anwendung, so dass der theoretische Hintergrund der Universität so wichtig ist. Dabei darf man aber nicht vergessen, dass bei Fraunhofer die Grundlagenforschung ebenso zu Hause ist. Man braucht sie, um für die Industrie interessant zu sein und mehr leisten zu können als etwa ein Ingenieurbüro, das vorhandenes Wissen nur aufgreift. Umgekehrt ist auch aufseiten der Universität die Anwendung nicht so fremd, wie man vielleicht annehmen würde. Gerade an der Technischen Fakultät ist es gang und gäbe, dass die Professoren auch die Anwendbarkeit ihrer Forschung nachweisen. Das wird an den Universitäten mehr und mehr zu einem Bewertungsfaktor. An der Technischen Fakultät in Freiburg ist gerade die Anwendungsreife und Anwendungsnähe extrem gut ausgeprägt. Insofern passen Fraunhofer und Universität sehr gut zusammen.

**Frage:** Wie sind Ihre Erfahrungen mit den Studierenden? Woher kommen sie?

**Antwort:** Die Studierenden, die meine Vorlesungen besuchen, sind unglaublich interessiert und lassen sich sogar auf ein manchmal so unscharfes Thema wie Nachhaltigkeit sehr gern ein. Ich habe zum Beispiel in einer meiner

Vorlesungen zu nachhaltigen Werkstoffen Studierende aus unterschiedlichsten Bereichen. Da sitzen Studierende der Chemie, der Materialwissenschaften, Mikrosystemtechnik und Geologie, die Gruppe ist also sehr heterogen. Ich habe in der Vorlesung aber auch einen extrem ausgewogenen Anteil an Frauen und Männern. Die Studierenden sind von unterschiedlichster Nationalität. Etwa die Hälfte ist deutsch, aber wir haben auch Studentinnen und Studenten aus Asien. In einer englischsprachigen Vorlesung spiegelt sich das internationale Interesse sehr gut wider.

**Frage:** Wenn Sie einen Blick in die Zukunft werfen könnten, was erhoffen Sie sich zu sehen? Was ist Ihre Vision für das INATECH, für das Leistungszentrum, das EMI und auch für Ihr Engagement im Bereich der Nachhaltigkeit?

**Antwort:** Für das Leistungszentrum erhoffe ich mir, dass wir durch den holistischen Ansatz erfolgreich mit der Industrie kooperieren. Gerade für die großen Unternehmen sollen wir attraktiv werden. Es soll für sie ersichtlich werden, wie gewinnbringend es ist, ein Großvorhaben nicht an einzelne Institutionen, sondern an ein Leistungszentrum zu vergeben, das international renommiert ist und an dem Nachhaltigkeit ganzheitlich erforscht wird. Ich wünsche mir, dass man die Stadt Freiburg mit Nachhaltigkeit in Forschung und Lehre verbindet, dass dazu Studierende aus der ganzen Welt speziell an das INATECH kommen, wo wir nachhaltige Ingenieurlösungen verfolgen. Für das EMI ist es mein Traum, dass wir ausreichend und kontinuierlich neue Forschungsthemen haben. Ich wünsche mir, dass wir einen Austausch leben, dass ich den Menschen am EMI immer neue Möglichkeiten bieten kann, sich in der Lehre und der Forschung auf universitärer Seite zu engagieren. Umgekehrt möchte ich jungen Menschen, die an der Technischen Fakultät studieren, die Möglichkeit bieten, Fraunhofer kennenzulernen und die unglaubliche Vielfalt dessen, was wir hier realisieren können.

# INHALTSVERZEICHNIS

## ERNST-MACH-INSTITUT

Unser Angebot, unsere Ausstattung.....	12
Leistungsangebot der Geschäftsfelder.....	14
Ansprechpartner .....	16
Standorte .....	18
Kuratorium.....	20
Zahlen und Fakten .....	22
Die Fraunhofer-Gesellschaft.....	24

## FORSCHUNG

Impaktphysik .....	30
Experimentelle Ballistik .....	46
Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz.....	64
Werkstoffdynamik.....	76
Mikrostrukturdynamik.....	88
Systemlösungen .....	100

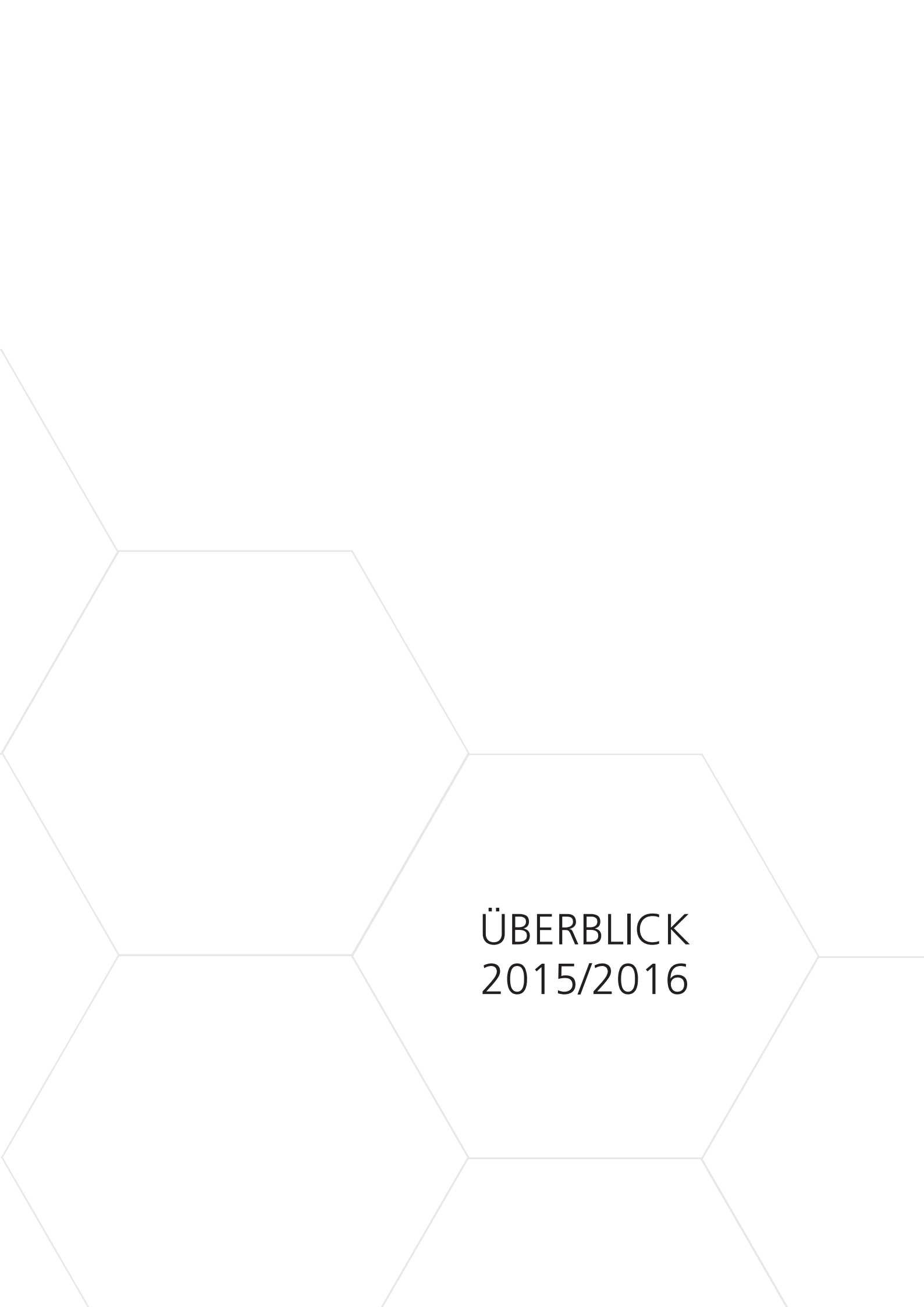
## WISSENSCHAFTLICHES NETZWERK

Verbünde, Allianzen und Kooperationen .....	114
Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg .....	116
Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS .....	118
Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS.....	120
Spitzencluster Elektromobilität Süd-West.....	122
Clean Sky .....	124

## AKTIVITÄTEN UND PUBLIKATIONEN

Highlights.....	128
Namen, Daten, Ereignisse .....	140
Publikationen.....	158
Wissenschaftlicher Austausch.....	162
Bildquellen.....	167
Impressum.....	169





ÜBERBLICK  
2015/2016

# UNSER ANGEBOT, UNSERE AUSSTATTUNG



*Die Geschäftsfelder des EMI (von oben im Uhrzeigersinn):  
Verteidigung, Sicherheit, Automotive, Raumfahrt und Luftfahrt.*

### **Unser Angebot**

Hausinterne Entwicklung von Prüfanlagen, Messinstrumenten, Sensoren und Computerprogrammen sowie eigene Werkstätten, ein hoher Anteil an technischem Personal und ein guter Mix aus Senior Scientists und Doktorandinnen und Doktoranden zeichnen uns aus und lassen uns flexibel auf individuelle Anforderungen eingehen.

### **Wir bieten Ihnen an**

- Prüfung und Modellierung von Werkstoffen und Bauteilen unter dynamischen Lasten
- Anwendung und Entwicklung neuer Sensoren und Messtechnik
- Einsatz und Entwicklung numerischer Berechnungsverfahren sowie maßgeschneiderter Softwarelösungen
- Experimentelle Untersuchung von Hochgeschwindigkeitsimpakt bis zu 10 000 Metern pro Sekunde
- Optimierung von Leichtbaustrukturen
- Analysen und Lösungen zur Sicherheit von Bauwerken und Anlagen

### **Unsere Ausstattung**

#### **Wir verfügen u. a. über**

- Eine in Europa einzigartige Ausstattung an Laborbeschleunigern
- Das Crashzentrum der Fraunhofer-Gesellschaft mit Möglichkeiten zum Komponenten- sowie zum Gesamtfahrzeugcrash zu Forschungszwecken
- Prüflabore mit Split Hopkinson Pressure Bar, Universal- und servohydraulischen Prüfanlagen, Fallgewichtsanlagen, Multiaxialprüfstand
- Eine Stoßrohranlage für die Untersuchung von Gebäudeelementen (Fenster, Türen, Wände) bei Druckstoßbelastungen
- Einen Freifeld-Explosionsplatz und eine Innenraum-Detonationskammer
- Eine Lasersinteranlage für Additive Manufacturing (3D-Druck)
- Exzellente Technik zur Messung, Diagnostik und Visualisierung von Hochgeschwindigkeitsprozessen
- Kommerzielle und Inhouse-Simulationssoftware
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren
- Klimakammern

# LEISTUNGSANGEBOT DER GESCHÄFTSFELDER

## GESCHÄFTSFELD VERTEIDIGUNG



- Konzeption und Analyse von Schutzmechanismen
- Numerische Simulation von Impakt- und Stoßwellenereignissen
- Materialcharakterisierung und Versagensanalyse
- Entwicklung von Sensorik und Elektronik für extreme Bedingungen, Kurzzeitmesstechnik
  - Analysen zur technischen Sicherheit und Zuverlässigkeit wehrtechnischer Systeme

## GESCHÄFTSFELD SICHERHEIT



- Schutz von Gebäuden und Infrastrukturen gegen Explosionen
- Risikoanalysen für außergewöhnliche Belastungen
- Risikomanagement für urbane Sicherheit
- Sensortechnologien für Safety- und Security-Anwendungen
- Sicherheits-, Effizienz- und Robustheitsanalysen für technische Systeme
  - Prüfung und Zertifizierung

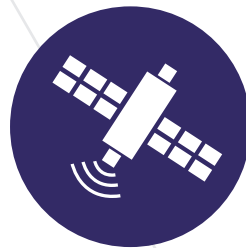
## GESCHÄFTSFELD AUTOMOTIVE



- Crashzentrum der Fraunhofer-Gesellschaft
- Charakterisierung sowie numerische Simulation und Modellierung von Werkstoffen
- Untersuchung von Crashesicherheit sowie entsprechende Optimierung von Leichtbaustrukturen
  - Sicherheit von Batterien und Energiespeichern für Elektromobilität
  - Technische Sicherheit von Fahrzeugen



## GESCHÄFTSFELD RAUMFAHRT



- Schutz von Raumfahrtsystemen
- Analyse von erdnahen Objekten
- Schutz vor Impakt erdnaher Objekte
  - Technologien (Hardware und Software) für Kleinstsatelliten

## GESCHÄFTSFELD LUFTFAHRT



- Charakterisierung von Werkstoffen
- Prüfung von Strukturen, Komponenten und Fügeverbindungen
- Modellierung und Optimierung von Leichtbaustrukturen
  - Analyse und Optimierung von Flugzeugstrukturen bei Impakt durch Hagel, Debris und Vogelschlag
  - Beschleunigungstests für Sitze, Kabinenstrukturen etc.
  - Untersuchung von Blitzschlag auf CFK-Strukturen und Entwicklung von Blitzschutz

# ANSPRECHPARTNER



**Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier**  
Institutsleiter  
Telefon 0761 2714-101  
stefan.hiermaier@emi.fraunhofer.de



**Sarah Gnädinger**  
Referentin des Institutsleiters  
Telefon 0761 2714-100  
sarah.gnaedinger@emi.fraunhofer.de



**Dr. Tobias Leismann**  
Stellvertretender Institutsleiter  
Geschäftsfeldleiter Sicherheit  
Abteilungsleiter Strategie und Kommunikation  
Telefon 0761 2714-102  
tobias.leismann@emi.fraunhofer.de



**Prof. Dr. Frank Schäfer**  
Stellvertretender Institutsleiter  
Geschäftsfeldleiter Raumfahrt  
Abteilungsleiter Systemlösungen  
Telefon 0761 2714-421  
frank.schaefer@emi.fraunhofer.de



**Dr. Manfred Salk**  
Geschäftsfeldleiter Verteidigung  
Telefon 0761 2714-120  
manfred.salk@emi.fraunhofer.de



**Dr. Jens Fritsch**  
Geschäftsfeldleiter Automotive  
Abteilungsleiter Werkstoffdynamik  
Telefon 0761 2714-472  
jens.fritsch@emi.fraunhofer.de



**Dr. Matthias Wickert**  
Abteilungsleiter Impaktphysik  
Telefon 0761 2714-384  
matthias.wickert@emi.fraunhofer.de



**Dr. Marek Dolak**  
Abteilungsleiter Experimentelle Ballistik  
Telefon 07628 9050-730  
marek.dolak@emi.fraunhofer.de



**Daniel Hiller**  
Strategisches Management  
Telefon 0761 2714-488  
daniel.hiller@emi.fraunhofer.de



**Dr. Alexander Stolz**  
Geschäftsfeldleiter Sicherheit  
Abteilungsleiter Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz  
Telefon 07628 9050-646  
alexander.stolz@emi.fraunhofer.de



**Dr. Michael May**  
Geschäftsfeldleiter Luftfahrt  
Abteilungsleiter Mikrostrukturdynamik  
Telefon 0761 2714-337  
michael.may@emi.fraunhofer.de



**Birgit Bindnagel**  
Presse und Öffentlichkeitsarbeit  
Telefon 0761 2714-366  
birgit.bindnagel@emi.fraunhofer.de



**Hanna Harter**  
Veranstaltungen  
Telefon 0761 2714-111  
hanna.harter@emi.fraunhofer.de

# STANDORTE

## Drei Standorte

Die mehr als 330 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Ernst-Mach-Instituts arbeiten gemeinsam und standortübergreifend in Freiburg, Efringen-Kirchen und Kandern. Obwohl wir räumlich getrennt sind, vereint uns eine gemeinsame Mission und Kultur, wir profitieren von den unterschiedlichen Möglichkeiten, die uns jeder Standort in seiner vielfältigen Ausstattung bietet.



### Institutsteil Freiburg

Eckerstraße 4  
79104 Freiburg  
Telefon 0761 2714-0

Sehr nahe an Freiburgs historischer Altstadt arbeiten hier Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Verwaltung, in der feinmechanischen Werkstatt, dem Elektronik-Labor, den Prüflabors und in den wissenschaftlichen Abteilungen. Im Institutsteil Freiburg steht die Space Gun, der schnellste Beschleuniger des Instituts, an dem Untersuchungen zum Einschlag von Meteoriten durchgeführt werden.



Weitere Informationen finden Sie unter [www.emi.fraunhofer.de](http://www.emi.fraunhofer.de)



### **Institutsteil Efringen-Kirchen**

Am Klingelberg 1  
79588 Efringen-Kirchen  
Telefon 07628 9050-0

Am Institutsteil Efringen-Kirchen, 16 Kilometer nördlich von Basel, forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem an Fragen zu baulichem Schutz und Sicherheitstechnologien. Auf dem großen Institutsgelände steht die Stoßrohranlage »BlastStar«, die größte Versuchsanlage des EMI, an der wir Fassadenelemente von drei auf drei Metern prüfen können.

Das Crashzentrum der Fraunhofer-Gesellschaft mit der Forschungs-crashanlage und der Komponentencrashanlage ist ebenfalls hier beheimatet.



### **Institutsteil Kandern**

Am Christianswuh 2  
79400 Kandern  
Telefon 07626 9157-0

Am Standort Kandern befindet sich unter anderem der größte Leichtgasbeschleuniger des Instituts mit zahlreichen Labors und Versuchseinrichtungen zur Bearbeitung von Aufgabenstellungen aus dem Verteidigungsbereich. Spezielle Prüfstände ermöglichen hier die Untersuchung geladener und ungeladener Batteriesysteme beim Crash.

# KURATORIUM



*Das Kuratorium des Ernst-Mach-Instituts bei seiner Sitzung im Juni 2015.*

**Die Kuratorien der einzelnen Fraunhofer-Institute stehen der Institutsleitung und dem Vorstand der Gesellschaft beratend zur Seite. Das Kuratorium fördert die Kontakte des Instituts zu Organisationen und zur Industrie.**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken  
Leiter des Instituts für Mechanik und Statik,  
Universität der Bundeswehr München

MinR Dr. rer. pol. Ehrentraud Graw  
Referatsleiterin 73: Automobil- und Produktionsindustrie,  
Logistik, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft  
Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr.-Ing. Michael Holzner  
Geschäftsführer iCONDU GmbH, Ingolstadt

Thomas Homberg  
Geschäftsführer MBDA Deutschland GmbH,  
Schrobenhausen

Dr. Wolf-Hendrik Junker  
Referatsleiter 522: Sicherheitsforschung,  
Bundesministerium für Bildung und  
Forschung, Bonn

Brigadegeneral Erich Könen  
Abteilungsleiter Kampf, Bundesamt für Aus-  
rüstung, Informationstechnik und Nutzung der  
Bundeswehr, Koblenz

Dr. Rainer Kroth  
Geschäftsführer Ressort Entwicklung/Produktion, Diehl  
BGT Defence GmbH & Co.KG, Überlingen

Prof. Dr. Gunther Neuhaus  
Vizekanzler/Prorektor für Forschung, Albert-Ludwigs-  
Universität Freiburg

Armin Papperger (Vorsitz)  
Vorstandsvorsitzender Rheinmetall AG, Düsseldorf

Prof. Dr. Wolf Uwe Reimold  
Professor für Mineralogie und Petrografie, Leiter der  
Abteilung für Forschungsinfrastruktur, Museum für Natur-  
kunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitäts-  
forschung, Berlin

Dr. Herbert Scholles  
Geschäftsführer ADS – Gesellschaft für aktive Schutz-  
systeme mbH, Lohmar

Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg  
Director Passive Safety/Durability/Vehicle Functions,  
Daimler AG, Mercedes-Benz Cars Development,  
Sindelfingen

Dr. Gerhard Schwehm  
Director of the Scientific Member Planetary Protection,  
ESTEC, SRE-OOR, Rosetta Mission Manager,  
Noordwijk ZH, Niederlande

MinR Dipl.-Ing. Norbert Michael Weber  
Referatsleiter AIN II2, Bundesministerium der Verteidigung,  
Bonn

Dr. Rolf Wirtz  
Sprecher der Geschäftsführung ATLAS Elektronik GmbH,  
Bremen

# ZAHLEN UND FAKTEN



*Einpassen der Stahlfachwerkträger, die den zukünftigen Verbindungsbau tragen werden.*



## **Das Institut – Zahlen, Ziele und Entwicklungen**

Seien es die Mitarbeiterzahlen, die Personalentwicklung oder das Institutsgelände des Fraunhofer EMI – im Jahr 2015 hat sich am Ernst-Mach-Institut einiges getan.

### **Haushalt**

Das Jahr 2015 schloss das Institut mit einem Rekordhaushalt von 27,3 Millionen Euro ab. Davon entfielen 23,4 Millionen Euro auf den Betriebshaushalt und 3,9 Millionen Euro auf laufende Investitionen. Mit einem Industrieertragsanteil von 27,1 Prozent konnten wir uns im Vergleich zum Vorjahr steigern. Unverändert hoch ist der Ertragsanteil von Projekten, die durch die EU gefördert werden: Hier liegen wir bei 29 Prozent.

### **Mitarbeiterzahlen**

Mit 332 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern waren im Vergleich zum Vorjahr insgesamt mehr Personen am EMI beschäftigt. Lediglich die Zahl der Auszubildenden am Institut ist mit 27 Personen um zehn Prozent leicht gesunken.

### **Personalentwicklung**

Neben der zahlenmäßigen Entwicklung ist auch die innere Personalentwicklung von Bedeutung. Für diesen Bereich hat sich die Institutsleitung hohe Ziele gesteckt und dafür im Jahr 2015 Sarah Gnädinger die Position der Personalentwicklungskordinatorin übertragen.

Mit dem Aufbau einer organisierten Personalentwicklung wird sichergestellt, dass das EMI wettbewerbsfähig, erfolgreich und ein attraktiver Arbeitgeber auf dem Arbeitsmarkt bleibt. Gleichzeitig trägt sie zur Motivation und Zufriedenheit der Mitarbeitenden und

Führungskräfte bei und schafft Möglichkeiten, individuelle und berufliche Wünsche zu fördern. Ziel ist es, dass sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bilden und weiterentwickeln können und Spaß an der Arbeit haben.

In diesem Sinne wurde das Jahr 2015 dafür genutzt, die strukturellen Grundlagen für den Ausbau der Personalentwicklung zu legen. Hierfür war neben Gesprächen mit den Führungskräften besonders die Mitarbeiterbefragung von Bedeutung, deren Ergebnisse im Februar vorgestellt wurden. Die Auswertung hat gezeigt, dass das EMI im Vergleich mit allen Fraunhofer-Instituten durchweg sehr gut abgeschnitten hat. Anhand der Ergebnisse werden konkrete und nachhaltige Weiterbildungsmaßnahmen für Mitarbeitende und Führungskräfte abgeleitet und das Fortbildungsportfolio des Instituts somit erweitert.

### **Bauliche Erweiterung**

Darüber hinaus darf sich das Fraunhofer EMI am Standort Freiburg auf ein neues Gebäude freuen. Die im Vorjahr beschlossene Erweiterung des Instituts in der Albertstraße 26–30 ist in diesem Jahr kontinuierlich vorangeschritten. Der Neubau wird dem Institut ca. 1300 Quadratmeter Nutzfläche einbringen und nach aktueller Planung Ende Juli 2017 fertiggestellt sein.

Auch der Institutsteil in Kändern wurde im Jahr 2015 aufgestockt. Ein Freiflugkanal wurde fertiggestellt. Außerdem ist ein neuer Testraum für ballistische Untersuchungen in Planung.

In Efringen-Kirchen wurde das Gebäude 30, im EMI bekannt als der »Nordpol«, aufgestockt. Dadurch wurde Platz für neue Büros, einen Besprechungsraum und Sozialräume geschaffen. Außerdem ist eine neue Lagerhalle im Bau, um die Lagerkapazitäten der Werkstatt zu verbessern.

# DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT



*Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft in München.*

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen über 1,8 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten.

Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.


Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten 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](http://www.fraunhofer.de)





FORSCHUNG  
2015/2016





IMPAKTPHYSIK

# IMPAKTPHYSIK

---

## EINLEITUNG

### **NEUE AUFGABENGEBIETE MIT NEUER ABTEILUNGSSTRUKTUR**

Mit der Gründung der Gruppe Lasertechnologie im Jahr 2012 hat die Abteilung Impaktphysik ein neues Forschungsgebiet aufgebaut, in dem die Prozesse eines gerichteten Energieeintrags in Werkstoffe und Materialien untersucht werden. Im Unterschied zum klassischen Impact erfolgt bei einem Laserstrahl die Einwirkung jedoch ohne Impulsübertrag und ist überwiegend durch thermische Prozesse bestimmt. Ebenso dauert die Einwirkung für die gegenwärtig im Mittelpunkt stehende hochenergetische Dauerstrichlaserstrahlung länger. Die sonst bei klassischen Impactvorgängen vernachlässigbaren Kräfte wie die Gravitationskraft können nun nicht mehr einfach übergangen werden, wenn ein Werkstoff durch die intensive Laserstrahlung entfestigt wird, aufgeschmolzenes Material abfließt und ein derartiger Prozess schließlich zu einer Perforation führt. Zusätzlich kommt chemischen Umsetzungsreaktionen eine größere Bedeutung zu.

Im Folgenden wird über die Wirkmöglichkeiten zur Neutralisierung von improvisierten Sprengsätzen berichtet, die sich ergeben, wenn intensive Laserstrahlung auf von Terroristen potenziell genutzte Sprengsätze angewendet wird. Diese Untersuchung wurde im Rahmen des EU-Sicherheitsforschungsprojekts ENCOUNTER durchgeführt. Dabei wird für den Bereich Laserwirkung insbesondere das Reaktionsverhalten von Explosivstoffen unter dem dynamischen Eintrag eines thermischen Lastprofils untersucht. Zusätzlich wurde auch die Neutralisierung von Sprengsätzen mit Räumladungen betrachtet.

Für die Laserwirkung sind verschiedene Anwendungsweisen möglich: Auf der einen Seite können Entfestigungsprozesse durch die Strahlung eines intensiven Lasers betrachtet werden, auf der anderen Seite lassen sich als Laserwirkung auch die Verbindung von Materialien zu neuen Materialien betrachten. So nutzt die Lasertechnologie zur Verbindung von Metallpulver zu festen metallischen Strukturen einen hochenergetischen Laserstrahl. Die Gruppe Lasertechnologie hat diese neue Herstellungstechnologie aufgegriffen und mit der Methodenkompetenz der numerischen Simulation und der dynamischen Werkstoff- und Bauteilprüfung in Verbindung gesetzt. Das neue Team Additive Manufacturing erforscht das Leichtbaupotenzial von 3D-gedruckten Strukturmaterialien und Bauteilen durch numerische Designoptimierung insbesondere für dynamische Lastfälle.

Dadurch kann das Ernst-Mach-Institut eine neue Forschungsdienstleistung anbieten, die in den Geschäftsfeldern Verteidigung, Automotive, Raumfahrt sowie Luftfahrt Anwendung findet und auch für kleine und mittelständische Unternehmen interessant ist. Um das große Potenzial der Vernetzung im Bereich generativer Fertigungsverfahren zu nutzen, hat das Fraunhofer EMI den Antrag auf eine Aufnahme in die Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung beantragt und wurde zum 1. Januar 2016 aufgenommen. Im Rahmen eines



mittelstandsorientierten Forschungsprojekts zur werkstoffmechanischen Bewertung von generativ hergestellten Metallbauteilen erfolgt bereits eine konkrete Zusammenarbeit mit einem Partnerinstitut der Allianz.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung wurde die organisatorische Struktur der Abteilung Impaktphysik geändert. Die Gruppe Raumfahrttechnologie wurde im Rahmen der Neuaufstellung des Instituts aus der Abteilung Impaktphysik ausgegliedert und aus ihr die neue Abteilung Systemlösungen gebildet. Hiermit verbunden, wurden die zwei kleineren Leichtgasbeschleunigungsanlagen der Abteilung Systemlösungen zugeordnet und damit auch technisch der Bereich der experimentellen Durchführung von Hypervelocity-Impaktexperimenten mit Projektilgrößen bis in den Millimeterbereich abgegeben. Hypervelocity-Impaktexperimente mit größeren Projektilen werden weiterhin von der Abteilung Impaktphysik durchgeführt. Die Möglichkeiten hierzu wurden dafür im Jahr 2015 sogar erweitert, indem das entsprechende Labor mit dem Leichtgasbeschleuniger XL in Efringen-Kirchen im Bereich der Versuchsanlage modernisiert und gleichzeitig das Gebäude saniert wurde.

Unbeeinflusst von diesen Veränderungen werden die Forschungsarbeiten der Gruppe Endballistik fortgesetzt und beispielsweise Untersuchungen zur Charakterisierung und Konditionierung des Verhaltens keramischer Schutzwerkstoffe bei Hochgeschwindigkeitsimpaktvorgängen durchgeführt.



### Dr. Matthias Wickert

Abteilungsleiter Impaktphysik

Telefon 0761 2714-384 | [matthias.wickert@emi.fraunhofer.de](mailto:matthias.wickert@emi.fraunhofer.de)

## Das EU-Sicherheitsforschungsprojekt ENCOUNTER

### Untersuchung innovativer Technologieansätze für eine sichere Entschärfung improvisierter Sprengsätze

Im Rahmen des Sicherheitsforschungsprojekts ENCOUNTER (Explosive Neutralisation and Mitigation Countermeasures for IEDs in Urban/Civil Environment) wurden innovative Technologieansätze zur sicheren Entschärfung von unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (Improvised Explosive Devices, IEDs) sowie deren Wirkungsminderung untersucht und entwickelt. Ziel war es, die Bevölkerung vor aufgefundenen Sprengsätzen, wie beispielsweise bei einem Terroranschlag, zu schützen und den für die Entschärfung bzw. Räumung zuständigen Kräften das Potenzial dieser Ansätze für eine möglichst sichere Verfahrensweise aufzuzeigen. Hierbei wurden verschiedene Szenarien, wie beispielsweise die Bombenanschläge in Madrid (2004) und in London (2005), betrachtet. Die Anschläge vom 13. November 2015 in Paris haben deutlich gemacht, dass diese Gefahr in Europa weiterhin besteht.

Zum ENCOUNTER-Konsortium gehören neben dem Fraunhofer EMI der Koordinator FOI aus Schweden, das Zentrum für Sicherheit und Gesellschaft der Universität Freiburg, die Industriepartner Tamar aus Israel und Blastech aus Großbritannien, die Universität Sheffield sowie der spanische Partner ISDEFE. Das Konsortium wurde von einer Gruppe von Entschärfungseinheiten aus verschiedenen europäischen Ländern beratend begleitet. Das ENCOUNTER-Projekt startete im September 2012 und wurde im November 2015 mit einer Abschlusspräsentation erfolgreich beendet.

Der Umfang der Aktivitäten in ENCOUNTER ist in der Grafik in Abbildung 1 gezeigt. Insgesamt wurden vier innovative Verfahren zur Entschärfung von IEDs betrachtet, welche auf verschiedenen physikalischen Prinzipien beruhen:

- Disruptor
- Räumladungen (Liquid Shaped Charges, LSC)
- Hochleistungslaser
- Hochleistungsmikrowellen

Die Anwendung von Räumladungen oder Disruptoren basiert auf einer schnellen, nicht detonativen, mechanischen Zerlegung des Sprengsatzes. Im Unterschied

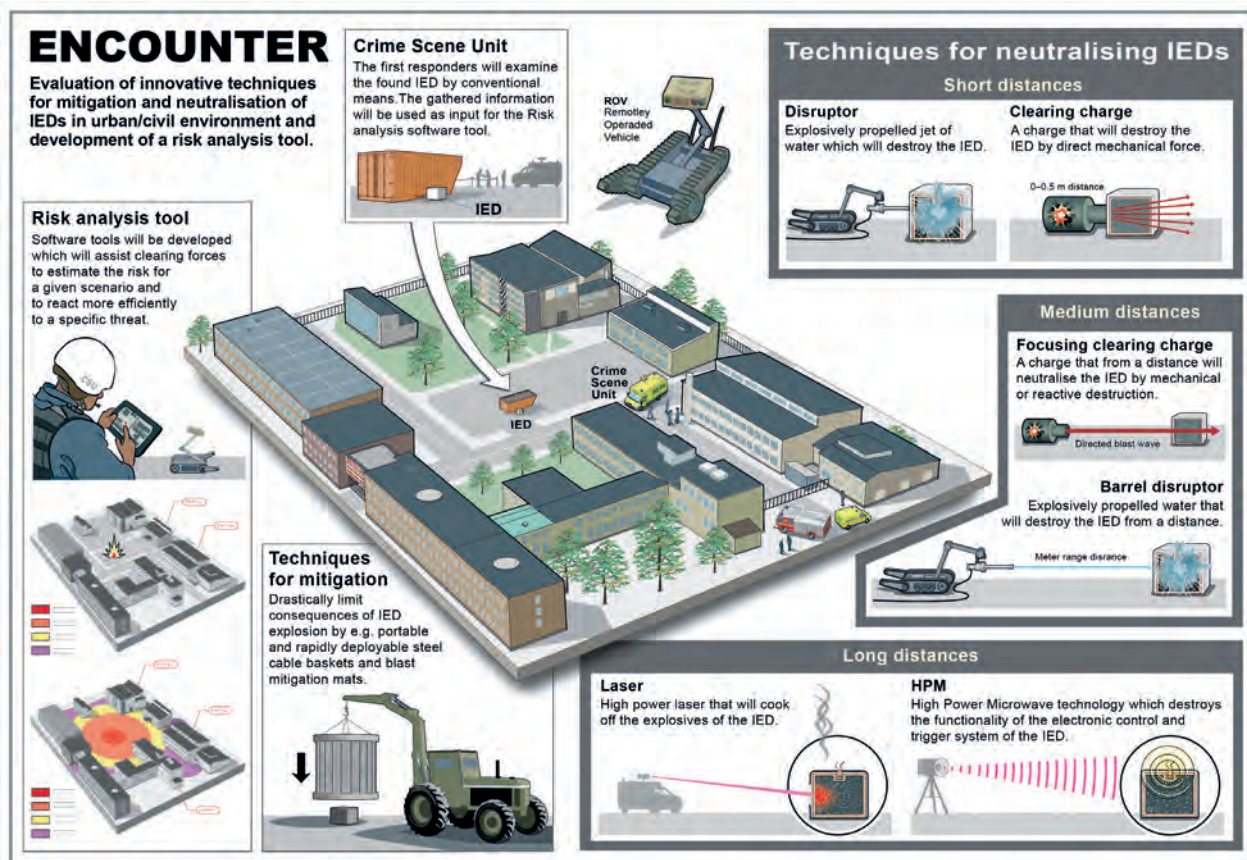
hierzu basiert der Einsatz von Hochleistungslasern auf der thermischen Wirkung der Laserstrahlung auf spezifische Komponenten eines IED, während Hochleistungsmikrowellen auf die elektronischen Komponenten eines Sprengsatzes wirken.

Neben der Entschärfung von IEDs und der Wirkungsminde- rung wurde auch ein Risikoanalysetool zur Untersuchung der Auswirkung der Detonation von Sprengkörpern in einem urbanen Umfeld entwickelt. Im hier vorgestellten Bericht werden exemplarisch einige der Ergebnisse des ENCOUNTER-Projekts zusammengefasst. Dabei konzentriert sich die Darstellung auf die Arbeiten zur Entschärfung mit Hochleistungslasern und Räumladungen, welche am Fraunhofer EMI durchgeführt wurden.

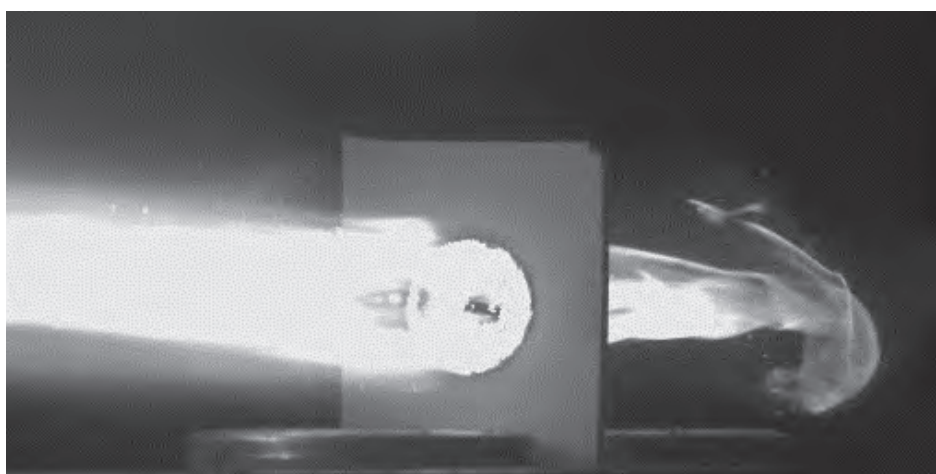
### Entschärfung von Sprengsätzen mit Hochleistungslasern

Die kontrollierte Vernichtung von Explosivstoffen ist in der Sicherheitsforschung ein wichtiges Thema und für die Entschärfung von Sprengkörpern, wie z. B. IEDs oder nicht detonierten Blindgängern aus den Weltkriegern, von besonderer Relevanz. Im Falle von Blindgängern besteht ein häufig angewandter Ansatz zur Vernichtung des Explosivstoffs darin, den Sprengkörper zunächst zu delaborieren, den freigelegten Explosivstoff anschließend in Spezialöfen aufzuheizen und einer kontrollierten Verbrennung zuzuführen. Analog dazu basiert das im Rahmen von ENCOUNTER untersuchte Funktionsprinzip zur Entschärfung von IEDs mit Hochleistungslasern auf der thermischen Einwirkung auf den Explosivstoff im bestrahlten Sprengkörper. Zur Veranschaulichung dieses Vorgangs zeigt Abbildung 2 die Aufnahme eines Explosivstoffs bei der Bestrahlung mit einer Laserleistung von drei Kilowatt. Die Bestrahlung bewirkt eine schnelle Erwärmung des Sprengstoffs an der Oberfläche im Bereich des Laserstrahls, die schließlich zu einer kontrollierten Abbrandreaktion führt.

Die Laser in der hier verwendeten Leistungsklasse sind als sehr kompakte und energieeffiziente Systeme kommerziell erhältlich und werden in erster Linie für industrielle Anwendungen, wie etwa zum Schweißen oder Schneiden von Metallen, eingesetzt. Die Möglichkeit, mit dem Laser Energie in gebündelter Form auch über große Entfernungen transportieren zu können, macht ihn aber auch für die hier dargestellte Anwendung zur Entschärfung von Sprengsätzen interessant. Dabei trägt der Einsatz des Lasers



1 FP7-Projekt ENCOUNTER zur Erhöhung der Sicherheit für Räumungskräfte und Bevölkerung im Falle eines terroristischen Anschlags durch innovative Methoden zur Entschärfung von Sprengsätzen, zur Wirkungsminderung (Mitigation) sowie einer softwarebasierten Risikoanalyse (Risk Analysis Tool).



2 Initiierung eines kontrollierten Abbrands einer Explosivstoffschicht durch Lasereinwirkung. Der Laser tritt von links ein und perforiert dabei die Probe.

aus einem großen Abstand zur Erhöhung der Sicherheit des Einsatzpersonals bei und ermöglicht auch ein schnelles Eingreifen in zeitkritischen Situationen.

Die Herausforderung für die Anwendung des Lasers zur Entschärfung von IEDs besteht nun darin, dass die hier zugrunde liegenden hohen Sicherheitsstandards sowohl im Hinblick auf die Einwirkung auf den Sprengsatz als auch auf die Strahlausbreitung erfüllt werden müssen. Daher war es ein wichtiges Ziel des ENCOUNTER-Projekts, die Vorgänge bei der Anwendung des Lasers experimentell zu charakterisieren und mögliche Risiken zu identifizieren. Hierbei musste insbesondere berücksichtigt werden, dass bei realen IEDs der Sprengsatz durch eine Transportvorrichtung bzw. durch eine Umhüllung verdeckt ist. Der Laser muss also zunächst auf verschiedene Komponenten des IED einwirken, bevor ein Abbrand der Sprengladung initiiert werden kann. Darüber hinaus können auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komponenten des Sprengsatzes auftreten. Dieser Umstand wird in Abbildung 3 verdeutlicht, welche die Situation bei der Bestrahlung einer Rohrbombe darstellt, die in einem Koffer versteckt ist.

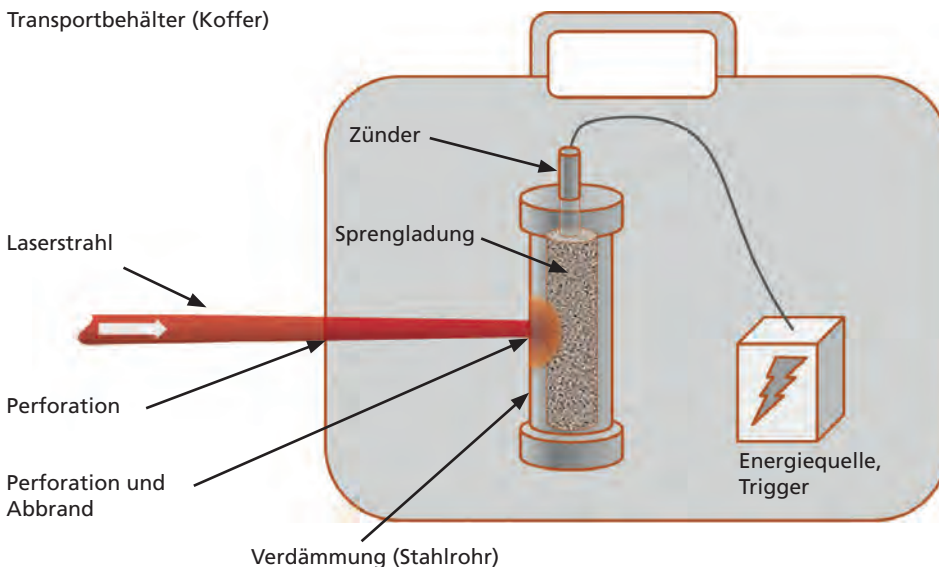
Im Beispiel in Abbildung 3 wird in einem ersten Schritt mit dem Laser zunächst ein Loch in den Koffer »gebohrt«. Alternativ kann auch der Laserstrahl so über den Koffer geführt werden, dass ein größerer Bereich herausgeschnitten

wird. Im nächsten Schritt erfolgt die Einwirkung des Lasers auf das Stahlrohr, das für den Explosivstoff eine Verdämmung darstellt. Der genaue Ablauf der dabei auftretenden Prozesse wurde in Abhängigkeit von den Laserparametern, von den Eigenschaften der Verdämmung sowie vom verwendeten Explosivstoff untersucht. Eine wichtige Zielsetzung des ENCOUNTER-Projekts bestand darin, die dabei auftretenden Prozesse möglichst kontrolliert zu steuern und eine Umsetzung der Sprengladung ohne Detonation zu erreichen.

Zur Untersuchung dieser Vorgänge wurde für das ENCOUNTER-Projekt eine Laborumgebung eingerichtet, die eine Bestrahlung von Sprengsätzen mit einer Laserleistung von bis zu zehn Kilowatt ermöglicht. Der Einsatz moderner Hochgeschwindigkeitsmesstechnik, wie z. B. Hochgeschwindigkeitskameras und Röntgenblitzanlagen, ermöglicht eine genaue Analyse der bei der Entschärfung auftretenden Prozesse und eine quantitative Charakterisierung möglicher Risiken. Für die Versuche wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Arten von IEDs mit einem breiten Spektrum von Explosivstoffen hergestellt und mit dem Laser entschärft.

Als Beispiel zeigt Abbildung 4 ein Foto einer Rohrbombe vor und nach der Einwirkung durch den Laser. Das IED besteht aus einem Stahlrohr, welches mit dem Sprengstoff ANFO (ammoniumnitrathaltiger Explosivstoff,

Transportbehälter (Koffer)



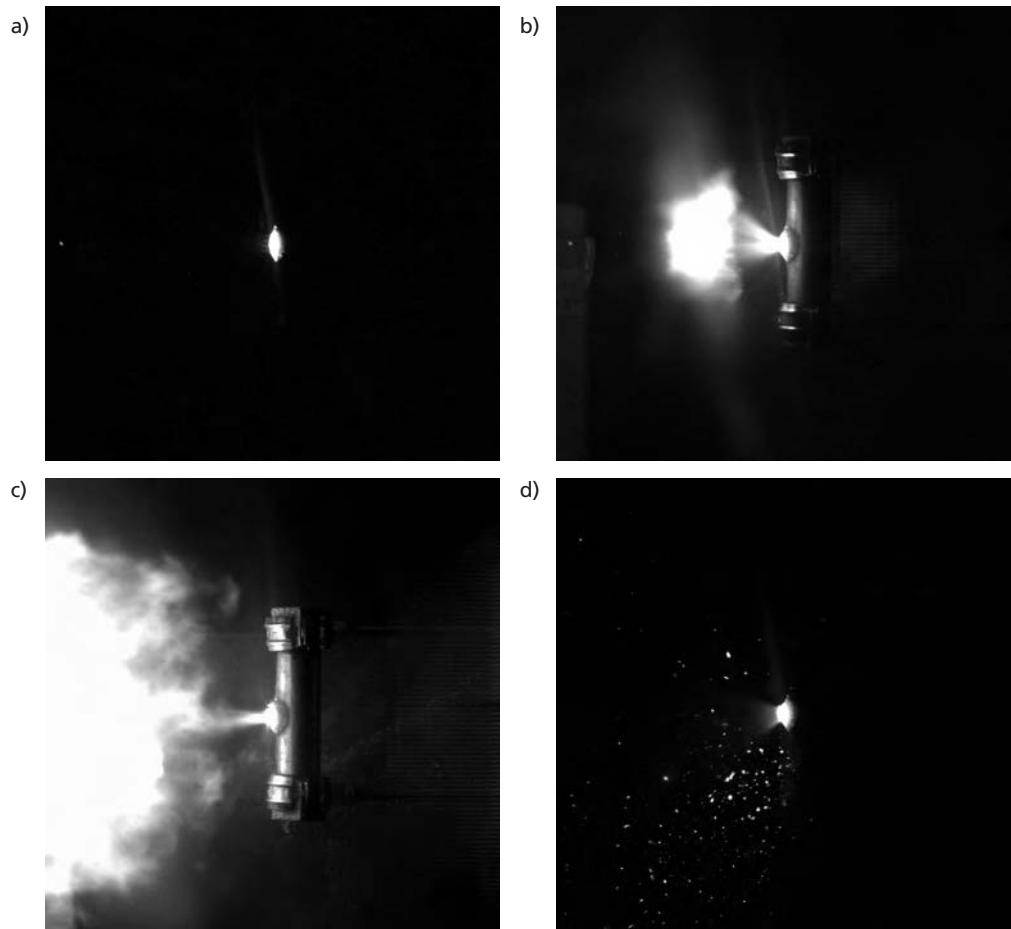
3 Mit einem Laserstrahl können Umhüllungen zunächst geöffnet werden, bevor der eigentliche Sprengsatz neutralisiert wird.

englisch: Ammonium Nitrate Fuel Oil) gefüllt und anschließend an beiden Enden mit Stahlkappen verschlossen worden ist. Zur Entschärfung wurde das Stahlrohr an mehreren Positionen mit dem Laser bestrahlt und perforiert. Dabei konnten ein vollständiger und kontrollierter Abbrand des Sprengstoffs erreicht und damit die sichere Entschärfung durchgeführt werden.

Die Vorgänge während der Bestrahlung des IED sind auch in der Bildsequenz der Hochgeschwindigkeitsaufnahme in Abbildung 5 dargestellt. Die Bilder zeigen das Aufschmelzen (a) und die Perforation (b und c) des Stahlrohrs, gefolgt vom Abbrand des Explosivstoffs (d).



4 Rohrbombe vor (a) und nach (b) Entschärfung durch einen Hochleistungslaser mit vollständigem Abbrand des Explosivstoffs.



5 Entschärfung einer Rohrbombe durch einen von links kommenden Infrarotlaserstrahl in der Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitskamera: a) Aufschmelzen des Stahlmantels, b) und c) Perforation der Verdämmung sowie Austritt von Reaktionsgasen und d) kontrollierter Abbrand des Explosivstoffs.

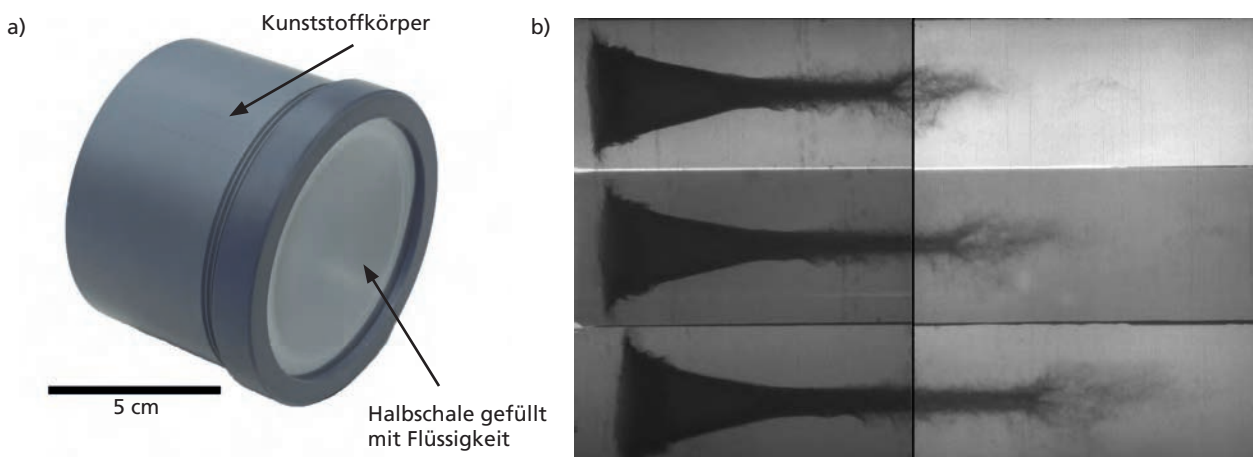
**Neutralisierung von Sprengsätzen mit Räumladungen**

Während der Einsatz des Lasers auf der thermischen Einwirkung auf ein IED beruht, basiert die Wirkung von Räumladungen auf der schnellen Zerlegung des Sprengsatzes durch mechanische Einwirkung. Die von der Nachbarabteilung Experimentelle Ballistik entwickelte Liquid Shaped Charge (LSC) wurde bereits im Bereich der Kampfmittelräumung eingesetzt. Im Rahmen des ENCOUNTER-Projekts wurde deren Potenzial für die Entschärfung improvisierter Sprengsätze untersucht.

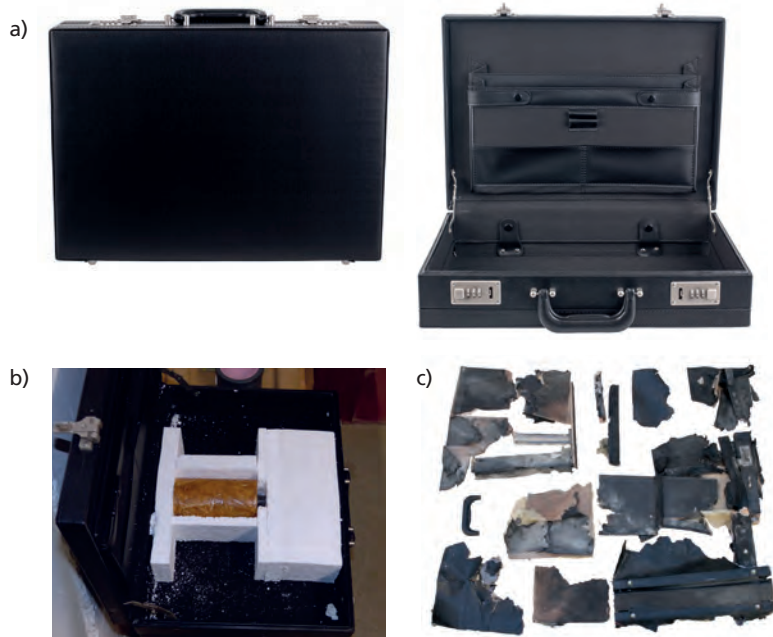
Ein Foto einer LSC ist in Abbildung 6 a) dargestellt. Die LSC besteht aus einem Kunststoffkörper mit einer halbkugelförmigen Öffnung. In der Öffnung befinden sich eine Schicht eines Explosivstoffs sowie eine Flüssigkeit, wie z. B. Wasser, die durch eine Folie auf der Vorderseite der Ladung abgedichtet wird. Die Initiierung der Räumladung erfolgt durch einen Zünder, der von hinten in dem Kunststoffkörper angebracht wird, und durch eine Übertragungsladung.

Die Zündung führt zur Ausbildung eines schnellen Flüssigkeitsstrahls. Dieser Vorgang ist auch auf den Aufnahmen in Abbildung 6 b) zu erkennen. Dabei handelt es sich um Röntgenblitzaufnahmen, die mit unterschiedlichen Verzögerungen in Bezug auf die Zündung der Ladung aufgenommen wurden. Mit dieser Methode kann die Entstehung des Flüssigkeitsstrahls untersucht und dessen Geschwindigkeit bestimmt werden. Typische Werte für die Strahlspitzengeschwindigkeiten liegen zwischen 2000 Metern pro Sekunde und 2700 Metern pro Sekunde.

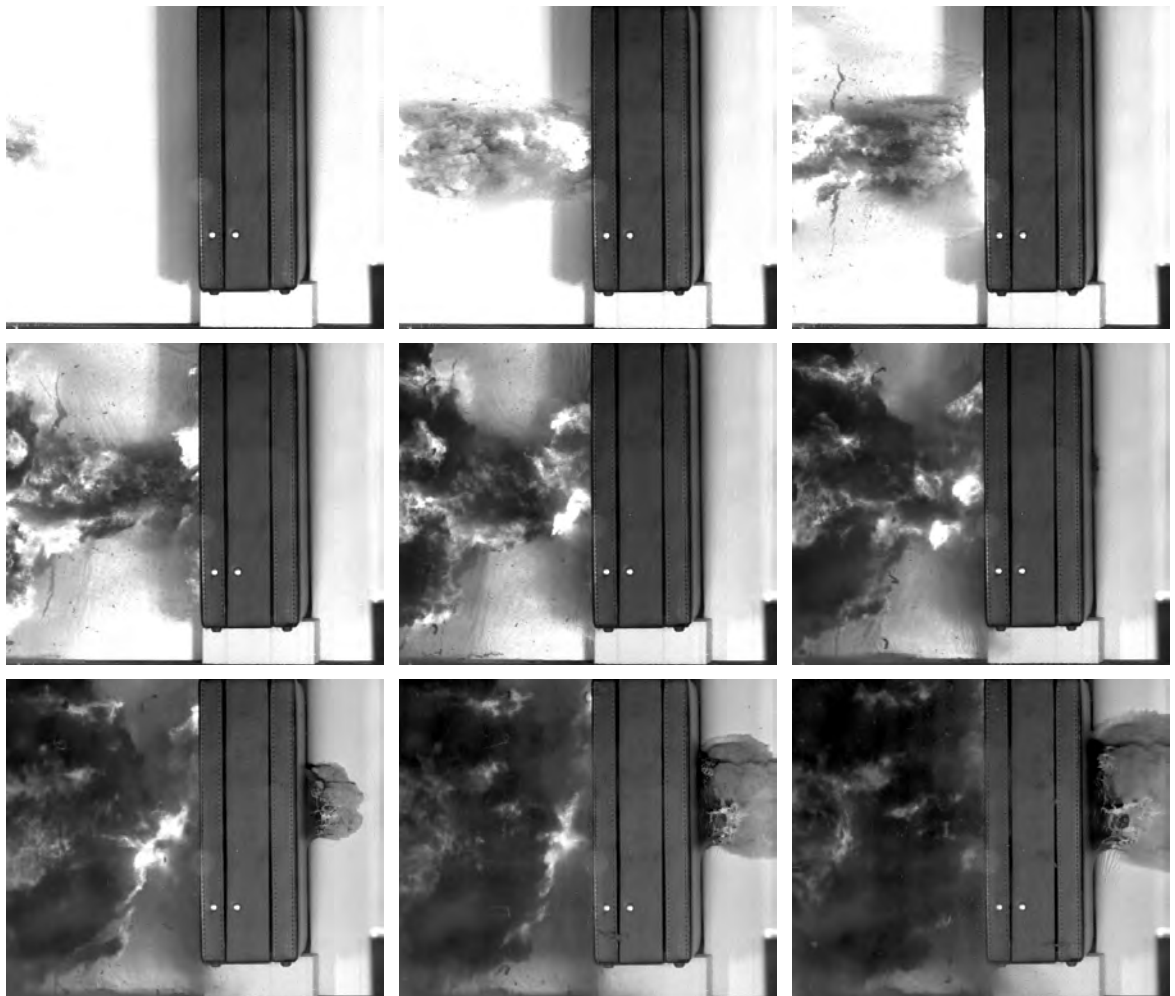
Analog zum Vorgehen beim Laser wurde eine Laborumgebung aufgebaut, in der die Wirkung der LSC auf verschiedene Typen von IEDs mit unterschiedlichen Arten von Sprengladungen systematisch untersucht wurde. Als Beispiel werden hier die Ergebnisse der Entschärfung einer Kofferbombe vorgestellt. Dazu wurde ein Sprengsatz mit einer Explosivstoffladung, bestehend aus einem Kilogramm TNT, in einem Aktenkoffer platziert. Dies ist in den Abbildungen 7 a) und b) dargestellt. Für die Entschärfung wurde die Räumladung so angeordnet, dass der Wasserstrahl die Sprengladung zentral trifft. Durch die Räumladung konnte eine schnelle Zerlegung des Sprengsatzes ohne Detonation und damit eine erfolgreiche Neutralisation erreicht werden. Abbildung 7 c) zeigt die Fotos der Kofferbombe nach der erfolgreichen Räumung. Die Vorgänge bei der Einwirkung des Flüssigkeitsstrahls auf den Sprengsatz sind in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Abbildung 8 zu erkennen.



6 a) Bild einer Liquid Shaped Charge (LSC). b) Entstehung des hyperschnellen Flüssigkeitsstrahls in einer Dreikanalröntgenblitzaufnahme.



7 Beispiel für den erfolgreichen Einsatz einer Räumladung bei der Entschärfung einer Kofferbombe. a) Aktenkoffer vor dem Versuch. b) Präparierung des Koffers mit einer improvisierten Sprengladung. c) Überreste des Koffers nach der erfolgreichen Entschärfung.



8 Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitskamera zur Entschärfung eines Sprengsatzes in einem Koffer mit einer LSC.

### Fazit und Ausblick

Im Rahmen des ENCOUNTER-Projekts wurde der Einsatz von vier innovativen Verfahren zur Entschärfung von improvisierten Sprengsätzen betrachtet. Speziell am EMI wurde die Entschärfung von unterschiedlichen Typen von IEDs, wie z. B. Rohrbomben oder Sprengsätzen in Koffern, mit Hochleistungslasern und Räumladungen untersucht. Auf der Grundlage dieser Arbeiten konnten mögliche Risiken bei der Entschärfung identifiziert und Empfehlungen für den Einsatz der Verfahren in spezifischen Szenarien gegeben werden. Mitglieder von Einsatzkräften können sich für weitere Informationen gerne an Dr. Jens Osterholz (jens.osterholz@emi.fraunhofer.de) wenden.

Nach dem erfolgreichen Abschluss des ENCOUNTER-Projekts sollen weitere Studien das Potenzial der entwickelten Verfahren in realistischen Einsatzumgebungen demonstrieren. Dabei sollen auch Fragen zur Detektion und Identifikation von Sprengstoffen adressiert werden.

Derzeit wird gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF und dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM eine mobile Plattform aufgebaut (Abbildung 9), die neben dem mobilen Einsatz der Neutralisierungstechniken auch die Detektion und Identifizierung von Sprengstoffen erlaubt. Hierzu ist das mobile Forschungslabor mit einem Roboter zur Entnahme von Proben sowie mit spektroskopischen Geräten zur Stand-off-Detektion von Explosivstoffen ausgestattet. Mit der mobilen Plattform soll es ermöglicht werden, das Zusammenwirken der Detektions- und Neutralisierungstechniken auch außerhalb des Labors zu erproben. Eine erste Demonstration ist für das Jahr 2016 vorgesehen.

Die hier gezeigten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des siebten Forschungsrahmenprogramms durch die Europäische Kommission (FP7/2007–2013) unter der Vertragsnummer 285505 gefördert.



9 Für die zukünftige Untersuchung von Technologien zur Detektion und Identifikation im Verbund mit Neutralisierungsansätzen wird gemeinsam mit den Freiburger Fraunhofer-Instituten IAF und IPM ein mobiles Forschungslabor aufgebaut.



**Ansprechpartner**  
**Priv.-Doz. Dr. Jens Osterholz**  
 jens.osterholz@emi.fraunhofer.de

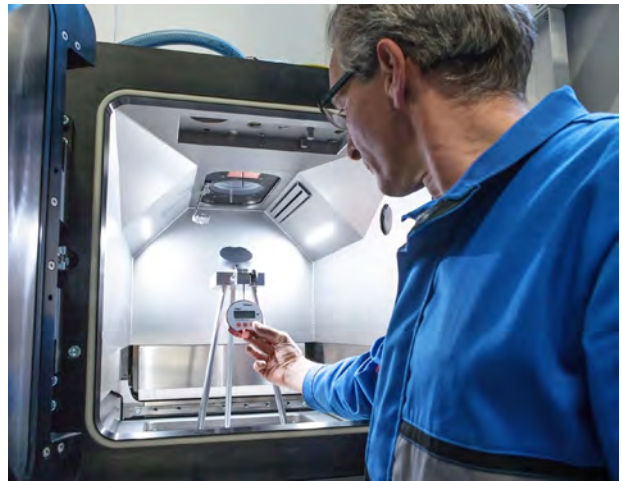


### 3D-Druck und Leichtbaupotenzial

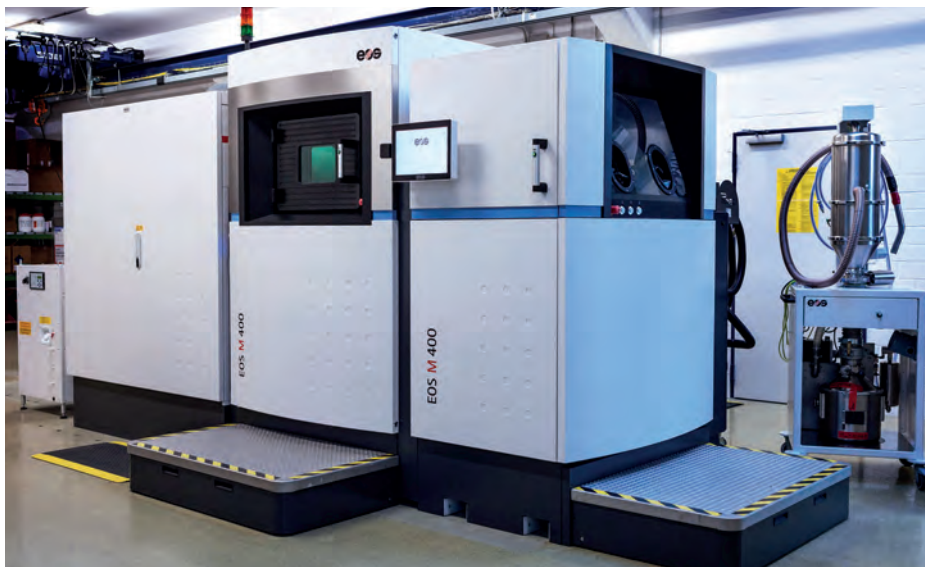
#### Numerische Designoptimierung bei dynamischen Lastanforderungen für metallische Werkstoffstrukturen und Bauteile

Der 3D-Druck hat in den letzten Jahren enorm an öffentlicher Aufmerksamkeit gewonnen und ist ein wichtiger Baustein des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 der High-tech-Strategie der Bundesregierung. Dabei stehen zwei Merkmale des 3D-Drucks im Vordergrund: die Erzeugung annähernd beliebig komplexer Geometrien mit Hohl- und Innenstrukturen ohne zusätzliche Werk- und Halbzeuge sowie die Fertigung direkt aus einer digitalen Konstruktionsdatei, dem CAD-Modell. Dies alles stellt eine grundlegende Veränderung im Produktions- und Entwicklungsprozess im Vergleich zu klassischen subtraktiven und werkzeughängigen Fertigungsverfahren dar.

Im Jahr 2015 wurde am Fraunhofer EMI eine Fertigungsanlage für den 3D-Druck von Metallen mit Bauteilabmessungen von bis zu 400 x 400 x 400 Kubikmillimetern und einer Laserleistung von einem Kilowatt in Betrieb genommen (Abbildungen 10 und 11). Mit diesen Kennwerten stellt sie eine der derzeit größten und leistungsfähigsten kommerziell verfügbaren Anlagen für den Lasersinterprozess dar und ist im Forschungsbereich in dieser Größe ein Unikat.



10 Kalibrierung des Lasers und der optischen Komponenten der Lasersinteranlage.



11 Lasersinteranlage zur generativen Herstellung großer Metallbauteile am Fraunhofer EMI in Efringen-Kirchen.

Der 3D-Druck von Kunststoffen durch verschiedene chemische und physikalische Verfahren des Auftragens und Verfestigens hat sich in vielen Branchen etabliert und vielfältige Anwendungen gefunden. Der 3D-Druck von Metallen ist auf dem Weg, eine ähnliche Erfolgsgeschichte zu schreiben. Aktuell steht die Technologie an der Schwelle von der Herstellung funktioneller Muster, Prototypen und Spezialanwendungen hin zur industriellen Fertigung und Anwendung im Endprodukt.

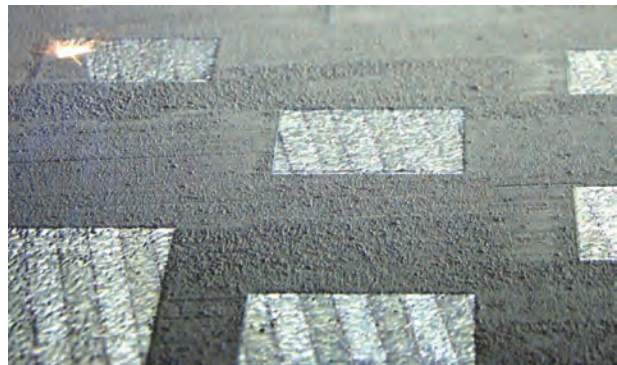
Die Prognosen, welche Auswirkung die generative Fertigung von Metallen auf die globale Produktion haben wird, gehen dabei stark auseinander. Einigkeit besteht allerdings darin: Für viele Industrien ist sie ein »Game Changer«, dies betrifft nach aktuellem Stand vor allem die Branchen Luft- und Raumfahrttechnik, Wehrtechnik, Fahrzeugtechnik, Medizintechnik und Werkzeugbau.

Hauptunterschied zwischen Metall- und Kunststoffdruck ist, dass für Ersteren eine hochenergetische Energiequelle für den Schmelz- und Verfestigungsprozess benötigt wird. Das selektive Lasersintern ist die führende Methode verschiedener Pulverschmelzverfahren. Dabei wird mit einem fokussierten Laserstrahl Metallpulver auf- und umgeschmolzen. Das Metallpulver erstarrt, und eine neue Pulverlage wird in einer definierten Schichtstärke aufgetragen (Abbildung 12). Auf diese Weise entsteht ein homogenes 3D-Bauteil mit potenziell komplexer Geometrie (Abbildung 13).

#### »Design follows function«

Die Gestaltungsfreiheit bei dem Strukturdesign für den 3D-Druck führt zu einer neuartigen Entwicklungsstrategie, welche anders als in einem fertigungsbezogenen Entwicklungsprozess die zu erfüllende Funktion einer Komponente in den Vordergrund stellt. Diese Vorgehensweise wird als »design follows function« bezeichnet und bietet enormes Potenzial für neuartige Produktlösungen und Steigerungen der Effizienz und Leistungsfähigkeit von Komponenten. Letzteres wird vor allem in den Branchen Luftfahrt und Automotive oft mit dem Begriff Leichtbau assoziiert.

Für den 3D-Druck gilt nun generell, dass gezielte Vorgaben möglich sind, an welchen Stellen das Ausgangsmaterial, wie z. B. das Metallpulver, fest zu einer Struktur verbunden wird. Um Zeit, Material und Energie zu sparen, sollte man



12 Lokales Umschmelzen und Erstarren von Metallpulver durch den Energieeintrag eines geführten Laserstrahls.



13 Demonstrationsobjekte möglicher geometrischer Komplexität auf der Bauplattform.



14 Im 3D-Druckverfahren gefertigte strukturierte Zugversuchsproben.

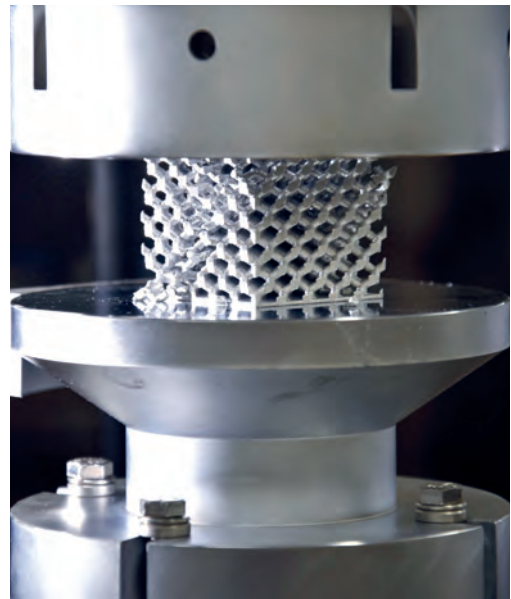
auch nur an solchen Stellen Strukturmaterial erzeugen, an denen es bei dem fertigen Bauteil benötigt wird – damit wird das Leichtbauprinzip zum ökonomischen Imperativ für generative Fertigungsverfahren: Denn einzusetzende Materialmenge, Maschinenzeit und Energieaufwand werden minimiert und ein interessanter Weg zur Steigerung von Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit in der industriellen Produktion aufgezeigt.

**Innovationszyklus für dynamisch belastete Strukturen**

Für das Fraunhofer EMI sind nun außergewöhnliche Möglichkeiten gegeben, diese Technologie in vielfältigen Forschungsvorhaben zu nutzen. Das Institut verfügt über einzigartige Expertise in der Bewertung dynamischer Prozesse, wie beispielsweise Crash oder Impaktvorgänge. Der metallische 3D-Druck bietet die Möglichkeit, Strukturen gezielt für diese dynamischen Problemstellungen auszulegen und mit der Lasersinteranlage herzustellen (Abbildungen 14 und 15). Dabei werden anwendungsbezogene Designrichtlinien und Methoden für den erfolgreichen Einsatz der Technologie ermittelt. Diese Fähigkeit des Strukturdesigns wird mit den umfassenden Möglichkeiten der Werkstoffmodellbildung, der Simulation und experimentellen Diagnostik für dynamische Anwendungen kombiniert. So entsteht ein Innovationszyklus einer Produktentwicklung für dynamisch belastete Strukturen, welcher für ein Forschungsumfeld einzigartig ist.

Die geometrischen Freiheitsgrade in der Lasersinterherstellung begünstigen in besonderem Maße das Strukturdesign unter Nutzung numerischer Berechnungsmethoden. Eine solche Auslegung besteht aus einem numerischen Designentwurf und einer detaillierten Designoptimierung unter Berücksichtigung aller relevanten ingenieurtechnischen Randbedingungen.

In der Strukturoptimierung werden drei Methoden unterschieden, welche in einem Entwicklungsprozess ineinander greifen. Die Topologieoptimierung wird dabei schon in der frühen Entwurfsphase angewendet. Durch eine Parametrisierung des Designraums wird die kraftleitende Materialverteilung bestimmt. In einer anschließenden Aneinanderreihung von Shape- und Sizing-Optimierungsschritten werden einzelne Designmerkmale und deren Ausprägung, wie beispielsweise die Dimensionierung eines Profilquerschnitts, analysiert und angepasst.



15 Dynamischer Druckversuch mit Versagenseintritt an einer zellulär aufgebauten Würfelstruktur im 3D-Druckverfahren.



16 Finite-Elemente-Analyse des Startdesigns eines Technologiedemonstrators »Radträger« (links), numerische Designoptimierung des Technologiedemonstrators zur Reduktion der Masse ohne funktionelle Beeinträchtigung der Komponente (Mitte) und CAD-Vorlage zur Fertigung des 3D-Metallbauteils (rechts).

Die Grundlage eines Optimierungsschritts bildet dabei die Finite-Elemente-Analyse (Abbildung 16). Bei einer geeigneten Modellbildung unter Einschluss der Randbedingungen und des Werkstoffverhaltens werden die Spannungsverteilung oder andere auslegungsrelevante Größen in der Simulation bestimmt. Aus Sensitivitäten von Designvariablen oder durch evolutionäre Mechanismen wird unter Nutzung effektiver mathematischer Algorithmen eine optimale Anpassung des Designs in einer geringen Zahl von Analyseschritten ermöglicht. Über die Struktursimulation hinaus können auch Ergebnisse aus weiteren numerischen Analysen wie von Strömungsphänomenen, thermischen Prozessen, Mehrkörperproblemen und anderen für eine optimale Anpassung des Designs genutzt werden. Es wird dann von einer multidisziplinären Designoptimierung gesprochen. In einem Optimierungsmodell werden unter Aneinanderreihung mehrerer Simulationsschritte mit mathematischen Optimierungsalgorithmen die jeweiligen Analyseergebnisse unter einer Gewichtung für die iterative Anpassung des Designs verknüpft.

Forschungsbedarf besteht in erster Linie bei der nicht linearen Optimierung dynamischer Prozesse auf Grundlage zeitabhängiger, nicht linearer Finite-Elemente-Simulationen und deren Integration in multidisziplinäre Optimierungsmodelle. Durch effektive Nutzung numerischer Algorithmen können Bereiche einer Struktur, welche im zeitlichen Verlauf der Belastung besonderen Beanspruchungen und entsprechend Versagensmechanismen unterliegen, gezielt ausgelegt und angepasst werden.

Die Grundlage für die Auslegung und Optimierung dynamisch belasteter Strukturen sind validierte Werkstoffmodelle und -kennwerte. Im Zusammenhang mit der Lasersinter-technologie sind noch keine etablierten Werkstoffmodelle vorhanden. Dies gilt für dehnratenabhängiges Verhalten in besonderem Maße. Dieser Forschungsbedarf betrifft über Standardproben hinaus vor allem strukturmechanisch optimierte, lastleitende Strukturen, welche aus einer Designoptimierung resultieren. Über strategische Kooperationen werden am Fraunhofer EMI außerdem bruchmechanische Werkstoffeigenschaften, im Speziellen für topologieoptimierte Strukturen, betrachtet.

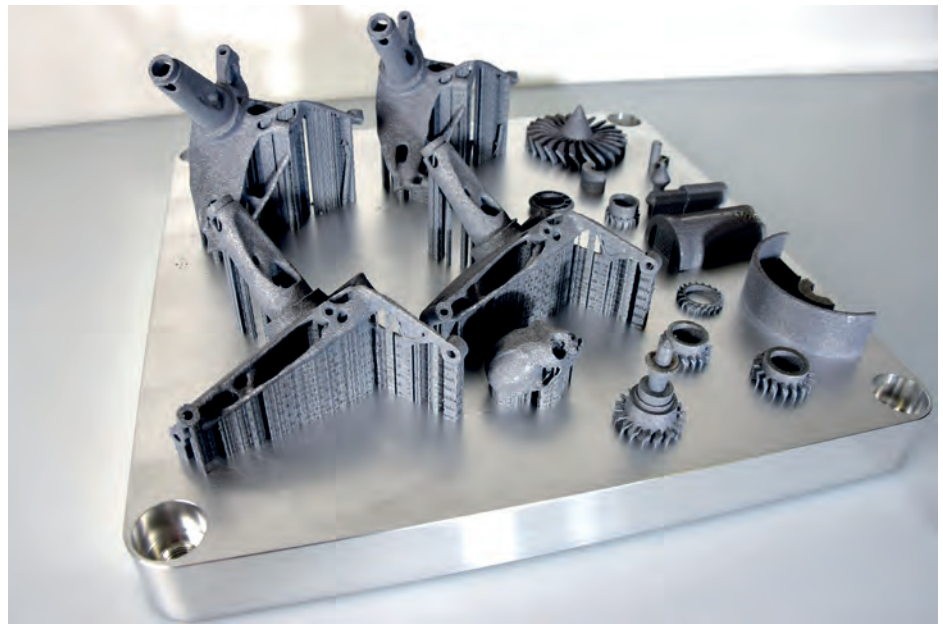
Das Fraunhofer EMI erarbeitet Forschungsleistungen von der Idee bis hin zur Lösung einer metallischen Komponente, welche komplexe dynamische Lastanforderungen erfüllt. Dabei werden Werkstoffmodelle für spezifische dynamische Anwendungen und Lastbereiche entwickelt, um das Potenzial des 3D-Drucks zu erschließen. Für die Auslegung werden numerische Berechnungsverfahren verwendet und weiterentwickelt, die einen Optimierungszyklus bilden. Die prozesseitige Kompetenz durch die eigens zur Verfügung stehende Lasersinteranlage zusammen mit erweiterten Prüfverfahren und Diagnostik unterstützt in außergewöhnlicher Weise die effiziente Entwicklung von Designrichtlinien für dynamische Anwendungen.

Das EMI kann somit einen umfänglichen Innovations- und Entwicklungszyklus anbieten. Gezielt kann ein Kunde beraten und gemeinsam eine optimale Lösung entwickelt und auch hergestellt werden (Abbildung 17).

Seit dem 1. Januar 2016 ist das EMI Mitglied in der Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung.



**Ansprechpartner**  
**Klaus Hoschke**  
 klaus.hoschke@emi.fraunhofer.de



*17 Anordnung mehrerer Strukturkomponenten auf einer Grundplatte nach abgeschlossenem Lasersinterprozess (oben), im Lasersinterprozess hergestellte Leichtbaukomponente »Radträger« mit komplexer Strukturgebung (unten).*





EXPERIMENTELLE  
BALLISTIK

# EXPERIMENTELLE BALLISTIK

---

## EINLEITUNG

Nach einem überaus ereignisreichen Jahr 2015, das vor allem durch einschneidende Umbrüche und Veränderungen an den Grenzen der Europäischen Union geprägt war, ist die Abteilung Experimentelle Ballistik mehr denn je mit Herausforderungen konfrontiert, die sich aus der veränderten verteidigungs- und sicherheitspolitischen Lage ergeben. Gerade diese schwer vorhersehbaren Entwicklungen im sicherheitspolitischen Umfeld Deutschlands haben gezeigt, dass ein querschnittlicher Erhalt wissenschaftlicher Expertise und den damit verbundenen Kernkompetenzen in der Verteidigungs- und Sicherheitsforschung nicht nur sinnvoll, sondern unerlässlich für die nationale Sicherheitsvorsorge ist. Gegenwärtig vorherrschende Formen bewaffneter Konflikte, seien sie nun symmetrischer, asymmetrischer oder hybrider Natur, stellen Sicherheitskräfte, Industrie und Forschung in mehrfacher Hinsicht vor sehr große Herausforderungen. So müssen z. B. im Einsatz verwendete Fahrzeuge für ihre Insassen ausreichenden Schutz vor vielfältigen Angriffen mit tragbaren Waffen, improvisierten Sprengladungen (IEDs) sowie projektilbildenden Ladungen (EFPs) bieten, ohne dabei die taktische Beweglichkeit einzuschränken. Gleichzeitig müssen die Einsatzkräfte im gesamten Bedrohungsspektrum wirken können, was erhebliche Anforderungen an eingeführte und zukünftige Waffensysteme und Wirkmittel stellt.

Diese Rahmenbedingungen erfordern einen nach vorne gewandten Ansatz, der bewährte Lösungen, menschliche Ratio und modernste Technik miteinander in Einklang bringt. Der Ansatz darf sich dabei nicht nur auf technische Lösungen beschränken und erfordert multidisziplinäre Fähigkeiten und Fertigkeiten.

Gerade im Bereich von Schutz und Wirkung zeigt sich, dass das aktuelle Bedrohungsspektrum in seiner ganzen Breite und Komplexität nicht durch konservative Schutz- und Wirkkonzepte allein beherrscht werden kann. Dort, wo einzelne Größen minimiert bzw. maximiert werden, stoßen diese Konzepte zunehmend an die Grenzen ihrer Optimierbarkeit und ziehen einen immer größer werdenden Aufwand bei der Erreichung weiterer Optimierungsziele nach sich. Eine mögliche Lösung dieses Dilemmas könnte der systemische Ansatz sein, der nicht mehr die Einzelbedrohung zum Gegenstand hat, sondern diese im Kontext ihrer Umwelt sieht und ein gesamtheitliches, interdependentes Verständnis zu erlangen versucht. Diese Herangehensweise soll im Folgenden anhand von zwei aktuellen Beispielen gezeigt werden. Am Beispiel des transparenten Schutzes, der gegenüber dem nicht transparenten Schutzaufbau als Schwachstelle angesehen werden kann, bedeutet dies, dass nicht nach der optimalen Lösung für eine diskrete Bedrohung gesucht wird, sondern dass durch eine gezielte Suche nach signifikanten Abhängigkeiten der Einfluss-



größen eine möglichst breite Schutzwirkung erreicht wird. Diese ist wiederum von angrenzenden Materialien und Strukturen abhängig, die die Performanz der transparenten Schutzkomponente maßgeblich beeinflussen – im positiven wie auch im negativen Sinne.

Am Beispiel der Methodik zur Untersuchung komplexer Munition soll gezeigt werden, wie wichtig eine systematische Herangehensweise bei der Untersuchung moderner Wirkmittel ist. Im Vordergrund unserer aktuellen Forschungsarbeit auf diesem Gebiet steht die Entwicklung einer wissenschaftlichen Methode, die Grundvoraussetzung für ein tieferes Verständnis der komplexen Vorgänge ist.



### Dr. Marek Dolak

Abteilungsleiter Experimentelle Ballistik

Telefon 07628 9050-730 | [marek.dolak@emi.fraunhofer.de](mailto:marek.dolak@emi.fraunhofer.de)

### Transparenter polyvalenter Schutz – Fortschritt durch modernste Messtechnik und dynamische Materialcharakterisierung

Bei leichten und geschützten Panzerfahrzeugen gehören die transparenten Bereiche zu den kritischsten Komponenten der Panzerung. Damit die Insassen dieser gepanzerten Fahrzeuge lückenlos geschützt sind, ist es notwendig, dass die transparenten Bereiche möglichst das gleiche Schutzniveau aufweisen wie die nicht durchsichtigen Teile der Panzerung. Typische transparente Panzerungen bestehen aus mehreren Glas- und Kunststoffschichten, die durch Klebefolien zu einem Laminat verbunden werden. Da die Anforderungen an die Mehrfachtreffersicherheit bei konventionellen Verbundsicherheitsgläsern zu hohen Flächengewichten und sehr dicken Panzerglasscheiben führen, muss das Gewicht der transparenten Panzerungen deutlich reduziert werden, um auch auf zukünftige Bedrohungen reagieren zu können. Dabei ist es wichtig, dass die transparenten Panzerungen polyvalent ausgelegt werden, d. h., dass sie Schutz gegen unterschiedliche Bedrohungen wie Infanteriemunition, Splitter und explosiv geformte Projektilen (Explosively Formed Projectiles, EFPs), die bei der Detonation von IEDs (Improvised Explosive Devices) entstehen, bieten. Abbildung 1 veranschaulicht die massive Schädigung der Glasschichten und starke Verformung der rückseitigen Polycarbonatschicht eines Verbundsicherheitsglases nach dem Impact eines 54 Gramm schweren splitterdarstellenden Geschosses mit einer Geschwindigkeit von 1090 Metern pro Sekunde.

Die Auslegung solcher Verbundgläser für den ballistischen Schutz basiert zzt. noch auf einer überwiegend empirischen Vorgehensweise. In Anbetracht der großen Zahl der Parameter, welche die Schutzwirkung beeinflussen, wie z. B. die Dicke und Art der Keramik- und Glasschichten, der Klebeschichten und des Kunststoffbackings, liegt die Notwendigkeit für die Entwicklung von Werkzeugen zur systematischen Optimierung auf der Hand.

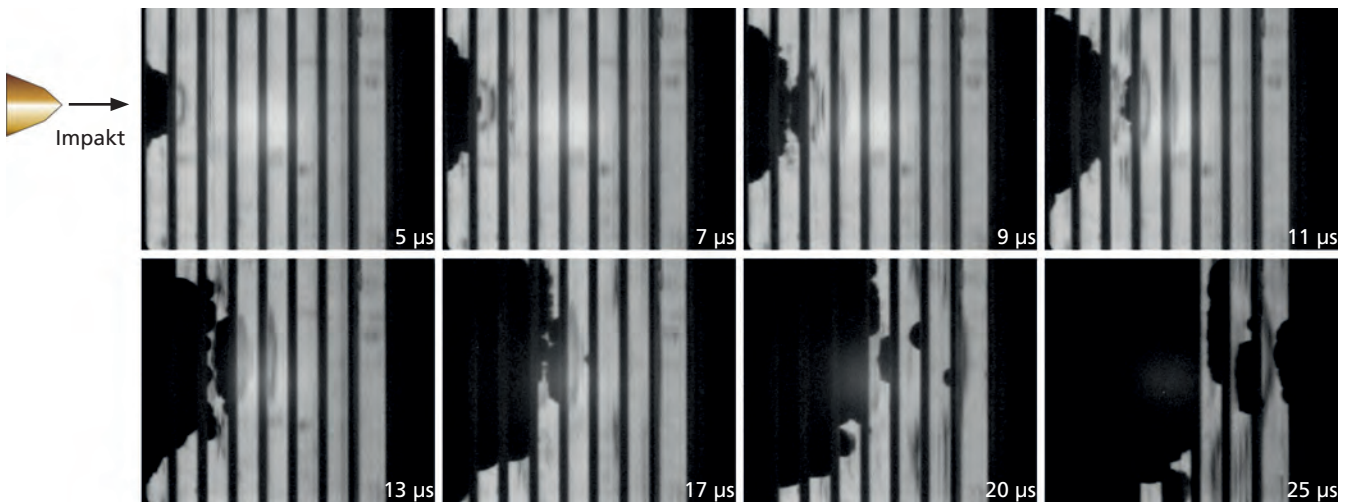
Am Ernst-Mach-Institut wurden in den letzten Jahren Visualisierungsverfahren kontinuierlich verbessert und Methoden entwickelt, die es ermöglichen, den Schädigungsverlauf in einzelnen Schichten einer transparenten Panzerung zu beobachten und gleichzeitig die Verformung quantitativ zu bestimmen. Durch das Verwenden von

Surrogatprojektilen, die aus einer Rohrwappe beschleunigt und mittels einer hochwertigen optischen Diagnostik untersucht werden können, ist es gelungen, die Wechselwirkungsmechanismen bei der Eindringung von EFPs aus IEDs zu studieren. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen aus einem Versuch, bei dem ein EFP-Surrogat mit einer Geschwindigkeit von mehr als 1200 Metern pro Sekunde auf ein Laminat mit acht Glasschichten traf. Die intakten Glasscheiben des Laminats erscheinen hell in den Aufnahmen. Mit fortschreitender Schädigung verdunkeln sich diese Bereiche, da ein Teil des Lichts an den Rissflächen reflektiert wird und nicht mehr in die Kamera fällt.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass die Schädigung in allen Glasschichten innerhalb der ersten 25 Mikrosekunden nach dem Aufschlag des Projektils einsetzt. Die ersten fünf Schichten werden während dieses Zeitintervalls im Sichtbereich der Kamera bereits so stark geschädigt, dass nahezu kein Licht mehr zur Kamera durchdringt. Nur in den ersten beiden Glasschichten setzt die Schädigung allein an der Beschussseite ein. Ab der dritten Glasschicht beginnt die Schädigung immer zuerst an der Rückseite der Platten. Die Analyse der Aufnahmen hat gezeigt, dass der Beginn der Schädigung an der Rückseite der Glasplatten im Zusammenhang mit dem Eintreffen und der Reflexion der Transversalwelle an der Rückseite der jeweiligen Glasplatte steht. Die Schutzwirkung der Laminare kann erhöht werden, wenn der Fortschritt der Schädigung durch geeignete Front- oder Zwischenschichten verhindert oder verzögert werden kann.



1 Massive Schädigung und Verformung eines Glas-Polycarbonat-Laminats nach Beschuss mit splitterdarstellendem Geschoss.



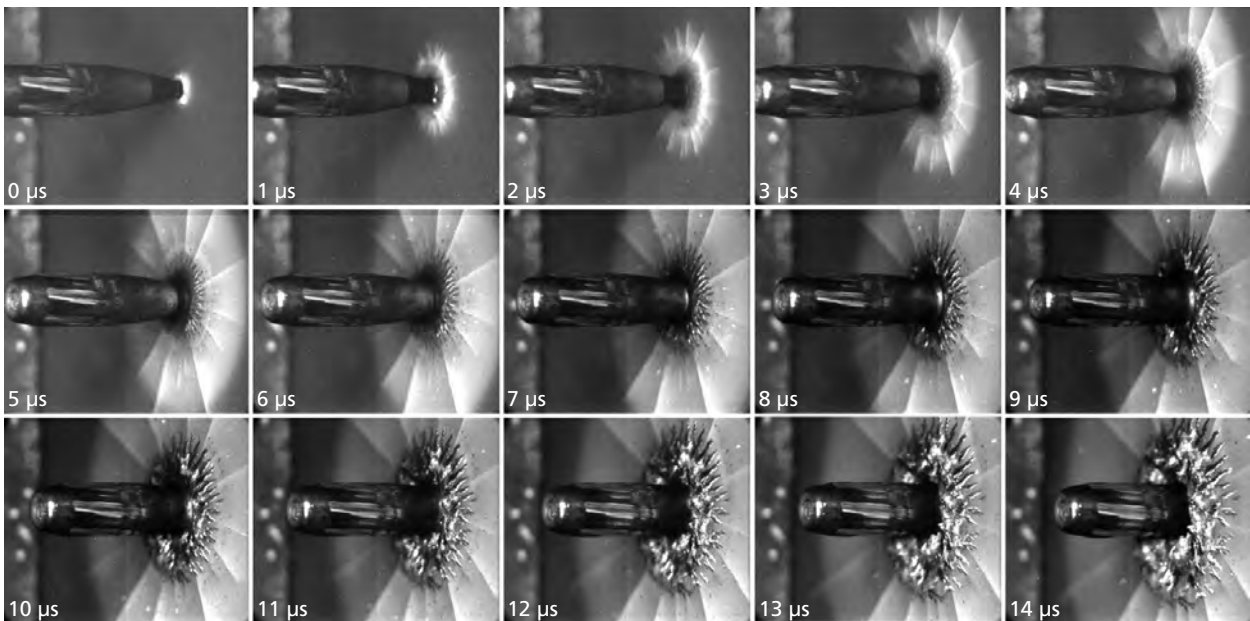
2 Auswahl von acht Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schädigungsverlaufs in einem Laminat mit acht Glasscheiben bei Beschuss mit einem IED-Surrogat.

Um einen hohen Schutz gegen Infanteriemunition mit Hartkern (Stahl oder Wolframcarbid) zu erreichen, kann eine harte Frontschicht aus transparenter Keramik eingesetzt werden, die eine Erosion oder Fragmentierung des Projektilkerns bewirkt. Den Effekt einer transparenten Aluminiumoxid( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )-Keramikschicht veranschaulichen die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Abbildung 3.

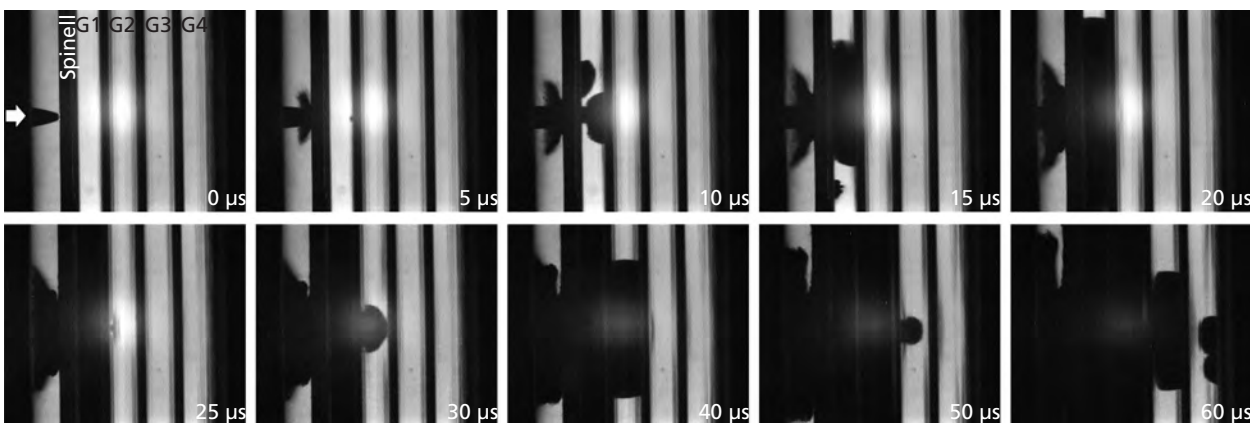
Unmittelbar nach dem Auftreffen des Projektils entstehen Risse in der Keramik, die sich mit einer Geschwindigkeit von mehr als 4000 Metern pro Sekunde in radialer Rich-

tung ausbreiten. Bereits nach vier Mikrosekunden erkennt man, wie Material des Stahlkernprojektils an der Oberfläche der Keramik in radialer Richtung abfließt.

Abbildung 4 veranschaulicht den Schädigungsverlauf in einem Glaslaminat mit einer vier Millimeter starken Frontschicht aus Spinellkeramik bei Beschuss mit einem Projektil mit Hartmetallkern, Abbildung 5 stellt die zugehörige Weg-Zeit-Kurve des Schädigungsverlaufs im Experiment und die in einer Simulation berechnete Weg-Zeit-Kurve der Projektilspitze (grüne Linie) dar.



3 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Projekteindringung in Glaslaminat mit Frontschicht aus transparenter  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik.



4 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schädigungsverlaufs in einem Glaslaminat mit Spinellfrontschicht bei Beschuss mit einem 7,62-Millimeter-Projektil mit Hartmetallkern.

Zusätzlich wird die Ausbreitungsrichtung der experimentellen Schädigungsfront durch Pfeile angedeutet.

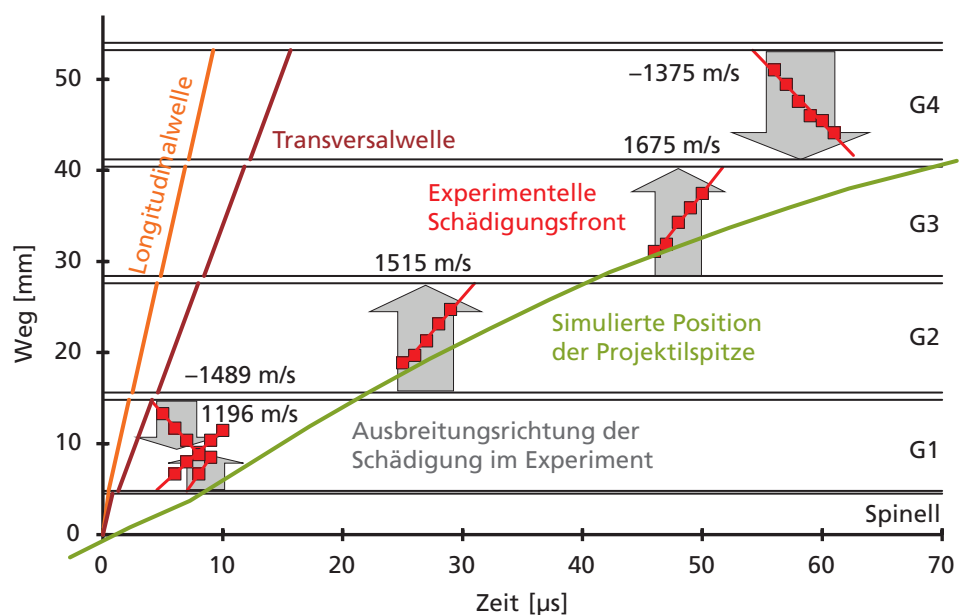
Ungefähr acht Mikrosekunden nach dem Aufschlag hatte der Wolframcarbikern die Spinellplatte durchdrungen. In der ersten Glasschicht (G1) setzte die Schädigung sowohl von der Plattenrückseite als auch von der Kontaktfläche zur Spinellplatte ein. Besonders hervorzuheben ist die zeitliche Korrelation zwischen dem Schädigungsbeginn in Schussrichtung und dem Eintreffen des Projektils in den ersten drei Glasschichten. Das lässt darauf schließen, dass in diesen Fällen die Schädigung direkt durch das Auftreffen des Projektils initiiert wurde. Hingegen begann die letzte Glasschicht aufgrund von Spannungen, welche durch die Plattenbiegung an der Rückseite induziert wurden, ohne sichtbare Korrelation zur Projektilposition zu versagen.

Da einerseits im ballistischen Experiment immer nur ein Teil der physikalischen Größen messtechnisch erfasst werden kann und andererseits durch die hohe Zahl an Parametern bei den Zielaufbauten eine rein experimentelle Optimierung zu aufwendig wäre, ist die numerische Simulation ein wichtiges Werkzeug zur Verbesserung des Verständnisses der Prozesse und der Schutzanordnungen.

Die Basis für ein prognosefähiges Materialmodell bilden die Daten aus Experimenten zur Charakterisierung des Materials bei dynamischen Belastungen, welche die beim Impakt eines Projektils auftretenden Drücke, Dehnungen und Dehnraten widerspiegeln.

Beim Beschuss von transparenten Schutzanordnungen können im Glas starke Belastungen im Gigapascalbereich und hohe Dehnraten auftreten. Deshalb ist eine Materialcharakterisierung mittels rein statischer Messanordnungen unzureichend. Eine Möglichkeit, das Material bis in den erforderlichen hochdynamischen Bereich kontrolliert zu belasten, bietet der sogenannte Planarplattenimpakt. Dabei werden im zu untersuchenden Material Stoßwellen erzeugt und mithilfe eines hochauflösenden interferometrischen Verfahrens aufgezeichnet. Die Analyse dieser Geschwindigkeitssignale gibt Aufschluss über charakteristische Materialeigenschaften, die zur Erstellung der Zustandsgleichung benötigt werden, und über die Spallationsfestigkeit.

Die kontrollierte Materialbelastung im hochdynamischen Bereich stellt hohe Anforderungen an die Beschleunigeranlage und die Messtechnik. Insbesondere erfordern



5 Vergleich der Schädigungsentwicklung im Experiment mit der simulierten Weg-Zeit-Kurve der Projektilspitze.

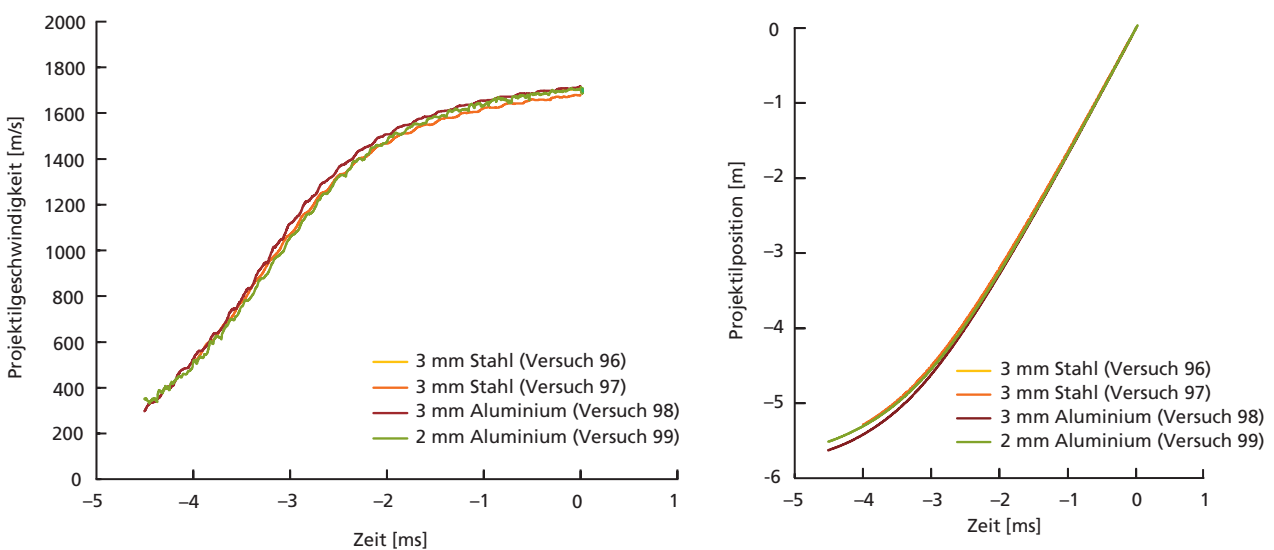
die im Material induzierten Geschwindigkeitsanstiege eine Messauflösung von wenigen Nanosekunden. Am Ernst-Mach-Institut wird dies mittels Laserinterferometern (PDV und VISAR) realisiert, die den Dopplereffekt nutzen.

Darüber hinaus ist es erforderlich, die Auftreffgeschwindigkeit der Impaktorplatte möglichst genau zu bestimmen. Aus diesem Grund erfolgt die Messung ebenfalls hochaufgelöst per Interferometer. Dies ermöglicht nicht nur die präzise Messung der Auftreffgeschwindigkeit, sondern erlaubt zusätzlich, den zeitabhängigen Beschleunigungsvorgang des Projektils über eine Strecke von mehr als fünf Metern im Rohr des Beschleunigers zu messen. Abbildung 6 zeigt einen solchen Beschleunigungsverlauf für vier verschiedene Experimente. Man erkennt, dass die Signale trotz der unterschiedlichen Projektilmassen sehr gut reproduzierbar sind und die Auftreffgeschwindigkeiten (Aufschlagzeitpunkt  $t = 0$  Millisekunden) in allen vier Durchgängen bei 1700 Metern pro Sekunde lag.

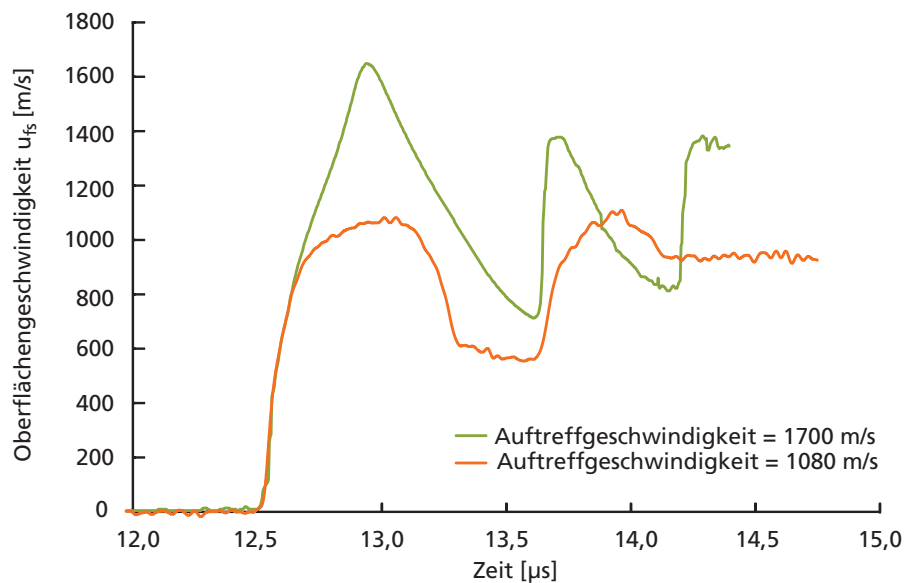
Abbildung 7 zeigt die gemessenen Geschwindigkeitssignale aus zwei Experimenten zur Charakterisierung von Glas. Dabei wurde jeweils eine Kalknatronglasplatte mit

einer Aluminiumplatte beschossen, deren Auftreffgeschwindigkeit in dem einen Fall 1700 Meter pro Sekunde und im anderen Fall 1080 Meter pro Sekunde betrug. Das Messsignal zeigt die Geschwindigkeit der freien Oberfläche auf der Rückseite der Glasplatte. Damit die Signale besser miteinander verglichen werden können, wurde der Nullzeitpunkt der zweiten Messung entsprechend verschoben. Beim Aufschlag werden sowohl im Glas als auch im Aluminium ebene Stoßwellen erzeugt, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortpflanzen. Die elastische Welle bewegt sich am schnellsten, nämlich mit der longitudinalen Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{long}}$  von 5740 Metern pro Sekunde, welche für das Kalknatronglas durch eine Ultraschallmessung bestimmt wurde. Sie erreicht die Targetrückseite nach 12,5 Mikrosekunden und führt zu einem steilen Anstieg des gemessenen Geschwindigkeitssignals.

In den darauffolgenden 0,5 Mikrosekunden gelangen weitere Wellenfronten zum Messpunkt, und es findet ein kontinuierlicher Geschwindigkeitsanstieg statt. Für die Analyse dieses gesamten Belastungspfads wird eine inkrementelle Auswertung angewendet. Dazu werden die



6 Mittels PDV gemessene Geschwindigkeitsverläufe der Impaktorplatten aus vier Versuchen (links). Durch die Integration der Geschwindigkeitssignale wird erkennbar, dass die Projektilgeschwindigkeiten über eine Strecke von mehr als fünf Metern präzise bestimmt werden konnten (rechts).



7 Freie Oberflächengeschwindigkeit auf der Rückseite einer Glasplatte, die von einer Aluminiumplatte mit 1700 bzw. 1080 Metern pro Sekunde beaufschlagt wurde.

Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie, die sogenannten Rankine-Hugoniot-Gleichungen, in differenzieller Form ausgewertet:

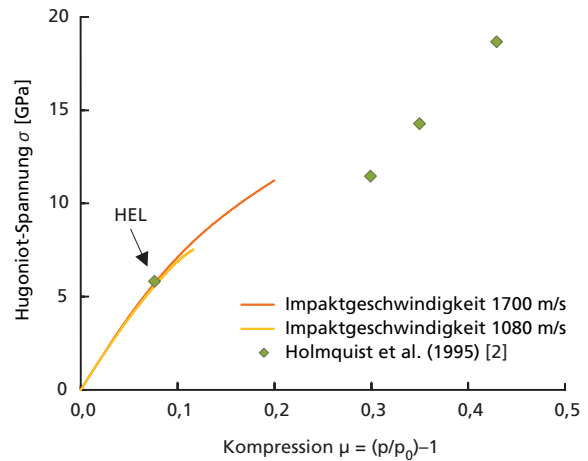
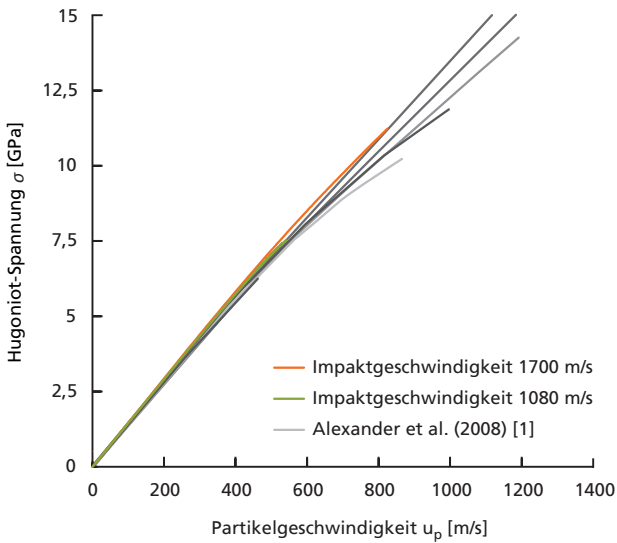
$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta u_{fs}}{2U_s} \quad (1)$$

$$\Delta \sigma = \rho_0(1 + \varepsilon)U_s \frac{\Delta u_{fs}}{2} \quad (2)$$

Hierbei steht  $\varepsilon$  für die eindimensionale Dehnung und  $\sigma$  für die longitudinale Spannung in Stoßwellenrichtung, auch Hugoniot-Spannung genannt. Diese Werte berechnen sich aus der gemessenen freien Oberflächengeschwindigkeit  $u_{fs}$ , der berechneten, zeitabhängigen Stoßwellengeschwindigkeit  $U_s$  und der Anfangsdichte  $\rho_0$ . Beim Auftragen der Spannung gegen die Partikelgeschwindigkeit  $u_p = u_{fs}/2$  ergibt sich ein linearer Zusammenhang, der gut mit vergleichbaren Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmt (siehe Abbildung 8, links). Die dynamische Elastizitätsgrenze bei eindimensionaler Dehnung, das sogenannte HEL, ist ein wichtiger Simulationsparameter. Bei Belastungen unterhalb des HEL verhält sich das Glas elastisch. In diesem Bereich ist der Anstieg der Spannung mit der Partikelgeschwindigkeit unabhängig vom endgültigen Belastungszustand. Oberhalb des HEL beginnen die Kurven vonein-

ander abzuweichen. Abbildung 8 (rechts) zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Literaturwert von knapp sechs Gigapascal, der in einen kommerziellen Code implementiert wurde. Die Versuchsgeometrie wurde so gewählt, dass bei der Entlastung Informationen über die Zugfestigkeit des Glases gewonnen werden können. Dazu müssen zum einen die Oberflächen der Projektil- und Targetplatte frei sein, damit die beim Aufschlag induzierten Druckwellen nach dem Durchlaufen des Materials als Entlastungswellen reflektiert werden. Zum anderen wird ein passendes Verhältnis der Plattendicken benötigt, so dass sich die Entlastungswellen innerhalb der Glasprobe überlagern und dadurch zur gewünschten Zugspannung führen. Wenn diese Spannung die Zugfestigkeit des Materials übersteigt, entsteht eine sogenannte Spallationsebene.

Im Messsignal spiegelt sich dieser Vorgang durch einen Geschwindigkeitsabfall, gefolgt von einem erneuten Anstieg, wider. Bei den durchgeführten Experimenten kann dies nach etwa 13,6 Mikrosekunden beobachtet werden (siehe Abbildung 7). Obwohl das Spallationssignal bei beiden Impaktgeschwindigkeiten simultan eintritt, zeigen sich deutliche Unterschiede im qualitativen Verlauf der Entlastung. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte das spröde Verhalten des Glases sein, das den Abplatz-



8 Links: Vergleich von Experiment und Literatur für den Belastungspfad von Kalknatronglas bei unterschiedlichen Endbelastungszuständen. Rechts: Vergleich des experimentell ermittelten Belastungspfads mit aus der Literatur entnommenen Endzuständen.

vorgang nur bedingt reproduzierbar macht. Es wäre allerdings ebenfalls denkbar, dass die deutlich unterschiedlichen Belastungsstärken zu einem anderen Verhalten führen, da die Glasfestigkeit sehr stark vom Druck abhängt. Diese Frage kann allerdings durch zusätzliche Versuche bei anderen Belastungen geklärt werden.

Als Grundlage für die Modellierung der Materialien in transparenten Panzerungen ist die Charakterisierung von Natronkalkglas, Borosilicatglas und von transparenter Spinellkeramik erforderlich. Die Versuche zur Visualisierung des Schädigungsfortschritts haben auch gezeigt, dass das Projektil in den meisten Fällen in bereits vorgeschädigtes Material eindringt. Daher ist es notwendig, ebenso Verfahren zur Charakterisierung von vorgeschädigtem Material zur Verfügung zu haben. Dabei ist insbesondere die Abhängigkeit der Festigkeit vom Grad der Schädigung von

Interesse. Der Einsatz der dargestellten Visualisierungsverfahren und Messtechniken in Verbindung mit numerischen Analysen ermöglicht es, den Einfluss unterschiedlicher Parameter zu erfassen und zu analysieren. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung verbesserter transparenter Panzerungen.

**Referenzen**

[1] Alexander, C. S., Chhabildas, L. C., Reinhart, W. D., Templeton, D. W. (2008). Changes to the Shock Response of Fused Quartz Due to Glass Modification. International Journal of Impact Engineering, 35, 1376–1385.  
 [2] Holmquist, T. J., et al. (1995). High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel.



**Ansprechpartner**  
**Elmar Straßburger**  
 elmar.strassburger@emi.fraunhofer.de



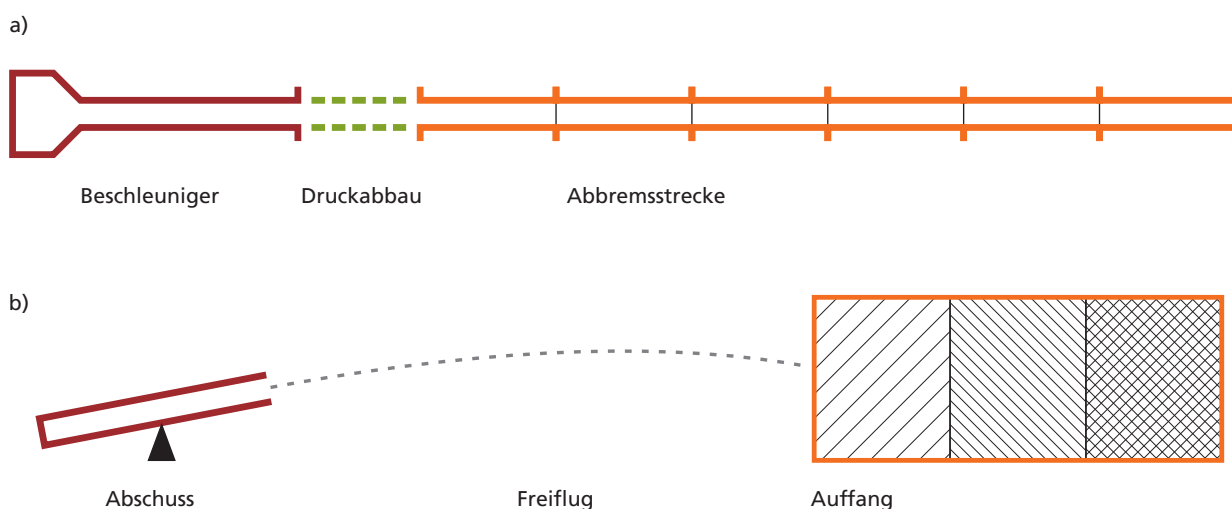
### Wissenschaftliche Methoden zur Untersuchung komplexer Munition

Als Antwort auf eine konkrete Fragestellung der Bundeswehr bezüglich der Tests von neuen Munitionstypen werden derzeit innovative Lösungen zum zerstörungsfreien Wiederauffangen (Soft Recovery) von verschossenen Projektilen entwickelt. Diese Fähigkeit ist essenziell sowohl für die Forschung und Entwicklung als auch für die Qualifikation von moderner Munition, die aufgrund komplexer werdender Einsatzbedingungen und den daraus resultierenden taktisch-operativen Anforderungen zunehmend flexibler einsetzbar und damit multifunktional sein muss. Bestimmte Munitionstypen verfügen, neben elektronischen Zünd- und Sicherungsvorrichtungen, bereits über zusätzliche Mikroelektronik oder Mikromechanik, die der kontrollierten Zerlegung (z. B. Airburst), der Ausführung von Lenk- und Korrekturverfahren oder der Navigation dienen. Dabei kommen vielfältige Sensortechnologien und integrierte Schaltkreise zum Einsatz. Die zunehmende Komplexität derartiger Munitionssysteme, ermöglicht durch die stetig fortschreitende Miniaturisierung von elektronischen und mechanischen Komponenten, führt jedoch zu neuen Herausforderungen bei der Entwicklung, da alle Baugruppen den hohen Belastungen während des Abschussvorgangs standhalten müssen. Dies verlangt nach neuen Testmethoden bei der Entwicklung und Qualifikation moderner Munition.

### Wissenschaftlicher Beitrag zur Untersuchung moderner Munition

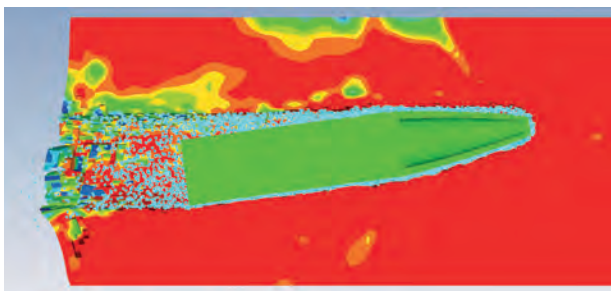
Ein fundiertes Verständnis für das Zusammenspiel aller Komponenten in modernen Munitionssystemen ist auf diesem Gebiet Ausgangspunkt der wissenschaftlichen Forschungsaktivitäten des EMI. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf der Weiterentwicklung und Anwendung von modernen Messtechniken, Experimentieranlagen und Simulationsverfahren.

Um beispielsweise Fehlerbilder analysieren zu können, die bei Zündversagern auftreten, müssen diese zwangsläufig nach dem Verschuss geborgen werden. Für eine aussagekräftige Analyse ist es notwendig, die Geschosse intakt zu bergen, d. h., das Auftreffen auf ein geeignet konstruiertes Ziel darf den Blindgänger nicht beschädigen, da ansonsten das ursprüngliche Fehlerbild überdeckt werden würde. Traditionell werden zum weichen Auffang von Projektilen natürlich vorhandene Auffänge, wie z. B. Schneefelder oder Wattboden, verwendet. Die Vorbereitung und Logistik für solche Untersuchungen in freier Natur sind jedoch sehr aufwendig. Zudem sollen aus Umweltschutzaspekten Versuche in der freien Natur künftig vermieden werden, deshalb arbeiten wir daran, langfristig effizientere und flexiblere Methoden für Munitionstests zur Verfügung zu stellen.



9 Zwei Konzepte zum Abbremsen von Projektilen: a) in einem kalibergleichen Rohr, b) weiches Auffangen nach Freiflug.

Grundsätzlich kommen unterschiedliche Ansätze zum weichen Auffangen von Projektilen infrage (siehe Abbildung 9). Eine Möglichkeit ist das kontrollierte Abbremsen des Projektils in einem kalibergleichen Rohr, welches direkt an die Mündung des Waffenrohrs angeflanscht wird. Der Vorteil dieser Methode ist der relativ geringe Platzbedarf, der in der Regel eine Abbremsstrecke erfordert, die etwa der zehnfachen Länge des Waffenrohrs entspricht. Nachteilig ist jedoch, dass jeweils ein kaliberspezifischer Aufbau notwendig ist. Außerdem ist die Kadenz einer solchen Anlage sehr niedrig, da nach jedem Schuss zunächst das Projektil geborgen und dann die Anlage wieder vorbereitet werden muss. Eine alternative Methode, die diese Nachteile umgeht, ist der Aufbau einer Vorrichtung, die nach einer gewissen Freiflugstrecke das Projektil unbeschädigt auffängt. So ist es auch möglich, je nach Aufgabenstellung nur bestimmte Projektile zu selektieren. Ist man etwa daran interessiert, die Blindgänger einer Salve zu untersuchen, lässt man die funktionsfähigen Geschosse im Flug auslösen, so dass diese den Auffang nicht erreichen. Grundsätzlich sind die Geschosse umso langsamer (und damit einfacher zu fangen), je weiter entfernt der Auffang platziert wird. Dafür steigt aber, aufgrund der Streuung, auch die abzudeckende Fläche mit der Entfernung. Folglich muss für eine konkrete Aufgabenstellung immer eine Abwägung der verschiedenen Parameter (Entfernung und effektive Fläche des Auffangs, zulässige Belastung des Projektils) erfolgen, um einen optimalen Aufbau zu finden. Dies geschieht durch den Einsatz von Simulationen, Diagnostik und experimentellen Laboruntersuchungen.

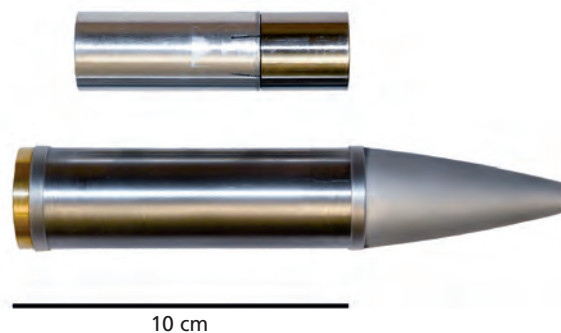


10 Simulierter Impact eines Projektils in einen Glasschaumblock. Das verwendete Materialmodell berücksichtigt das Kompaktierungsverhalten von porösem Material.

### Modellierung und Simulationen

Die Modellbildung ist ein wichtiges Werkzeug zum besseren Verständnis von komplexen Systemen, und am Fraunhofer EMI ist die Parallelität von Experiment und Simulation eine wichtige Kompetenz, die auf vielen Ebenen eingesetzt wird. Dies reicht von Modellen zur numerischen Simulation des Materialverhaltens – insbesondere unter hochdynamischen Lasten – sowie der physikalischen Vorgänge bei Impact- und Stoßwelleneffekten über ballistische Modelle zur Untersuchung des aerodynamischen Verhaltens bis hin zur Systemmodellierung zur Untersuchung der funktionalen Sicherheit und Zuverlässigkeit von wehrtechnischen Systemen.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Thema Soft Recovery werden numerische Simulationen an zwei Stellen durchgeführt, um mögliche Zielaufbauten hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten. Zum einen wird die Schockfestigkeit der Projektile untersucht, um eine Obergrenze für die zulässigen Beschleunigungslasten beim Auffangen zu bestimmen, zum anderen wird, basierend auf einer konkreten Auslegung des Zielaufbaus, der Abbremsvorgang des Projektils im Auffangmaterial simuliert, um die wirkenden Kräfte zu studieren. Dabei kommen explizite Finite-Elemente-Methoden und angepasste Modelle zur Beschreibung spezifischer Materialien zum Einsatz (Abbildung 10), als Stützstellen dienen experimentell gewonnene Daten.



11 Der g-Rec-Datenrekorder mit Batteriefach kann in einem 30-Millimeter-Messgeschoss untergebracht werden.

### Diagnostik

Aufgrund der immer weiter steigenden Komplexität der Munitionssysteme ist eine Trial-and-Error-Vorgehensweise bei der Entwicklung und Qualifikation neuer Modelle häufig nicht mehr zielführend. Vielmehr ist heute zusätzlich die Anwendung von In-situ-Diagnostik und Post-mortem-Analysen notwendig, um mit einer akzeptablen Anzahl von Entwicklungszyklen ans Ziel zu gelangen. Bei der Durchführung von ballistischen Experimenten kann am EMI ein breites Portfolio an Messverfahren eingesetzt werden. Das Angebot reicht von der optischen Erfassung schnell ablaufender Vorgänge mithilfe von Hochgeschwindigkeitskameras über Systeme zur Messung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofilen bis hin zum Röntgenblitzverfahren für die zeitaufgelöste Analyse dynamischer Vorgänge, wenn eine optische Beobachtung nicht möglich ist. Dies ist z. B. der Fall, wenn sich das zu beobachtende Objekt innerhalb eines nicht transparenten Mediums befindet oder es aufgrund starker Staub- oder Lichtentwicklung nicht mit einer Kamera erfasst werden kann. Zur Post-mortem-Analyse stehen Computertomografieanlagen zur Verfügung, mit denen z. B. Verformungen und Beschädigungen in hoher Auflösung erkannt werden können.

Zwei Messverfahren, die für die Durchführung der Soft-Recovery-Versuche von besonderer Bedeutung sind, sollen hier erwähnt werden. Dies ist zum einen das PDV-System zur Messung von Geschwindigkeitsverläufen in einem sehr weiten Bereich von 0,1 Metern pro Sekunde bis über 8000 Metern pro Sekunde, basierend auf dem optischen Dopplereffekt. Dabei ist das PDV-Verfahren aufgrund des verwendeten absoluten Frequenzmessverfahrens tolerant gegenüber einem temporären Signalverlust.

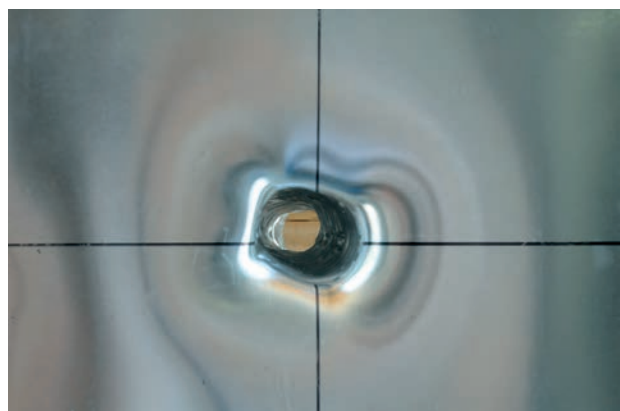
Als zweites Werkzeug steht mit dem g-Rec ein robuster autonomer Datenrekorder für die Aufzeichnung von transienten Beschleunigungslasten zur Verfügung, der dank seiner kompakten Abmessungen innerhalb von Projektilen ab einem Kaliber von 30 Millimetern untergebracht werden kann (Abbildung 11). Aus den gemessenen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsverläufen des Projektils lassen sich die wirkenden Kräfte ableiten. Die g-Rec-Familie beinhaltet mittlerweile auch Multikanalrekorder für Beschleunigungsmessungen in mehreren Achsen sowie Varianten mit zusätzlichem Signaleingang, die simultan zur Beschleunigungsmessung weitere Sensordaten (z. B. von Drucksensoren) aufzeichnen können.

### Experimentelle Anlagen

Für ballistische Untersuchungen steht am EMI vom Druckluftlaborbeschleuniger über Pulverkanonen bis zum zweistufigen Leichtgasbeschleuniger eine Vielzahl an Geräten zur Verfügung. Im Rahmen der Untersuchungen zur Soft Recovery wurde ein Druckluftbeschleuniger mit einem Kaliber von 30 Millimetern für den Versuchsaufbau gewählt. Bei den verwendeten Projektilen handelt es sich um robust konstruierte Messgeschosse, die mit dem g-Rec-Beschleunigungsrekorder instrumentiert werden. Nach der Beschleunigung und einer kurzen Freiflugstrecke zur Bestimmung der Geschwindigkeit und des Anstellwinkels treten die Projektile in einen Zielaufbau ein. Dort werden sie bis zum Stillstand abgebremst und können nach der Versuchsdurchführung geborgen werden.



12 Aufbau aus Aluminiumblechen zum kontrollierten Projektilauffang, Seitenansicht nach dem Versuch.



13 Blick durch den Schusskanal im Plattenziel.

### Soft-Recovery-Experimente

Zur Untersuchung verschiedener Auffangmethoden wurden zwei Arten von Zielaufbauten entworfen: halbumendliche Ziele für ein kontinuierliches sanftes Abbremsen und geschottete Plattenziele für einen härteren Stopp auf kurzer Distanz. Die Plattenziele bestehen aus in regelmäßigen Abständen aufgestellten Blechen, wobei die Abbremswirkung durch mehrere Parameter beeinflussbar ist. Die Wahl von Material, Werkstoffzustand, Blechdicke und Abstand ermöglicht eine Variation der Beschleunigungskräfte in einem weiten Bereich. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen einen solchen Aufbau nach dem Beschuss. Bei der Versuchsdurchführung wurden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf simultan mit PDV bzw. g-Rec gemessen.

Für das weiche Auffangen in einem halbumendlichen Ziel besteht der Aufbau aus verschließbaren Kästen, in die das zu untersuchende Material eingefüllt wird (Abbildungen 14 und 15). Zusätzlich können Triggerfolien oder Deutplatten in den Kästen positioniert werden, um die Bahn des Projektils zu rekonstruieren. Es wurden mehrere Materialien

auf ihre Eignung hin geprüft und das Abbremsverhalten charakterisiert. Als Beispiel für ein solches Auffangmaterial sei hier Glasschaum genannt, der in verschiedenen Varianten untersucht wurde. Glasschaum ist ein poröser Leichtbaustoff, der aus Altglas hergestellt und üblicherweise zur Wärmedämmung von Gebäuden eingesetzt wird. Das Material ist in unterschiedlichen Formen verfügbar, u. a. als Platten, Schotter und Granulat. Abbildung 16 zeigt den Beschleunigungsverlauf des Projektils, wie er mithilfe des g-Rec bei einem Beschuss von Glasschaum gemessen wurde. Man erkennt die einzelnen Phasen der Bewegung (Abschuss, Freiflug, Auffang), den Geschwindigkeitsverlauf erhält man durch Integration.

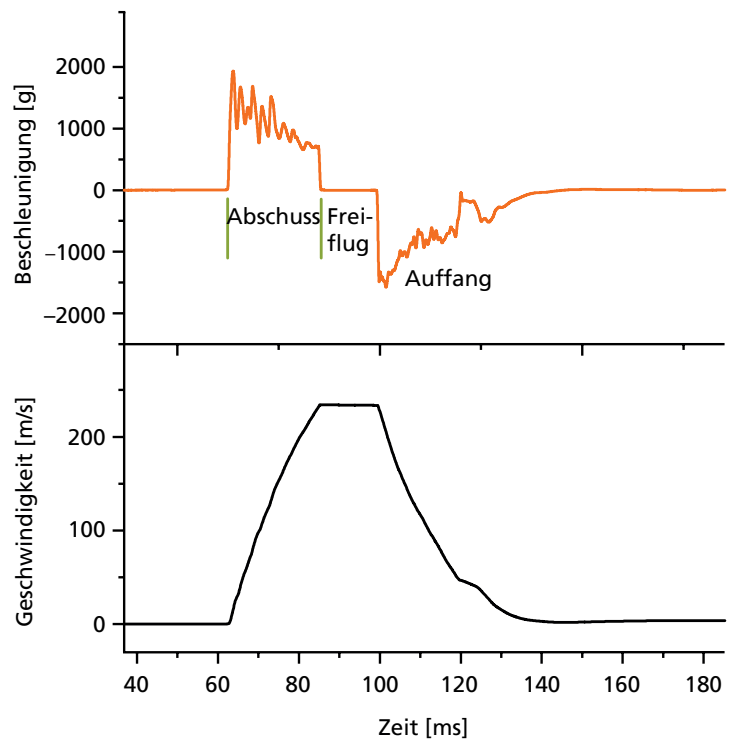
Eine große Herausforderung ist die grundlegende Tendenz von Projektilen, sich beim Auffangen nach einer gewissen Flugstrecke zu überschlagen, da sich in der Regel der Kräfteschwerpunkt vor dem Masseschwerpunkt befindet und daher die vom Medium ausgeübten Kräfte ein Kippmoment bewirken. Da die aerodynamische Stabilität von drallstabilisierten Geschossen in Medien mit wesentlich höherer Dichte als Luft nicht mehr gegeben ist, kommt es



14 Soft-Catch-Box zum weichen Auffang von Projektilen, gefüllt mit Glasschaumplatten.



15 Soft-Catch-Box, gefüllt mit Glasschaumschotter.



16 Beschleunigungsverlauf eines Projektils beim Beschuss von Glasschaum, gemessen mit g-Rec.

früher oder später zwangsläufig zu einem Überschlag. Es gibt zwei Möglichkeiten, mit diesem Problem umzugehen: Entweder man bremst das Projektil so sanft ab, dass es beim Überschlagen nicht zerstört wird, oder man bremst es so stark, dass es zum Stillstand kommt, ehe es sich überschlagen kann. Im ersten Fall verwendet man bevorzugt halibunendliche Ziele, für Letzteres eignen sich auch die gestaffelten Plattenziele.

Da sich beim Auffangen mit weichen Materialien die Projektile in der Regel im Laufe des Abbremsvorgangs überschlagen, ist eine Korrektur der Messkurven erforderlich, bevor die Daten interpretiert werden können. Abbildung 17 zeigt den Verzögerungsverlauf eines exemplarischen Versuchs sowohl vor als auch nach der Korrektur. Zusätzlich sind die Phasen »Vorwärtsflug«, »Drehung« und »Rückwärtsflug« eingezeichnet. Man beobachtet zu Beginn der Drehung zunächst eine Zunahme der gemessenen Beschleunigung, da die effektive Querschnittsfläche des Projektils zunimmt. Als gegenläufiger Effekt nimmt jedoch die Sensitivität des Sensors ab, da dieser nur die Beschleunigungskomponente in Richtung der Projektil-längsachse misst. Daraus resultiert der charakteristische Signalverlauf mit einem Maximum bei einem Anstellwinkel von 40 Grad. Überschreitet der Winkel schließlich 90 Grad, so ändert sich das Vorzeichen der Messwerte. Die Zusammenhänge der einzelnen Faktoren sind aus Abbildung 18 ersichtlich.

Durch den Vergleich verschiedener Varianten des Glasschaummaterials hat sich gezeigt, dass diese sich nicht nur in ihrer Dichte (Rohdichte bzw. Schüttdichte) unter-

scheiden, sondern auch in ihrem Verhalten beim Abbremsen der Projektile. Während die poröse Struktur der Platten im Bereich des Impakts lokal aufgebrochen und das Material damit kompaktiert wird, spielen bei den granularen Varianten auch Verdrängungseffekte eine Rolle, und zwar umso stärker, je feiner das Granulat ist. Dies führt zu einer unterschiedlichen Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verzögerungskräfte, wie in Abbildung 19 gezeigt. Die wirkenden Kräfte bei Glasschaumplatten nehmen mit steigender Geschwindigkeit zu, bei Granulat hingegen bleiben sie über einen weiten Geschwindigkeitsbereich annähernd konstant.

#### Fazit

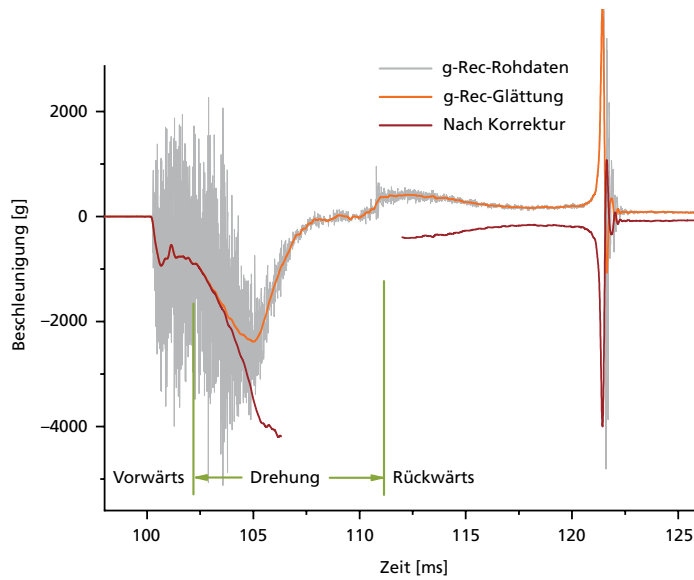
Mithilfe der durchgeführten Experimente zu den beiden Soft-Recovery-Varianten mit halibunendlichen Zielen bzw. Plattenzielen konnte eine Reihe von Materialien erfolgreich hinsichtlich ihrer Abbremsseigenschaften untersucht werden. Diese Daten stehen nun wiederum für weitere Simulationen von konkreten Zielauslegungen zur Verfügung. Damit ist ein wichtiger Schritt hin zu einem universellen – den jeweiligen Rahmenbedingungen anpassbaren – System zum weichen Auffangen von Projektilen gelungen. Die Einsatzmöglichkeiten reichen dabei von Auffängen im Labormaßstab für die Stoßfestigkeitsuntersuchung von einzelnen Komponenten bis hin zu großformatigen Auffängen für Qualifikationstests. Dieser zusätzliche Baustein aus dem Leistungsportfolio des Ernst-Mach-Instituts kann zukünftig in der Forschung und Entwicklung an Munitionssystemen zur Anwendung kommen. Konkret ist der Aufbau einer Versuchsanlage im großen Maßstab geplant.



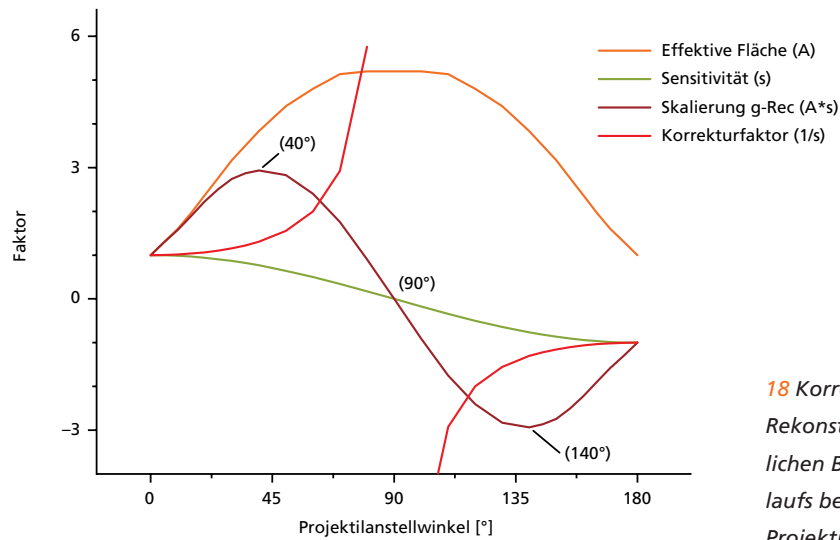
**Ansprechpartner**

**Dr. Sebastian Schopferer**

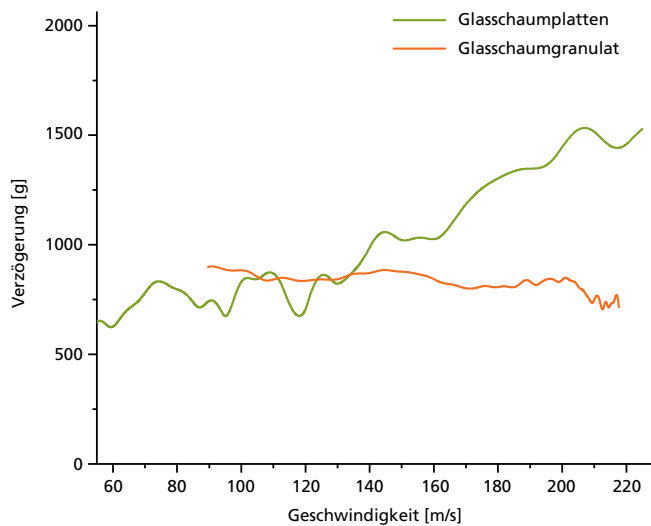
sebastian.schopferer@emi.fraunhofer.de



17 Rekonstruierter Beschleunigungsverlauf eines überschlagenden Projektils beim Auffangen.



18 Korrekturfaktoren zur Rekonstruktion des tatsächlichen Beschleunigungsverlaufs bei überschlagenden Projektilen.



19 Beobachtete Verzögerung in Abhängigkeit der Projektilgeschwindigkeit für verschiedene Materialien.







SICHERHEITS-  
TECHNOLOGIE UND  
BAULICHER SCHUTZ

# SICHERHEITSTECHNOLOGIE UND BAULICHER SCHUTZ

---

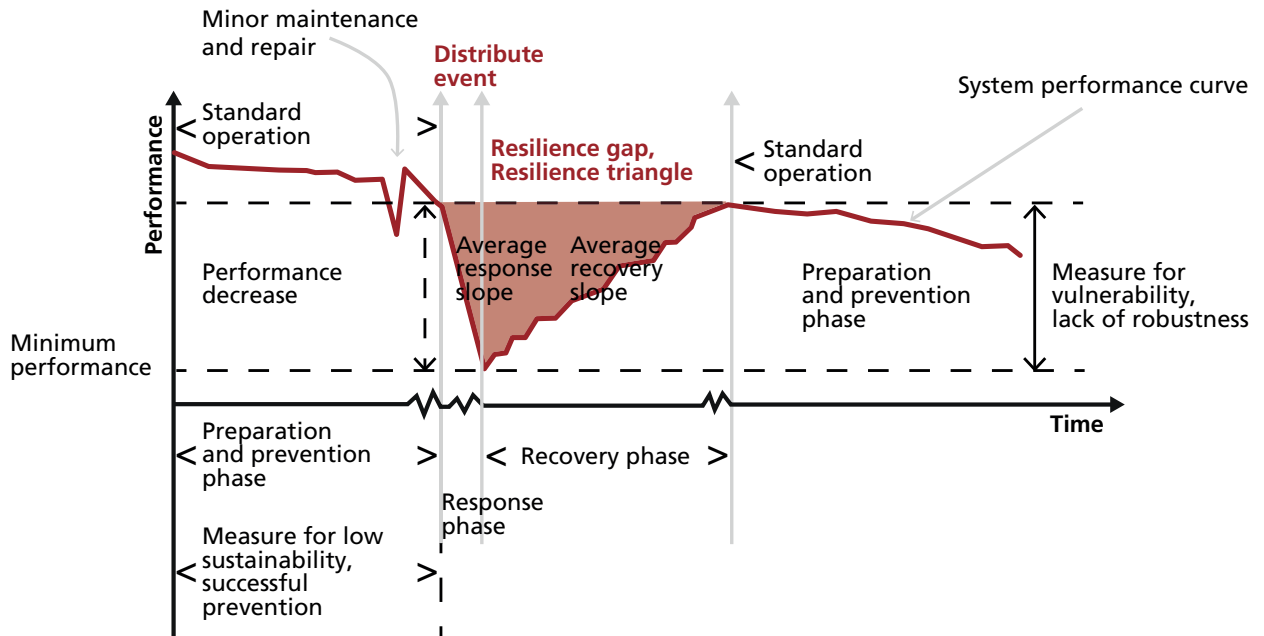
## EINLEITUNG

Die tragischen Terroranschläge des vergangenen Jahres bewegen ganz Europa. Sie haben auch gezeigt, dass es aufgrund neuer Herausforderungen in Zukunft für die private und öffentliche Sicherheit unumgänglich sein wird, sich frühzeitig mit zunächst nicht vorstellbaren Bedrohungslagen und Gefährdungspotenzialen zu beschäftigen. Durch terroristische Anschläge, aber auch durch Unfälle und Naturkatastrophen steigen die Bedrohungen für unsere Gesellschaft, parallel erhöht sich die Vulnerabilität aufgrund der zunehmenden Vernetzung kritischer Infrastrukturen und urbaner Einrichtungen. Daher müssen Maßnahmen zur Gewährleistung und Steigerung der Sicherheit von Gesellschaft, Gebäuden und Infrastrukturen ergriffen werden.

Die Abteilung Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz betrachtete im vergangenen Jahr vielfältige Möglichkeiten und Verfahren zur Gewährleistung der Sicherheit und zur Steigerung der Resilienz von Gebäuden und Infrastrukturen. Das Ziel ist es, Entscheidungsträgern, welche sich mit der Einschätzung von Risiken und der Umsetzung von Schutzmaßnahmen für Bauwerke befassen, Methoden bereitzustellen, durch welche die Resilienz (z. B. kritischer Infrastrukturen) erhöht werden kann. Im Idealfall wird der Ernstfall abgewendet oder zumindest die Auswirkung minimiert, das System soll schnellstmöglich zu einem stabilen Zustand zurückkehren. Abbildung 1 zeigt eine Möglichkeit der Quantifizierung von Resilienz anhand der zeitlichen Performanz eines betrachteten Systems.

Bei der Planung oder Anpassung von Gebäudekomplexen, kritischen Infrastrukturen oder ganzen urbanen Räumen wird zunehmend eine ganzheitliche Betrachtung der Systeme erforderlich sein. Die Bewertung einzelner Komponenten ist innerhalb hochkomplexer und vernetzter Systeme nicht mehr zielführend. Es ist neben der Betrachtung und Entwicklung von widerstandsfähigen baulichen Strukturen ebenso notwendig, die technische Gebäudeausrüstung und Fluchtwegberechnungen in die Betrachtungen des baulichen Schutzes mit einzubeziehen. Im Sinne der Ganzheitlichkeit ist es zudem erforderlich, Möglichkeiten zu finden, um eben jene Systeme hinsichtlich ihrer Resilienz bewerten und miteinander vergleichen zu können. Bisher stellt eine objektive und vor allem quantitative Erfassung der Resilienz jedoch eine große Herausforderung dar. Ohne eine Quantifizierung kann die erforderliche Akzeptanz von Resilienz als Systemeigenschaft aber nicht erreicht werden.

Im Folgenden werden Forschungsergebnisse und Arbeitsschwerpunkte vorgestellt, welche die umfassenden Betrachtungen der Abteilung Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz anhand ausgewählter Forschungsbeispiele darstellen. Diese liefern wichtige Erkenntnisse für die Bewertung und Sicherstellung der Resilienz baulicher Strukturen. Neben der Material- und Strukturentwicklung hat sich die Abteilung bezüglich der Resilienz auch der Entwicklung interdisziplinärer Maße und Methoden verschrieben, die auf unterschiedlichste technische Systeme übertragbar sind.



1 Performance über Zeitdiagramm zur Quantifizierung der Resilienz eines Systems.



Dr. Alexander Stolz

Abteilungsleiter Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz  
 Telefon 07628 9050-646 | alexander.stolz@emi.fraunhofer.de

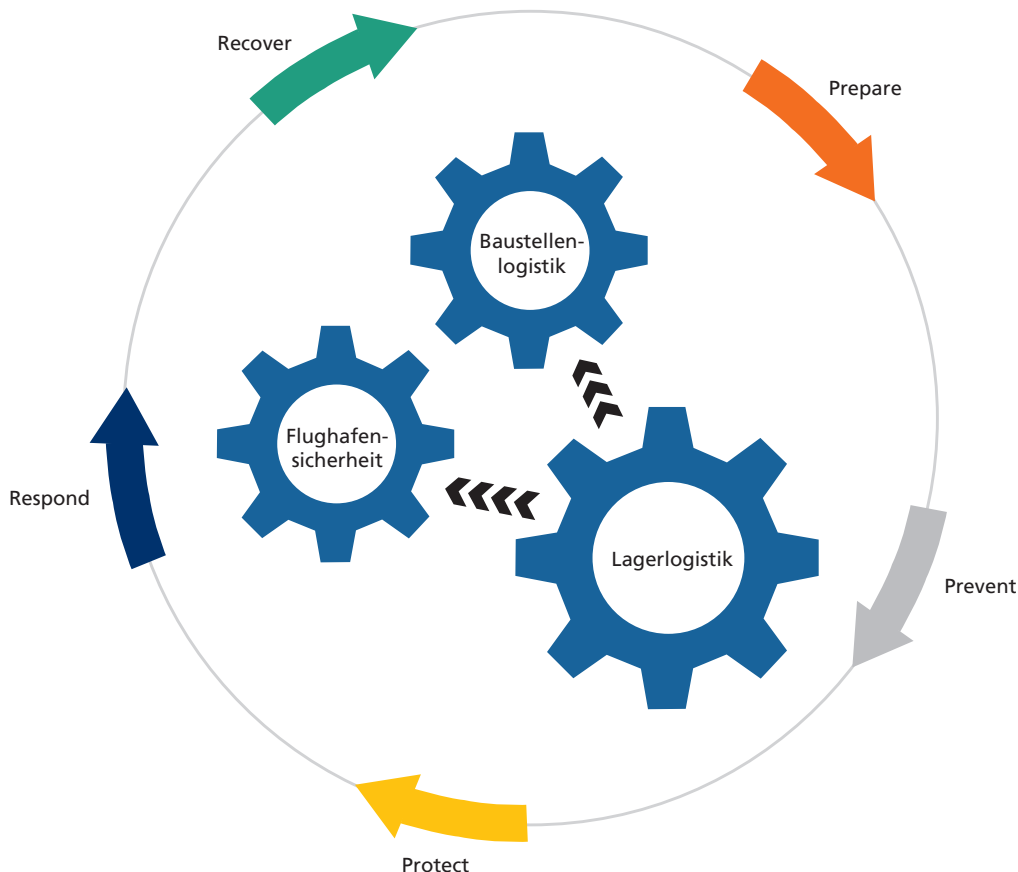
**Entwicklung neuer Resilienzmaße und Metriken zur Charakterisierung und Optimierung technischer Systeme**

In technischen und soziotechnischen Bereichen gewinnt der aus der Psychologie transferierte Begriff »Resilienz« zunehmend an Bedeutung und Aufmerksamkeit. Diese Entwicklung basiert auf immer häufiger auftretenden Ereignissen mit katastrophalen Auswirkungen, welche sowohl von Menschen als auch von der Natur hervorgerufen werden. Zu den bekanntesten Beispielen zählt die Nuklearkatastrophe von Fukushima am 11. März 2011, deren schwere Folgen eines Systemversagens, das durch ein unvorhergesehenes Naturereignis hervorgerufen wurde, mehrere Jahrzehnte spürbar sein werden. Damit die Auswirkungen solch schwerer Ereignisse in Zukunft verhindert bzw. minimiert werden können, steigen die Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit im Sinne der Resilienz. Diesbezüglich müssen technische Systeme beim Auftreten von sogenannten disruptiven Ereignissen nicht nur die Fähigkeit besitzen, ihre Funktionalität aufrechtzuerhalten oder in einen sicheren Zustand zu wechseln, sondern soll-

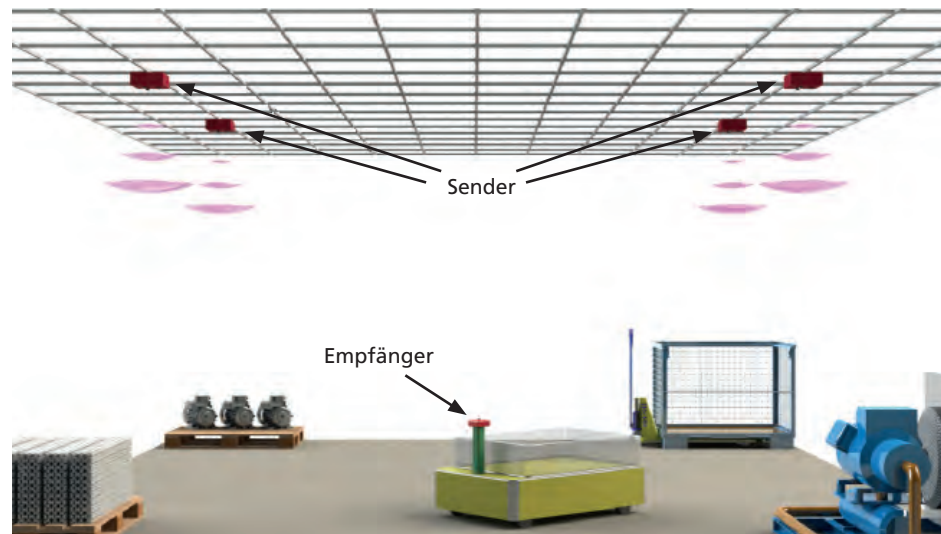
ten auch nach einem stattfindenden Funktionalitätsverlust wieder schnellstmöglich den Ausgangs- oder zumindest einen Grundzustand erreichen, der mindestens eine Basisperformance sicherstellt. Diese Funktionswiederherstellung sollte so gut wie möglich durch das System selbst, andernfalls durch menschliches Eingreifen erfolgen. Im besten Fall lernt das System sogar aus einem disruptiven Ereignis und weist nachfolgend einen stabileren Zustand auf als zuvor.

Im Rahmen des Pilotprojekts »Resilienzmaße zur Optimierung technischer Systeme« des Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg ist das Fraunhofer EMI zusammen mit den Projektpartnern bestrebt, neue Analysemethoden bezüglich Resilienz zu entwickeln. Diese praxistauglichen Methoden helfen dabei, unterschiedliche Systemdesigns schon während der Entwicklungsphase hinsichtlich ihrer Resilienz vergleichen zu können.

Das Hauptziel dieser Zusammenarbeit ist die Bestimmung technischer Resilienzgrößen und Metriken, welche die zeitliche Abhängigkeit von Funktionalität und Performance eines technischen Systems im Falle eines



*2 Resilienzyklus eines technischen Systems mit seinen fünf Phasen: Prepare, Prevent, Protect, Respond, Recover. Schematische Darstellung der Übertragbarkeit der validierten praxistauglichen Metriken zur Bestimmung von Resilienzmaßen aus dem Bereich der Lagerlogistik auf soziotechnische Systeme im Bereich der Baustellenlogistik und der Flughafensicherheit.*



**3** Gerenderte Darstellung eines Indoor-Lokalisierungssystems aus dem Bereich der Lagerlogistik. Das Sensorsystem besteht aus mehreren Ultraschallsendern und einem mobilen Receiver am zu lokalisierenden Transportfahrzeug.

disruptiven Ereignisses charakterisieren. Dabei sollen die Maße unter Berücksichtigung aller Phasen des Resilienzzyklus (Abbildung 2) u. a. die Bereiche Zuverlässigkeit, Sicherheit oder Verfügbarkeit abdecken, welche je nach Systemanspruch und Anwendung unterschiedlich gewichtet werden können. Der Resilienzzyklus setzt sich aus fünf Phasen (Prepare, Prevent, Protect, Respond und Recover) zusammen, die bestimmten zeitlichen Abschnitten bei der Systemanwendung hinsichtlich eines disruptiven Ereignisses zugordnet werden können. Somit liegen die Phasen Prepare, Prevent und Protect temporär betrachtet vor der Störung und beziehen sich auf die Robustheit eines Systems, während die Respond- und Recover-Phasen nach dem Auftreten des disruptiven Ereignisses einzuordnen sind und die Systemreaktion nach einem Störfall charakterisieren. Erst mit einer Quantifizierung wird eine Akzeptanz von Resilienz als Systemeigenschaft und als Grundlage für Design und Optimierungsentscheidungen möglich sein. Ziel ist die Entwicklung interdisziplinärer Maße und Methoden, die auf (sozio-)technische und wenn möglich sogar auf urbane Systeme übertragen werden können.

Die Forschungsarbeiten innerhalb dieses Pilotprojekts beziehen sich auf ein konkretes Beispielsystem der Indoor-Lokalisierung aus dem Bereich der Lagerlogistik. Basierend auf der Datenkommunikation mittels Laufzeitdifferenz von Ultraschallsignalen, überwacht dieses energieautarke und

autonome Sensorsystem die Interaktionen zwischen Waren und mobilen Transporteinheiten innerhalb geschlossener Räume (Abbildung 3).

Damit in diesem Szenario Resilienzmaße identifiziert werden können, wird die zeitabhängige Änderung der Systemperformance auf unterschiedlichen Systemebenen bei initiierten disruptiven Störungen untersucht. Die hervorgerufenen Störungen umfassen u. a.:

- Die Unterbrechung von Datenverbindungen (durch Hindernisse innerhalb des Schallwellenpfads)
- Den Ausfall ganzer Sender- und Empfängerbaugruppen (durch Hardwareversagen oder fehlende Energieversorgung)
- Den Drift von Hardwarebauteilen (durch Temperaturänderung oder Ermüdung aufgrund der Lebensdauer)
- Die Störung von Netzwerkverbindungen (durch Störeinflüsse parasitärer elektrischer Magnetfelder)

Ein beispielhaftes zeitabhängiges Verhalten des Indoor-Lokalisierungssystems unter Berücksichtigung der Phasen des Resilienzzyklus ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Jede einzelne Phase offeriert unterschiedliche Möglichkeiten, um die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen. Sollte bei dem System ein schleichender Fehler, hervorgerufen z. B. durch die

Degradation der Hardware, auftreten, lässt sich beispielsweise innerhalb der Prevent-Phase mit einem Wartungsschritt auf Hardwareebene die Ausfallwahrscheinlichkeit der betreffenden Struktur reduzieren.

Dem Übermitteln fehlerhafter Datenpakete kann durch eine redundante Bauweise (z. B. zusätzliche Sender und Empfänger) innerhalb der Prepare-Phase entgegenwirkt werden. Erreicht die Systemperformance bei einem schwerwiegenden Ereignis (z. B. Ausfall von Sensorknoten) einen inakzeptablen Zustand, wird in der Recover-Phase die Systemregeneration durchgeführt. Mögliche Zustände der Systemregeneration reichen von einer akzeptablen Grundfunktion über den ursprünglichen Ausgangszustand mit alternativen Routingpfaden bis hin zu einer verbesserten Funktion mit effizienterer Performance. Bezüglich der Systemanwendung gilt es hierbei, den richtigen Balanceakt zwischen den Faktoren Kosten, Sicherheit und Verfügbarkeit zu ermitteln. Je katastrophaler die Folgen eines Systemausfalls sind, desto mehr Ressourcen wie Geld, Zeit, Know-how und Arbeitskräfte müssen eingesetzt werden.

Zur Realisierung der Projektziele entwickelt das Fraunhofer EMI mithilfe ingenieurstechnischer Simulationen sowie diskreter probabilistischer Simulation eine praxisnahe Methodik, um wesentliche resilienzrelevante Systemeigenschaften hinsichtlich der Abhängigkeit von Schadensereignissen zu erfassen. Dazu werden im Vorfeld Fehlermöglichkeits- und Auswirkungsanalysen (FMEA) sowie Fehlerbaumanalysen (FTA) erstellt, um die Zusammenhänge und Fehlerabhängigkeiten einzelner Subsysteme oder gar einzelner Komponenten zu ermitteln. Aufbauend darauf werden semiformale Modelle des betrachteten (Sub-)Systems konzipiert und hinsichtlich gezielter Parametervariation analysiert.

Zusammen mit den Projektpartnern werden unter realistischen Umgebungsbedingungen zusätzlich praktische Test-szenarios strukturiert durchgeführt. Dazu werden mehrere

Sensorknoten (Sender) und Empfänger sowie ein Gateway zu einem Server verbunden. Die Visualisierung der Empfängerlokalisierung erfolgt über eine webbasierte Anwendung. Bei diesen experimentellen Tests soll durch Variation und Modifikation von Systemdesign, Systemkomponenten und Algorithmen, bei manuell initiierten Störeinflüssen eine Bewertung des Systemverhaltens ermittelt und eine Optimierung des Gesamtsystems vorgenommen werden. Innerhalb dieser Testphase wird außerdem untersucht, inwieweit organisatorische Einflüsse relevant sind und ob Maßnahmen auf dieser Ebene im Optimierungsprozess berücksichtigt werden können.

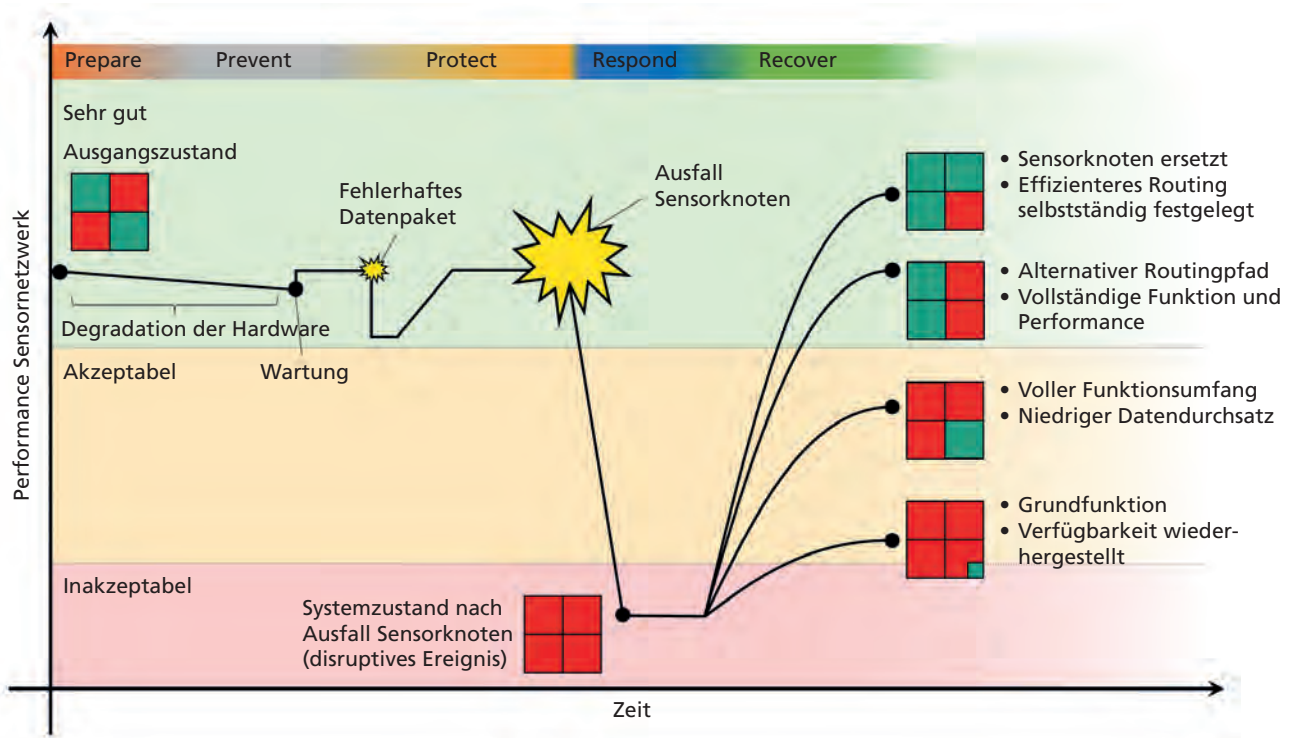
Im erweiterten Rahmen dieses Projekts werden die angewandten modellbasierten und experimentellen Methoden auf weitere Systeme, u. a. im Bereich der Flughafensicherheit und der Baustellenlogistik, angewendet, um eine Technologieunabhängigkeit nachzuweisen (Abbildung 2). Das geplante Fallbeispiel der Baustellenlogistik untersucht dabei die Eignung und den Erweiterungsbedarf des bestehenden Lokalisierungssystems der Intralogistik hinsichtlich der Gerätelokalisierung auf einer Baustelle. Augenmerk wird hierbei auf den typischen rauen Umgebungen sowie den organisatorischen und den operationellen Rahmenbedingungen liegen. Das Fallbeispiel eines Flughafencheckpoints behandelt ein gänzlich anderes und eindeutig sozio-technisches System. Neben den technischen Teilsystemen (z. B. Scanner) müssen soziale Aspekte wie die Vernetzung, das Personal und weitere Ressourcen sowie betriebsinterne Ablaufkonzepte berücksichtigt werden. Damit ergeben sich für den Betreiber interdisziplinäre Störeignisse, auf die reagiert werden muss. Sie beinhalten u. a. schwankendes Passagieraufkommen, variable Sicherheitsansprüche sowie (Teil-)System- und Funktionsausfälle. Um all diese Aspekte bei der methodischen Resilienzbestimmung zu berücksichtigen, sollen Schlüsseleinschränkungen der ausgewählten technischen Resilienzindikatoren bezüglich soziologischer Effekte identifiziert werden.



**Ansprechpartner**

**Stefan Ebenhöch**

stefan.ebenhoech@emi.fraunhofer.de



4 Beispielhaftes zeitabhängiges Verhalten des Indoor-Lokalisierungssystems bei einem disruptiven Ereignis unter Berücksichtigung aller Phasen des Resilienzyklus.

**Projekt ELASTIC für mehr Sicherheit und Robustheit von Gebäuden**

Ziel des Projekts ELASTIC (Enhanced Large Scale Architecture with Safety and Security Technologies and Special Information Capabilities) ist die Verbesserung der Sicherheit und Robustheit von multifunktionalen Gebäudekomplexen gegenüber natürlichen und durch Menschen verursachte Katastrophenszenarien. Zur Gewährleistung der Sicherheit wird es zukünftig unumgänglich sein, stark frequentierte und komplex genutzte Bauwerke so zu konstruieren, dass die Schädigung von Mensch und Bauwerk durch extreme Einwirkungen so gering wie möglich ist. Neben der Erarbeitung von widerstandsfähigen Strukturen in der Planung, beispielsweise durch geschickte Formgebung und die Verwendung von hochbelastbaren Materialien, werden auch die Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung sowie die dynamische Fluchtwegberechnung in den Prozess des sicheren Bauwerks einbezogen.

Innerhalb des Projekts werden Methoden entwickelt, die zukünftig bereits in der Planungsphase Anwendung finden, um dem Ziel der erhöhten Sicherheit, Robustheit und letztendlich auch Resilienz nachzukommen. Im Projektverlauf werden neue Materialien entwickelt, um die bauliche Struktur gegenüber Extremlasten zu verbessern. Relevante Szenarien und die daraus resultierenden Belastungen auf Gebäude wurden mittels extensiver Recherchen im Rahmen einer Risiko- und Gefährdungsanalyse ermittelt. Ein weite-

rer Bestandteil des Projekts ist die Entwicklung eines dynamischen Rettungswegleitsystems, welches mithilfe von Sensortechnologien und einer autarken Energieversorgung arbeitet und die Evakuierungszeit großer Menschenmengen deutlich verkürzt. Sensoren, die in die bauliche Struktur integriert sind, erkennen die dynamische Einwirkung, sie wird in einem Evaluierungsprozess bewertet. Die Schädigung der relevanten Bauteile wird berechnet. Dieses Ergebnis geht direkt in die dynamische Fluchtwegberechnung ein. Die Aufgabe des EMI innerhalb des Projekts besteht schwerpunktmäßig in der Material- und Strukturentwicklung sowie der Integration der Sensortechnik in die bauliche Struktur und deren Funktionsweise.

**Szenarioanalyse**

Die Ermittlung relevanter Gefährdungsereignisse war die Basis für die anschließende Betrachtung von Robustheit und Widerstand des multifunktionalen Gebäudekomplexes gegenüber extremen Belastungen. Hierfür wurden Risikoanalysen durchgeführt, die eine deterministische Auswertung für außergewöhnliche Lasten, die bislang nicht normativ geregelt sind, ermöglicht. Die hierbei ermittelten Gefahrenszenarien wurden als Basis für die zukünftige Berechnung des Strukturverhaltens, für das architektonische Design sowie für die Auslegung der Gebäudemanagementsysteme herangezogen. Innerhalb der Recherche wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Gefährdungskategorien erarbeitet. Die hervorgehobenen Szenarien wurden innerhalb von ELASTIC vertieft untersucht.

	Strukturschädigung	Keine strukturelle Schädigung
Naturkatastrophen	Starkwind Starkregen Schneefall, Eis, Hagel <b>Flut</b> <b>Erdbeben</b>	Hitzeperiode Kälteperiode
Nicht vorsätzliche Ereignisse (Unfälle)	Explosion Impakt Feuer	Rauch Luftverunreinigung Wasserverschmutzung Hitze
Vorsätzliche Ereignisse	<b>Explosion</b> <b>Impakt</b> <b>Feuer</b>	CBR-Angriff Internetkriminalität

*Tabelle 1 Definition von Gefährdungskategorien, die zu relevanten Gefährdungsszenarien führen.*

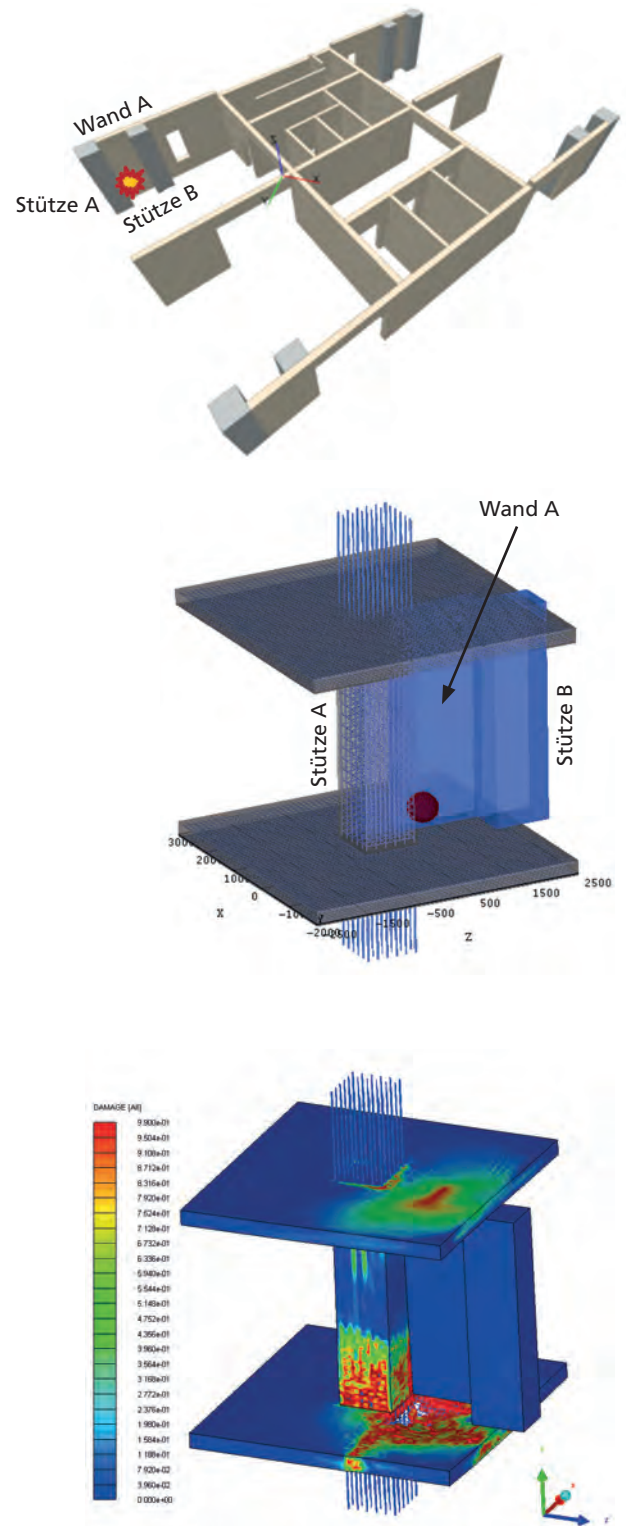


### Numerische Simulationen zur Untersuchung kritischer Bauteile

Zur Bewertung der Bauteilschädigung infolge explosiver Einwirkungen wurden FE-Analysen durchgeführt. Ereignisse bezüglich der Lokalität im Bauwerk und der Belastung sind vorab im Konsortium bestimmt worden. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Strukturbauteile mit hoher Kritikalität untersucht. Ein Szenario war die Analyse des Belastungsszenarios »Detonation einer Kofferbombe in der Lobby im Hotelbereich des Bauwerks«. In Abbildung 5 (oben) ist eine schematische Skizze des betrachteten Bereichs und des Orts der Belastung dargestellt. Das zugehörige numerische Modell ist in der Mitte zu sehen. Die numerisch ermittelte Schädigung (rote Bereiche) der Stahlbetonstruktur ist unten gezeigt. Es ist erkennbar, dass aufgrund des kleinen Abstands der Explosionsquelle zur Stütze und zur Decke eine ausgeprägte lokale Schädigung auftritt.

### Smart Elements – intelligente Wände mit mehr Widerstand

Um einerseits das Explosionsereignis zu detektieren und andererseits den Widerstand der baulichen Struktur zu erhöhen, wurden Bauteile als sogenannte Smart Elements entwickelt. Diese sind Sandwichkonstruktionen, die als Stützen, Decken und Wände fungieren können. Sie weisen eine sehr robuste Hülle gegen hohe Temperaturen und mechanische Beanspruchungen auf und besitzen einen eingebetteten Sensorknoten, der extreme Ereignisse wie hohe Temperaturen und Druckstoßwellen detektieren kann. Diese Smart Elements bestehen aus einem bewehrten Normalbeton, der von einer Schutzschicht aus einem speziellen UHPC (Ultra-High Performance Concrete) ummantelt ist. Dem Stahlbetonkern kommt die Aufgabe des Lastabtrags der Betriebslasten zu, während der Mantel aus UHPC aufgrund seiner hohen Robustheit für den Schutz gegenüber hochdynamischen Lasten und durch die verwendete Faserbewehrung zusätzlich für die Berücksichtigung brandschutztechnischer Anforderungen sorgt.



5 Numerische Simulation eines Explosionsszenarios, oben: schematische Skizze des untersuchten Bereichs, Mitte: numerisches Simulationsmodell, unten: lokale Schädigung.

Der ultrahochfeste Beton ist eine der jüngsten Materialentwicklungen in der Betonforschung. UHPC erreicht eine statische Druckfestigkeit von mehr als 150 Megapascal und ist aufgrund seiner Eigenschaften dem Normalbeton vor allem bei extremen Belastungen überlegen. Die Zugabe von duktilen Hochleistungsfasern (z. B. Stahl-, PVA-, Karbonfasern) sorgt für eine signifikante Steigerung des dynamischen Materialwiderstands. Im Projektverlauf wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen Fasergemischen durchgeführt, um die gegebenen Anforderungen bestmöglich zu erfüllen. Ziel war es, neben einem hohen Widerstand gegen Druckstoßbelastungen auch einen hohen Widerstand gegen hohe Temperaturen zu erreichen. Hierbei wurden sowohl das Fasermaterial (Stahl, PVA, Carbon) als auch der Faseranteil (1,0 Prozent bis 2,5 Prozent) und die Fasergeometrie (9 Millimeter bis 19 Millimeter) variiert. Auf Grundlage der durchgeführten quasistatischen und dynamischen Untersuchungen wurde ein Fasergemisch aus PVA und Stahlfasern für die Smart Elements definiert, welches sowohl die strukturellen als auch die brandschutztechnischen Anforderungen am besten erfüllt. Hierbei sorgen vor allem die Stahlfasern für eine höhere Festigkeit des UHPC sowie für eine höhere Bruchenergie und eine Reduktion der Sprödigkeit, während die PVA-Fasern vor allem das brandschutztechnische Verhalten der Struktur verbessern.

Zur Untersuchung der zuvor definierten Explosionsszenarien wurden zahlreiche dynamische Bauteilversuche an Smart Elements durchgeführt. In Abbildung 6 ist der schematische Aufbau eines Smart Elements gezeigt. Die Versuche wurden an Wandelementen im Skalierungsmaßstab 1:4 durchgeführt. Der Verbund zwischen dem Normalbetonkern und dem UHPC-Mantel wird mittels einer eingebrachten Rippenstreckmetallmatte gewährleistet. Abbildung 7 zeigt den Versuchsaufbau.

In Abbildung 8 ist die Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) des getesteten Wandausschnitts dargestellt. Auf der Vorderseite kommt es lediglich zu kleinen Abplatzungen. Auf der Rückseite treten starke Abplatzungen auf, und die Biegezugbewehrung wird teilweise freigelegt. Bei Untersuchungen der Resttragfähigkeit wurde der positive Einfluss der Schutzschicht auf das Tragverhalten festgestellt. Die strukturelle Schädigung wurde gegenüber Probekörpern, die lediglich aus konventionellem Beton hergestellt worden sind, durch die energieabsorbierende UHPC-Schicht deutlich vermindert.

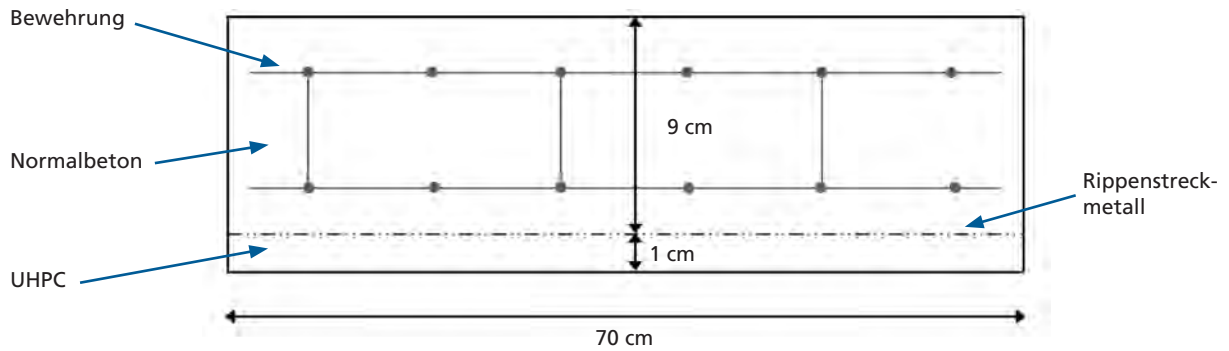
In weiteren Explosionstests ist die Funktionalität des Smart Elements als Gesamtsystem untersucht worden. Die Versuche wurden in einer Stahlbetonstruktur, in die die Smart Elements integriert worden sind, durchgeführt. Die in den Sensorknoten verwendeten Temperatur- und Drucksensoren konnten die Daten infolge eines Detonationsereignisses korrekt erfassen und kabellos an die Masterstation weitergeben. Diese Masterstation sammelt alle Sensordaten der angeschlossenen Sensoren und wertet die Signale bezüglich des Explosionsereignisses und der rechnerischen Schädigung aller betroffenen Bauteile aus. Diese Auswertung bewirkt schließlich eine Modifikation des bestehenden virtuellen Bauwerkmodells, auf das die dynamische Fluchtwegberechnung zugreift.



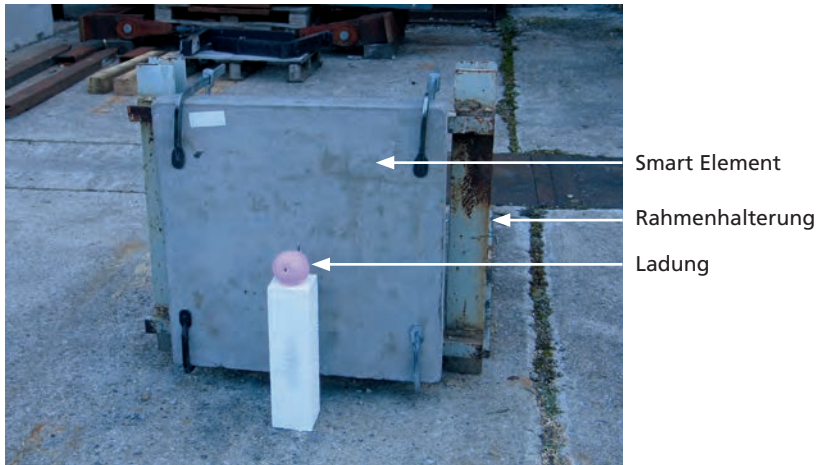
**Ansprechpartner**

**Dr. Oliver Millon**

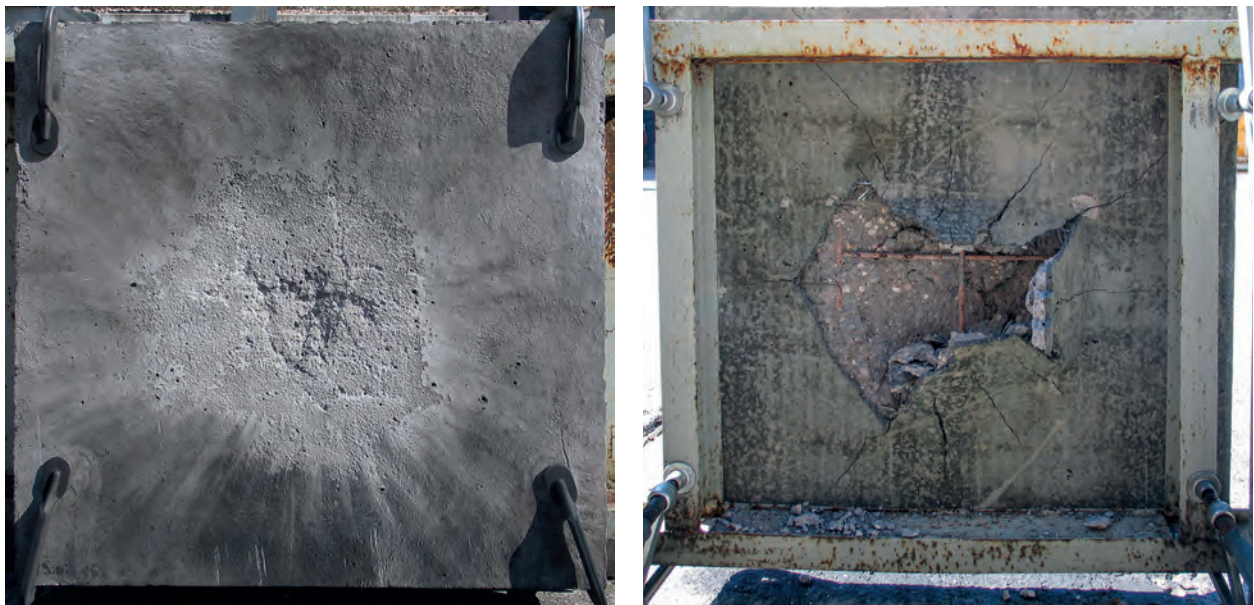
oliver.millon@emi.fraunhofer.de



6 Struktureller Aufbau eines Smart Elements.



7 Testkonfiguration: Detonationstest an einem Smart Element.



8 Smart Element nach Explosionsversuch, links: Vorderseite, rechts: Rückseite.





# WERKSTOFFDYNAMIK

## EINLEITUNG

Innovative Materialien und Werkstoffe nehmen in nahezu allen Bereichen eine Schlüsselposition ein. Sie helfen, neue Funktionalitäten zu erschließen, bestehende technische Lösungen entscheidend zu verbessern und Produkte und Fertigungsprozesse im Sinne der Nachhaltigkeit zu optimieren. Nachhaltige und effizientere Ressourcennutzung gewinnt auch im Bereich der Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung. Einen Schritt in diese Richtung stellt die Verwendung moderner Leichtbauwerkstoffe dar, da ein direkter Zusammenhang zwischen dem Gewicht eines Fahrzeugs und dessen CO<sub>2</sub>-Ausstoß besteht. Die Forderung nach leichteren Fahrzeugen bei gleichzeitig erhöhter passiver Crashesicherheit bildet in diesem Zusammenhang ein spannendes Forschungsfeld. Der Einsatz innovativer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen und die ständige Weiter- und Neuentwicklung von Bauteilen und Strukturen ermöglichen es, diesen scheinbaren Zielkonflikt zu lösen.

Leichtbau mit werkstoffgerechter Konstruktionsweise erfordert ein vertieftes Verständnis der Werkstoffeigenschaften unter betriebsrelevanten Belastungen bis hin zum Versagen, z. B. unter Crashbelastung. Am Fraunhofer EMI werden verstärkt Simulationstechniken eingesetzt, mit denen Werkstoff- und Verformungseigenschaften von der Herstellung bis zum Versagen rechnerisch simuliert werden können. Bei faserverstärkten Kunststoffen können auf diese Weise anisotrope Werkstoffeigenschaften abhängig vom Fasergehalt und der Orientierung berechnet und für die Festigkeits- und Crashbewertung genutzt werden. Der erste Beitrag der Abteilung Werkstoffdynamik beschreibt die Herausforderungen und Lösungsansätze einer solchen integrativen Simulation.

Neue Leichtbaukonstruktionen im Automobilbau – nicht zuletzt getrieben durch den Wandel hin zu alternativen Antriebskonzepten – machen es notwendig, bisherige Fahrzeugstrukturen zu evaluieren und neue Strukturen zu entwickeln, die insbesondere möglichen neuen Gefahrenquellen beim Crash gerecht werden. Mit der Veränderung der Strukturen, z. B. bei Elektrofahrzeugen, müssen auch die gültigen Crashtestnormen und die standardisierten Tests bei einem Crash überprüft und gegebenenfalls weiterentwickelt werden. Im zweiten Beitrag der Abteilung Werkstoffdynamik wird eine weiterentwickelte Seitenaufprallbarriere vorgestellt. Bis zu 14 3D-Kraftsensoren erlauben einen detaillierten Einblick in die Wirkweise der crashrelevanten Komponenten und ermöglichen somit eine Optimierung und Validierung von Crashsimulationsmodellen.



**Dr. Jens Fritsch**

Abteilungsleiter Werkstoffdynamik

Telefon 0761 2714-472 | [jens.fritsch@emi.fraunhofer.de](mailto:jens.fritsch@emi.fraunhofer.de)

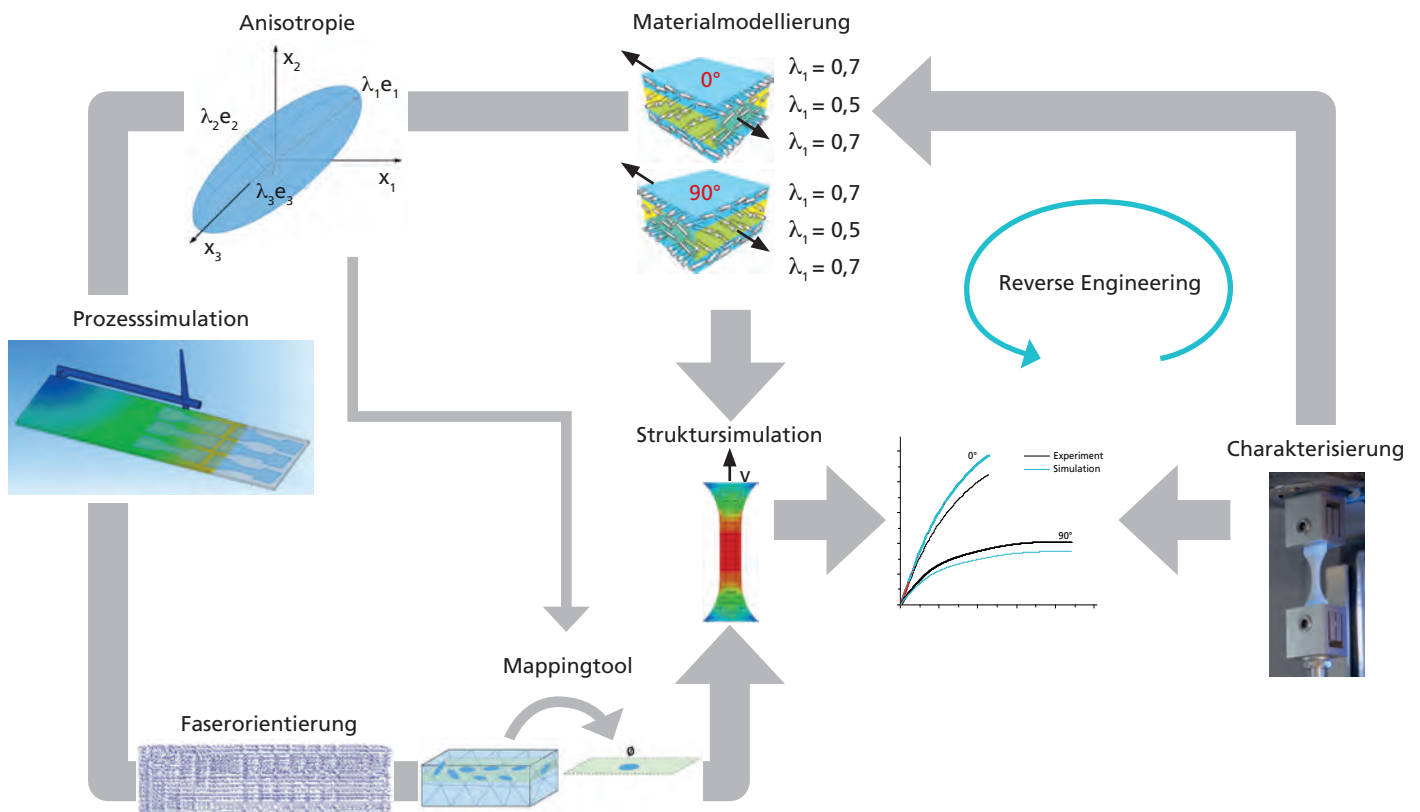
### Modellierung faserverstärkter Kunststoffe unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses

Ein steigendes ökologisches Bewusstsein ist nicht nur bei privaten Haushalten zu beobachten. Immer mehr Industriezweige verschreiben sich dem Ziel, ihre Fertigungsprozesse oder Produkte im Sinne der Nachhaltigkeit zu optimieren. Nicht zuletzt wird dieser positive Trend durch die Klimapolitik angetrieben. Im Fokus der Diskussionen über den CO<sub>2</sub>-Ausstoß steht unter anderem die Automobilindustrie, die angehalten wird, effizientere Fahrzeuge zu entwickeln. Einen Schritt in diese Richtung stellt die Verwendung moderner Leichtbauwerkstoffe dar, da ein direkter Zusammenhang zwischen dem Gewicht eines Fahrzeugs und dessen CO<sub>2</sub>-Ausstoß besteht.

Bei der Auswahl innovativer Leichtbaumaterialien, z. B. für den Interieur- und Exterieurbereich eines Fahrzeugs, spielen spritzgegossene faserverstärkte Kunststoffe (FVK) eine wichtige Rolle. Bei diesen werden z. B. Glas- oder Kohlenstofffasern in eine formgebende, stützende und lastübertragende Kunststoffmatrix eingebettet. Eine

lastgerechte Orientierungsverteilung der Fasern innerhalb eines Bauteils ermöglicht eine Erhöhung der mechanischen Widerstandsfähigkeit gegenüber den Hauptverformungsrichtungen. Das Spritzgussverfahren ermöglicht zudem eine funktionsintegrierende Konstruktionsweise und die Darstellung von stützenden Rippenstrukturen, die bei dünnwandigen Bauteilgeometrien für zusätzliche Steifigkeit sorgen. Zwar können mit endlosfaserverstärkten Kunststoffen durch die gezielte Ausrichtung von Fasersträngen höhere spezifische Steifigkeiten erzielt werden, aufgrund geringerer Fertigungskosten und Taktzeiten wird der Einsatz spritzgegossener FVK jedoch vor allem bei der Großserienherstellung bevorzugt.

Vor allem die durch den Herstellungsprozess bedingte komplexe Faserverteilung in spritzgegossenen FVK erschwert die Vorhersage der richtungsabhängigen Materialeigenschaften und erfordert gegebenenfalls die kostenintensive Herstellung von Prototypen. Üblicherweise werden daher numerische Simulationen durchgeführt, die eine Prognose über das anisotrope Materialverhalten erlauben. Während in Spritzgussimulationen, z. B. mit



1 Methodik zur Umsetzung einer integrativen Simulation.

Moldflow, eine Vorhersage über die Faserverteilung und -orientierung oder das Auftreten von Bindenähten gemacht wird, geben Struktursimulationen, z. B. mit LS-DYNA, Aufschluss über die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Grundvoraussetzung für eine Struktursimulation ist die Eingabe von Materialparametern, für deren Ermittlung Charakterisierungsversuche erforderlich sind. Die gleichzeitige Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Prozess- und Struktursimulationen und den Charakterisierungsversuchen bei der Generierung der Materialparameter wird »integrative Simulation« genannt.

Wie bei der herkömmlichen Vorgehensweise zur Ermittlung des Materialverhaltens werden die Charakterisierungsversuche simuliert und die Materialparameter sowie das Strukturmodell durch Abgleich von Spannungs-Dehnungs- oder Kraft-Weg-Kurven validiert. Zusätzlich werden bei der integrativen Simulation die fertigungsbedingten Parameter, wie die Faserorientierung und der Anisotropiegrad im Material, in das Strukturmodell mit einbezogen.

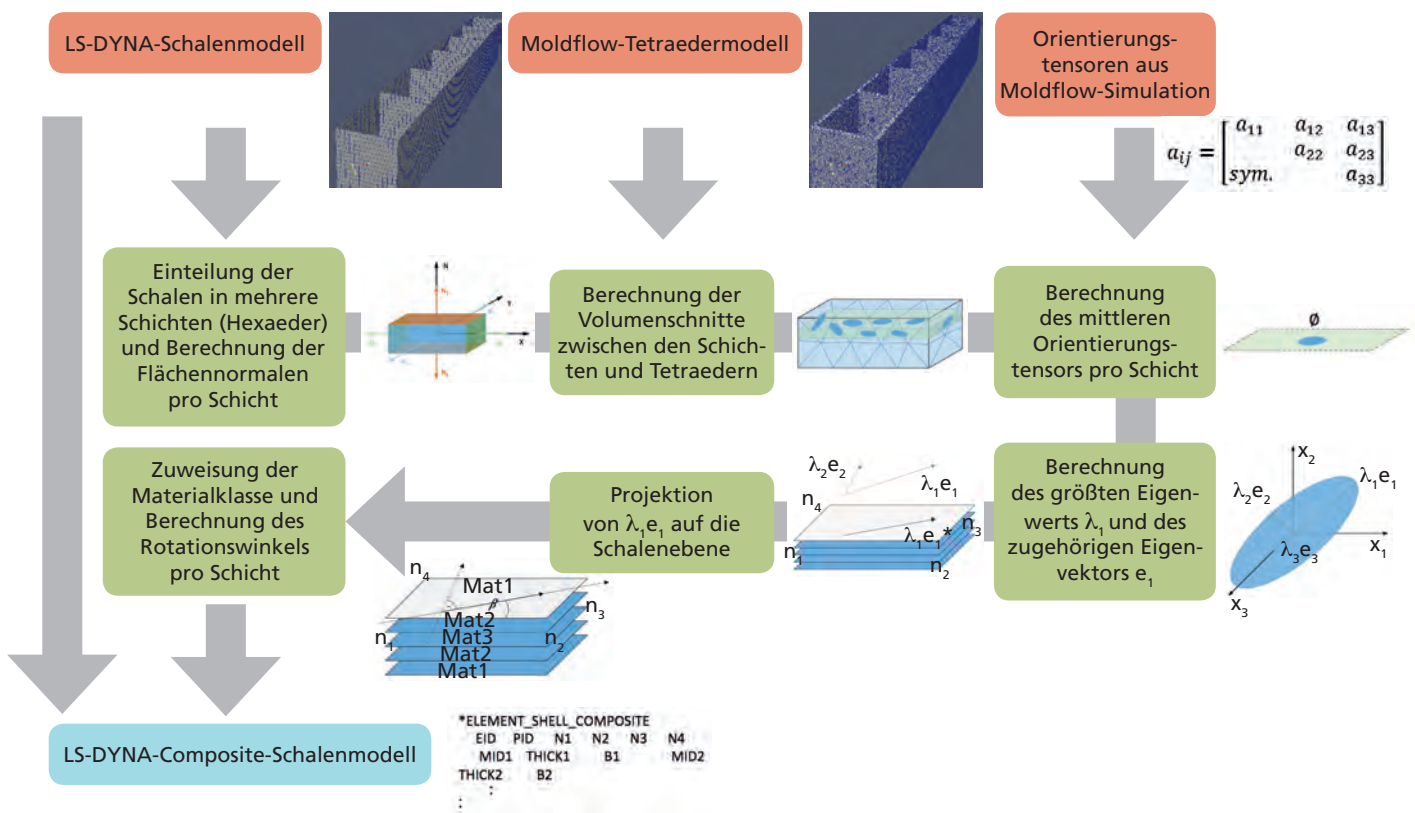
Neben der Tatsache, dass für die Spritzguss- und Struktursimulationen unterschiedliche Berechnungssoftwares eingesetzt werden, ist eine Übertragung der Spritzguss-simulationsergebnisse in die Struktursimulationsmodelle nicht ohne Weiteres möglich. Am Fraunhofer EMI ist daher eine Methodik zur Umsetzung einer integrativen Simulation erarbeitet worden, die schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist.

Zentrales Element dieser Methodik ist ein neu entwickeltes Mappingtool, mit dem die Übersetzung der Informationen über den Orientierungszustand automatisiert durchgeführt wird. Zudem werden die Netzinkonsistenzen, die sich durch unterschiedliche Diskretisierungen der Geometrie in der Spritzguss- und Struktursimulation ergeben, überwunden. Des Weiteren werden zur Abbildung unterschiedlicher Anisotropiegrade Materialklassen eingeführt und für jede Materialklasse eine Materialkarte erstellt. Die Berechnung der Ingenieurskonstanten zur Beschreibung der Elastizität erfolgt hierbei über einen Ansatz von Advani und Tucker [1]. Mithilfe eines Optimierungstools werden anschließend die plastischen Materialparameter kalibriert, wobei für alle Materialkarten jeweils dieselben Werte verwendet werden.

Das Flussdiagramm des Mappingtools ist in Abbildung 2 zu sehen. Nach dem Einlesen des Schalenmodells, des Tetraedermodells und der Orientierungstensen wird ein Berechnungsalgorithmus aufgerufen. Eine wichtige Größe innerhalb dieses Algorithmus ist der von Advani und Tucker eingeführte Orientierungstensor, welcher mithilfe einer Spritzgussimulation an diskreten Materialpunkten berechnet werden kann. Um die Informationen aus dem Orientierungstensor für eine Struktursimulation nutzbar zu machen, werden die Schalen zunächst in mehrere Schichten eingeteilt und der Raum, den jede Schicht durch ihre Dicke theoretisch einnimmt, berechnet. Anschließend werden die in diesen Räumen befindlichen Tetraeder zugeordnet und unter Berücksichtigung ihrer Volumenanteile die mittleren Orientierungstensen berechnet. Eine Hauptachsentransformation liefert die Eigenwerte ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) und die zugehörigen Eigenvektoren ( $e_1, e_2, e_3$ ) des Orientierungstensors. Es wird jedoch angenommen, dass nur der größte Eigenwert  $\lambda_1$  und der zugehörige Eigenvektor  $e_1$  für die Berechnung der im Struktursimulationsmodell erforderlichen Parameter zur Beschreibung des Anisotropiegrads und der Hauptfaserorientierung relevant sind. Zur Eliminierung des normal zur Schalenebene stehenden Anteils des Vektors  $\lambda_1, e_1$  wird dieser für jede Schicht auf die Schalenebene projiziert. Der Rotationswinkel, welcher die Faserrichtung des lokalen Elementkoordinatensystems in Richtung des projizierten Vektors dreht, kann direkt in das Composite-Schalenmodell eingegeben werden. Je nach Höhe des größten Eigenwerts bzw. des Betrags des projizierten Vektors wird jeder Schicht eine Materialklasse zugewiesen und die zugehörige Materialkartenummer in das Composite-Schalenmodell geschrieben. Wie zuvor erwähnt, wurden zur Darstellung unterschiedlicher Anisotropiegrade mehrere Materialklassen eingeführt. Die Einteilung der Materialklassen erfolgt hierbei durch die Definition unterschiedlicher Wertebereiche für den größten Eigenwert.

Die erarbeitete Methodik wurde am Beispiel eines verrippen Bauteils aus einem langglasfaserverstärkten Kunststoff angewendet. Es wurden dynamische Dreipunktbiegeversuche durchgeführt und simuliert. Das Versagen ist mithilfe des Keywords \*MAT\_ADD\_EROSION in LS-DYNA definiert worden. In Abbildung 3 ist ein Vergleich der Kraft-Weg-Kurven und der signifikanten Bauteildeformationen aus dem Experiment und der Simulation zu sehen. Die Bereiche, in denen die signifikanten Bauteildeformationen be-





2 Flussdiagramm des Mappingtools zur Generierung von Parametern zur Beschreibung der Hauptfaserorientierung und des Grads der Anisotropie im Struktursimulationsmodell.

obachtet werden, sind im Diagramm blau hervorgehoben. Hinsichtlich des Kurvenverlaufs, Kraftniveaus und Deformationsverhaltens stimmt das Simulationsergebnis gut mit dem Experiment überein. Dieses Resultat verdeutlicht die Prognosefähigkeit der Methodik.

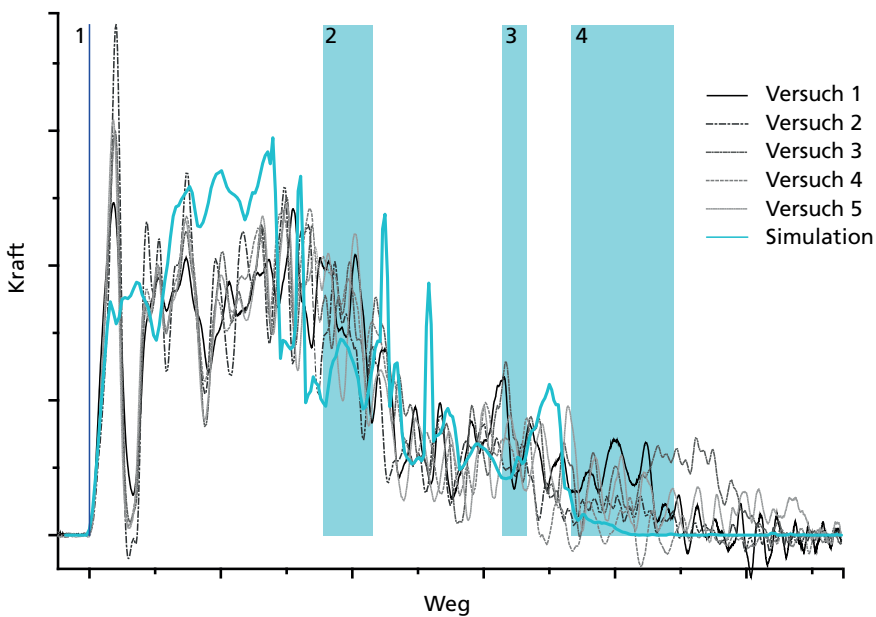
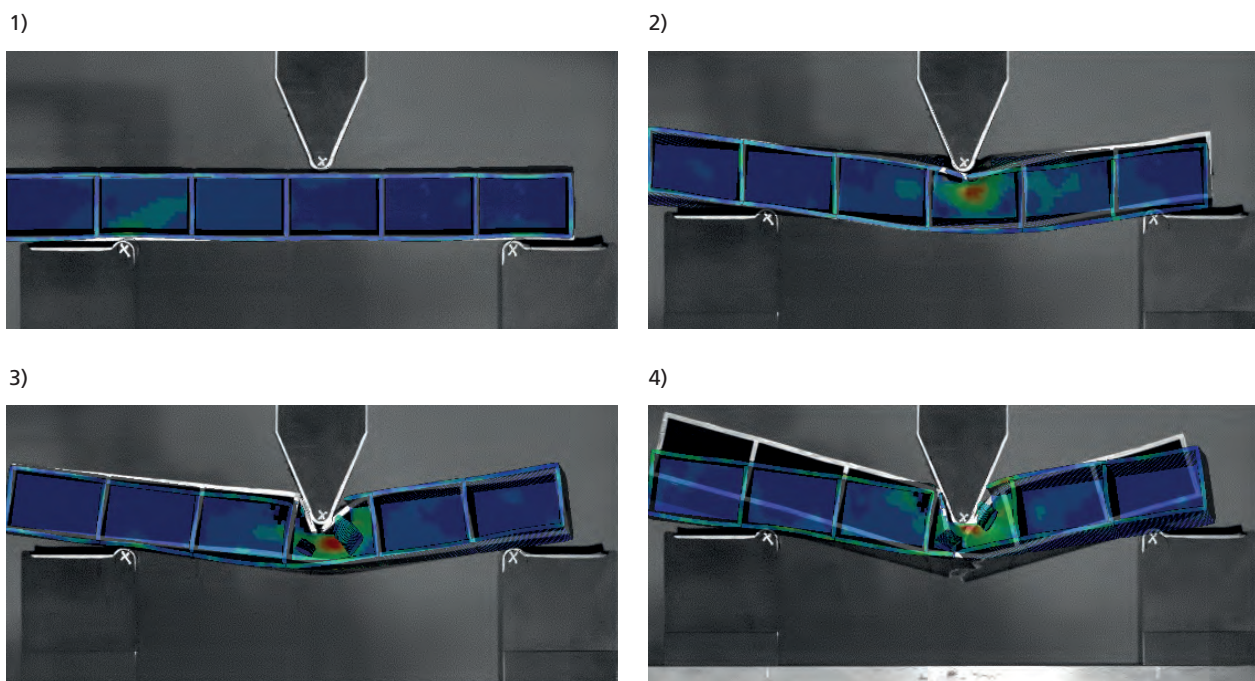
Eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Prognosefähigkeit einer integrativen Simulation ist die Validierung der Ergebnisse aus der Spritzgussimulation. Hierfür müssen die Fasern im realen Material zunächst sichtbar gemacht werden. Herkömmlicherweise werden hierfür CT-Aufnahmen erstellt, auf deren Basis eine sogenannte Faseranalyse durchgeführt wird. Aufgrund der hohen Anzahl und der oftmals willkürlichen Ausrichtung der Fasern ist eine Faseranalyse »von Hand« oder durch alleinige Sichtung der CT-Aufnahmen jedoch im besten Falle nur für eine erste qualitative Aussage nützlich. Um quantitativ aussagekräftige Faseranalysen, wie sie für die Validierung der Spritzgussimulationen nötig sind, zu erhalten, ist daher eine rechnergestützte Analyse der CT-Aufnahmen

wünschenswert. Kommerzielle Softwares bieten hierfür fertige Lösungen. In Abbildung 4 ist ein Beispiel einer rechnergestützten Faseranalyse zu sehen, welches mit dem Faserverbundwerkstoff-Analysemodul des Softwarepakets VGStudio MAX 2.2 durchgeführt wurde. Zum Vergleich sind zudem die aus der Spritzgussimulation berechneten Faserorientierungen abgebildet. Ganz unten sind die Querschnitte des Materials mit der Dicke  $t$  abgebildet. Anhand des Farbunterschieds ist hier zu erkennen, dass die Fasern in der mittleren Schicht anders orientiert sind als in den äußeren Schichten. Ein Schnitt durch die mittlere (Schnitt A) und äußere Schicht (Schnitt B) verdeutlicht dies. Während die Fasern in der äußeren Schicht größtenteils parallel zur Fließrichtung (0-Grad-Richtung) liegen, weichen die Faserorientierungen in der mittleren Schicht um Winkel zwischen 40 Grad und 60 Grad von der Fließrichtung ab. Dasselbe ist auch in der Spritzgussimulation zu erkennen, jedoch ist die Abweichung der Faserorientierungen in der mittleren Schicht mit Winkeln von ca. 10 Grad bis 15 Grad viel geringer ausgeprägt als im realen Material.

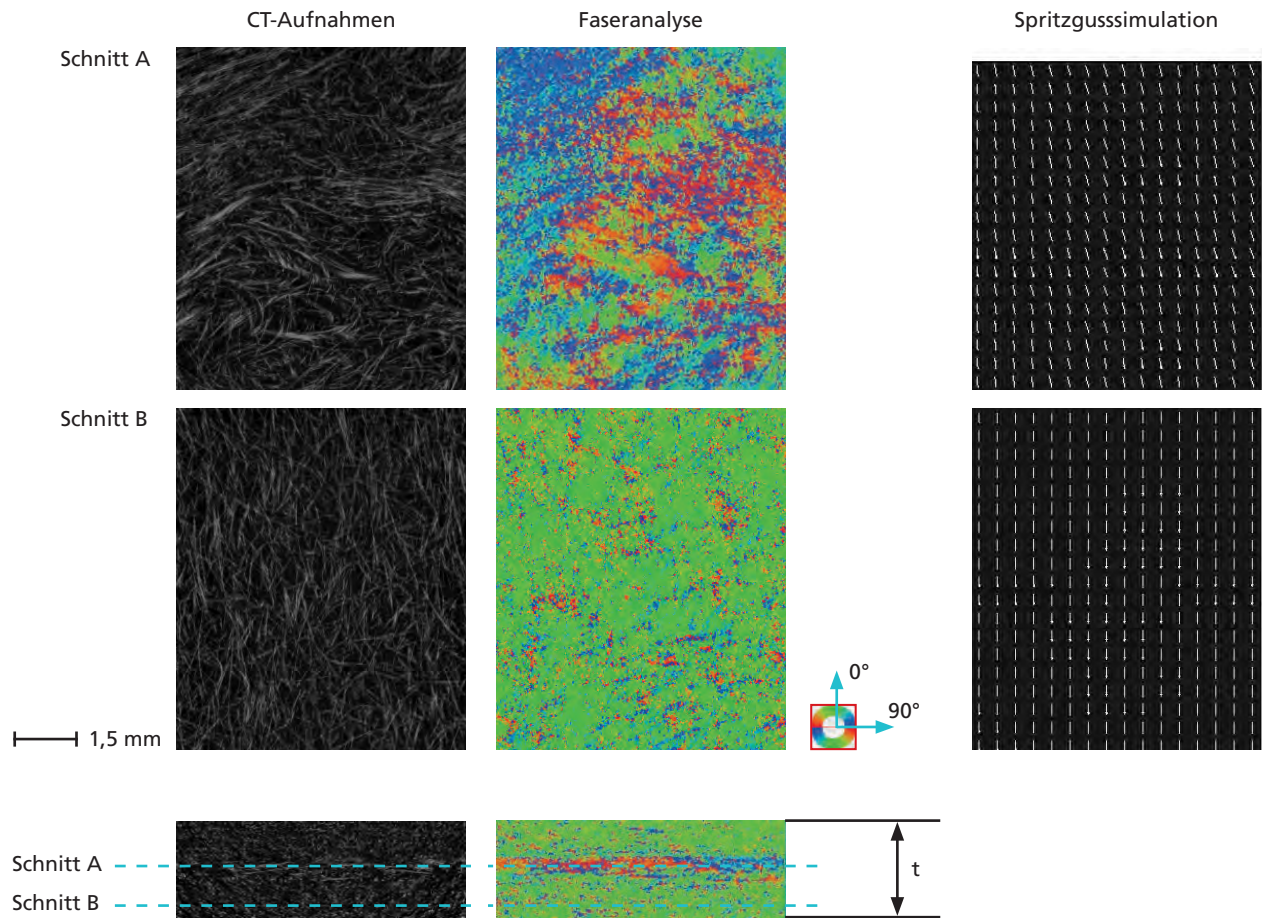
Erste Untersuchungen zeigten, dass eine rechnergestützte Faseranalyse durchaus ein effektives Werkzeug zur Validierung von Spritzgussimulationsergebnissen ist.

**Referenzen**

[1] Advani, S. G. and Tucker, C. L. (1987). The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites. *Journal of Rheology*, 31(8), 751–784.



3 Vergleich der Kraft-Weg-Kurven aus den Experimenten mit der Kurve, die mit der erarbeiteten Methodik simuliert wurde.



4 Faseranalyse eines spritzgegossenen faserverstärkten Kunststoffs auf Basis von CT-Aufnahmen in Gegenüberstellung mit der Spritzgussimulation.



**Ansprechpartnerin**  
**Cherry Ann Reclusado**  
 cherry.ann.reclusado@emi.fraunhofer.de

### Neuer Aufbau eines Pfahlaufpralltests

Strengere gesetzliche Sicherheitsbestimmungen und Regulierungen erfordern die Betrachtung neuer Lastfälle und Crashtestszenarien. Gleichzeitig besteht ein Bedarf nach fortschrittlicher Technologie für die Messungen und Analyse von experimentellen Crashtests. Der seitliche Pfahlaufprall kann aufgrund des Eindringens in die Fahrgastzelle und des hohen Crashpulses eine schwerwiegende Bedrohung für die Sicherheit der Passagiere darstellen. Daher ist seine Untersuchung für die Gesamtbewertung der Fahrzeugsicherheit von großer Bedeutung.

Der seitliche Pfahlaufprall kann für bestimmte alternativ angetriebene Fahrzeuge besonders kritisch sein, wie beispielsweise für solche Elektrofahrzeuge, die eine breite Batterie im unteren Bereich beherbergen. Mit Blick auf veränderte Sicherheitsbedingungen erfordert das Entwerfen neuer Fahrzeugkonstruktionen oder das Optimieren existierender Strukturen detaillierte und exakte numerische Modelle und Simulationstechniken. Um solche Techniken zu validieren, ist es wichtig, Versuchsdaten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu generieren, um detaillierte Informationen zu den Belastungen und Deformationen der jeweiligen strukturellen Komponenten zu erhalten. Außerdem bieten räumlich aufgelöste lokale Kraft-Zeit-Signale die Möglichkeit, kinematische Mechanismen eines strukturellen Subsystems während des Crashes zu analysieren. Sie liefern damit eventuell Ansatzpunkte für strukturelle Optimierungen, die zu einer erhöhten strukturellen Effizienz und einem verbesserten Lightweight-Design führen.

Aktuelle seitliche Pfahlaufprallbarrieren, die in den Euro-NCAP-Tests Verwendung finden, besitzen keine Kraftsensoren oder andere Messtechnik. Die in den US-NCAP- und FMVSS-Standardcrashtests eingesetzten Barrieren sind bereits mit sechs unidirektionalen Kraftsensoren ausgestattet, die eine orts aufgelöste Messung der Kräfte in Aufprallrichtung ermöglichen. Die Barriere, die am EMI entwickelt

wurde, ist 1600 Millimeter hoch und 254 Millimeter breit und entspricht den amerikanischen und europäischen NCAP-Standards. Das Gewicht des Aufbaus zuzüglich der Messeinrichtung beträgt 1800 Kilogramm. Die Kräfte, die während des Crashes auftreten, werden von einer Anordnung von bis zu 14 3D-Kraftsensoren aufgezeichnet, mit denen der Pfahl über die gesamte Länge instrumentiert ist. Die einzelnen Sensoren sind auf Lasten von 500 Kilonewton in Aufprallrichtung (x-Richtung) und  $\pm 100$  Kilonewton in y- und z-Richtung senkrecht zu der Aufprallbewegung ausgelegt.

In der aktuellen Konfiguration ist der Pfahlaufbau als bewegliche Barriere in die inverse Crashanlage am EMI integriert. Dabei wird die Pfahlbarriere über ein Schlittensystem fest mit dem servohydraulischen Hyper-G-Katapultsystem verbunden. Es lassen sich somit – abgeleitet von realen Crashszenarios – beliebige Geschwindigkeits- oder Beschleunigungspulse realisieren.

Einer der ersten Bewertungstests, der durchgeführt wurde, um die Anwendbarkeit der Pfahlbarriere zu prüfen, war ein seitlicher Pfahlaufpralltest, der in Form und Positionierung an die Euro- und US-NCAP-Richtlinien angelehnt war. Für den Pfahlaufprall wurde eine Aufprallgeschwindigkeit von 20 Kilometern pro Stunde gewählt, die über eine Strecke von 300 Millimetern ab dem Kontakt zwischen Pfahl und Auto konstant gehalten wurde. Wie in Abbildung 5 zu erkennen, erlauben die unterschiedlichen Kraftsensoren eine orts aufgelöste Darstellung der Kraft-Weg-Signale. Auf diese Weise lassen sich Bereiche identifizieren, die für das Crashmanagement von Teilsystemstrukturen von großer Bedeutung sind.

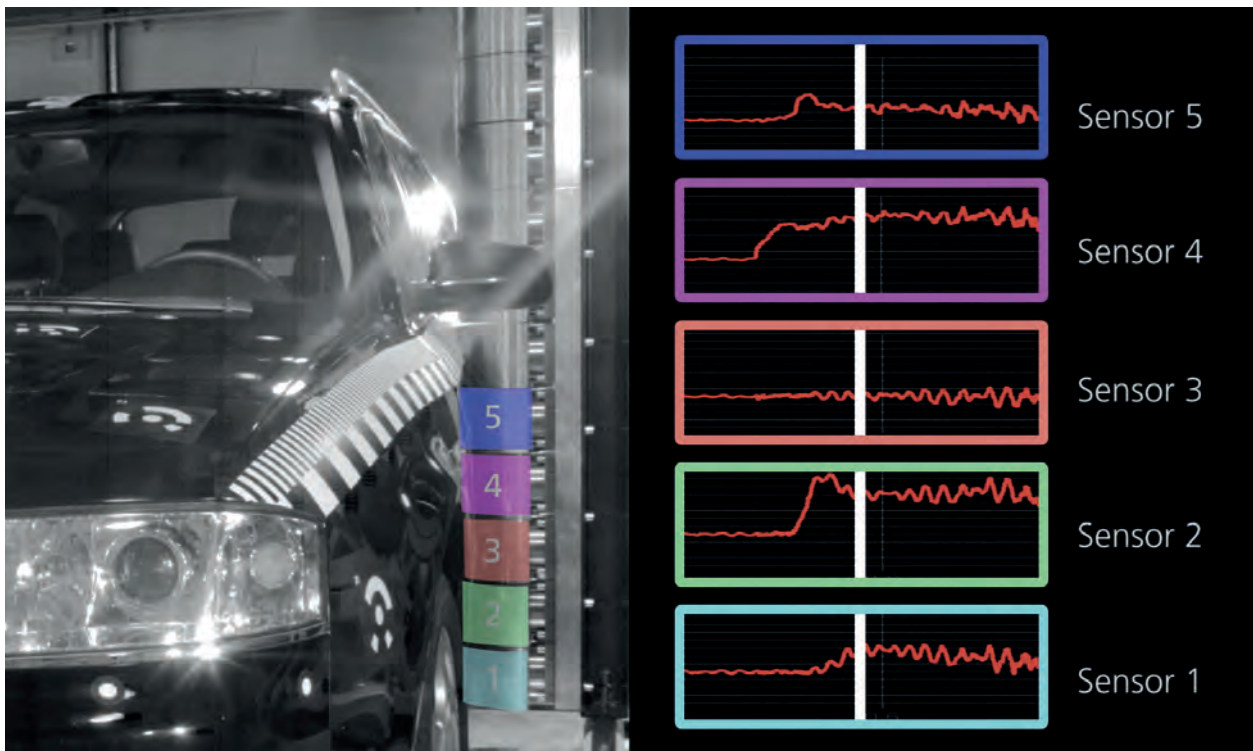
Mit diesem Pfahlaufpralltest und anderen – über den aktuellen Stand der Crashnormen hinausgehenden – Testaufbauten versucht das EMI, seinen Kunden aus dem Bereich Automotive neue, innovative Lösungen und Dienstleistungen anzubieten.



**Ansprechpartner**

**Michael Dlugosch**

michael.dlugosch@emi.fraunhofer.de



5 Die Kraft-Zeit-Signale der verschiedenen Sensoren ermöglichen Rückschlüsse auf das lokale Strukturverhalten des Fahrzeugs an den unterschiedlichen Messpositionen im Crash.



6 Die Forschungscrashanlage am Crashzentrum der Fraunhofer-Gesellschaft.



*7 Der instrumentierte Crashpfahl besitzt 14 Kraftsensoren, welche die während des Crashvorgangs lokal wirkenden Kräfte in drei Raumrichtungen aufzeichnen.*



8 Durch die Aufzeichnung des Crashvorgangs mit Hochgeschwindigkeitskameras aus verschiedenen Perspektiven lassen sich Video- und Messsignale synchronisiert auswerten.







MIKROSTRUKTUR-  
DYNAMIK

# MIKROSTRUKTURDYNAMIK

---

## EINLEITUNG

Die Abteilung Mikrostrukturdynamik befasst sich seit Jahren intensiv mit der Entwicklung numerischer Simulationsmethoden zur prognosefähigen Beschreibung schnell ablaufender physikalischer Prozesse, wie z. B. der Kollision von Fahrzeugen im Straßenverkehr oder der Druckwellenausbreitung nach der Detonation eines Explosivstoffs.

Kommerziell erhältliche Simulationssoftwarepakete sind zwar häufig in der Lage, gute Prognosen für Standardanwendungen zu liefern, jedoch stoßen diese Simulationsumgebungen bei den oftmals spezifischen Anforderungen unserer Kunden immer wieder an ihre Grenzen. Die Implementierung verbesserter Algorithmen gestaltet sich für einen Endanwender äußerst schwierig, da kritische Variablen häufig nicht abgerufen werden können. Aus diesem Grund hat das Fraunhofer EMI vor bereits mehr als zehn Jahren die hauseigenen Struktur- und Strömungslöser SOPHIA und APOLLO entwickelt und seitdem kontinuierlich ausgebaut.

Diese Methoden werden bereits intensiv und erfolgreich eingesetzt. In regelmäßigen Abständen werden bei Erdarbeiten Fliegerbomben aus dem zweiten Weltkrieg gefunden. Während der Bergung oder Sprengung eines solchen Blindgängers sind scharfe Sicherheitsmaßnahmen erforderlich. Zur Bemessung des Sicherheitsabstands werden derzeit jedoch konservative, einfache Berechnungsregeln oder Tabellenwerke verwendet. Je nach Konfiguration des Sprengkörpers kann dies zu aufwendigen Evakuierungsmaßnahmen und dem Kollaps wichtiger Verkehrsknotenpunkte führen. Der folgende Beitrag beschreibt daher Methoden zur genaueren numerischen Berechnung eines Sicherheitsabstands im Fall eines Bombenfundes. Hierfür wird unter anderem der APOLLO-Blastsimulator eingesetzt, um die Ausbreitung einer Druckwelle in einem Stadtgebiet detailliert beschreiben zu können.

Die Verfügbarkeit einer exzellenten Berechnungsumgebung bei der Durchführung prognosefähiger Simulationen ist jedoch nicht die einzige Leistung unserer Entwicklungen. Insbesondere in der Crash- und Impaktsimulation werden verlässliche verzerrungsratenabhängige Werkstoffkennwerte benötigt, um die komplexen Materialmodelle zu kalibrieren. In den vergangenen Jahren hat das EMI einen Split Hopkinson Tension Bar aufgebaut, der eine Messung von Werkstoffkennwerten bei Dehnraten in der Größenordnung von  $1000 \text{ s}^{-1}$  ermöglicht, ohne dabei das Messsignal durch überlagerte Schwingungen zu verfälschen, wie es oftmals bei servohydraulischen Prüfanlagen auftritt. Im zweiten Beitrag werden die Möglichkeiten der Materialprüfung unter Verwendung des neu aufgebauten Split Hopkinson Tension Bars an vier verschiedenen Werkstoffen (Stahl, kohlenfaserverstärktem Kunststoff, Wolframschwermetall und Klebstoff) dargestellt.



**Dr. Michael May**

Abteilungsleiter Mikrostrukturdynamik

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

### Simulationsbasierte Gefährdungsanalyse für die Kampfmittelbeseitigung

Während des zweiten Weltkriegs wurden weit über eine Million Bomben über Deutschland abgeworfen. Nach unterschiedlichen Schätzungen sind davon zwischen 5 und 15 Prozent nicht explodiert [1]. Noch immer liegt eine große Zahl dieser Blindgänger unentdeckt im Boden. Allein in Nordrhein-Westfalen wurden in den letzten 50 Jahren ca. 20 000 Blindgänger gefunden und beseitigt. Im Hamburger Stadtgebiet werden noch etwa 3000 bislang nicht gefundene Bomben vermutet [1]. Diese beispielhaft genannten Zahlen belegen, dass die Kampfmittelbeseitigung auch 70 Jahre nach Kriegsende noch ein aktuelles Problem ist.

Zur systematischen Ortung von Blindgängern stehen den Kampfmittelräumdiensten in Deutschland historische Luftbildaufnahmen zur Verfügung, die während der Angriffe von den Alliierten aufgenommen wurden. Damit ist es möglich, bereits im Voraus solche Gebiete, die für Bauvorhaben oder für Großveranstaltungen vorgesehen sind, hinsichtlich einer Gefährdung durch nicht explodierete Weltkriegsbomben zu beurteilen. Eine große Zahl von Blindgängern wird allerdings erst im Zuge von Bauarbeiten zufällig entdeckt.

Wird eine Fliegerbombe gefunden, so wird diese nach Möglichkeit entschärft, geborgen und in Fachbetrieben entsorgt. Besteht die Möglichkeit einer sicheren Bergung jedoch nicht, wird die Bombe entweder entschärft oder aber vor Ort gesprengt. In allen Fällen sind Personen und Infrastruktur in der Umgebung des Fundorts gefährdet. Während der Bergung oder für die Sprengung müssen daher angemessene Sicherheitsmaßnahmen definiert und umgesetzt werden. Dies umfasst zumeist Straßensperrungen und Evakuierungen im betroffenen Gebiet.

Die Gefährdungen ergeben sich im Fall einer unkontrollierten Explosion oder einer geplanten Sprengung durch die Druckwelle der Explosion sowie durch die Splitter der Bombenhülle und gegebenenfalls auch aus Sekundärtrümmern von nahegelegenen baulichen Strukturen, die durch die Explosion fragmentiert werden. Die größte Zerstörungswirkung geht im Nahbereich von der Druckwelle aus. Aber auch bei größeren Abständen entsteht durch die Druck-

welle eine Gefahr für Personen im Freien und in Räumen, wenn etwa Fensterscheiben versagen und Splitterflug entsteht. Die maßgeblichen Sicherheitsabstände ergeben sich zumeist jedoch aus den maximal zu erwartenden Flugweiten großer Splitter aus der Bombenhülle.

Die Vorgehensweise bei einem Bombenfund besteht in einer konservativen Bemessung der Sicherheitsabstände unter Berücksichtigung des aufgefundenen Bombentyps und insbesondere der Sprengstoffmasse der Bombe. Evakuierungsmaßnahmen werden dann zumeist in kreisförmigen Bereichen um den Fundort unter Berücksichtigung des konservativ abgeschätzten Sicherheitsabstands durchgeführt. Zur Bemessung des Sicherheitsabstands werden einfache Berechnungsregeln oder Tabellenwerke verwendet.

Die konservative Bemessung der Sicherheitsabstände anhand einfach anzuwendender Berechnungsregeln ist ein grundlegendes und sinnvolles Konzept. Eine möglichst präzise Bemessung von Sicherheitsabständen ist jedoch insbesondere in den Fällen erstrebenswert, in denen Krankenhäuser, Pflegeheime, kritische Infrastrukturen oder stark befahrene Straßen betroffen sind, deren Räumung oder Sperrung mit großem Aufwand und inhärenten Risiken für die betroffenen Personen verbunden sind. Bei Verfügbarkeit einer präzisen, fundortspezifischen Bemessung könnten derartige problematische Evakuierungen und Maßnahmen vermieden werden, wenn sie nicht notwendig sind.

Eine präzise Berechnung von Sicherheitsabständen ist mit einfachen Methoden und daraus abgeleiteten Tabellenwerken jedoch nicht möglich. Eine genaue und zuverlässige Berechnung muss die physikalischen Prozesse einer unterstellten Explosion im Detail berücksichtigen und dabei die Gegebenheiten des Fundorts, des Terrains und der Bebauung im Umfeld mit einbeziehen. Gleichzeitig muss die Berechnung in einem zeitlich akzeptablen Rahmen durch geschultes Fachpersonal durchführbar sein.

Zusammen mit unseren Partnern CADFEM GmbH und virtualcitySYSTEMS GmbH sind wir daher auf dem Weg, ein computergestütztes Berechnungsverfahren zu entwickeln, welches eine zuverlässige und für den Benutzer unkomplizierte Vorhersage des Gefährdungsbereichs bei einer Kampfmittelbeseitigung erlaubt und damit zur Unterstützung der Kampfmittelräumdienste im Einsatz, aber

auch zu Schulungszwecken verwendet werden kann. Grundlage dieses Berechnungsverfahrens ist ein digitales Stadtmodell im CityGML-Format, in dem die bestehende Bebauung als dreidimensionales semantisches Modell mit hoher Genauigkeit georeferenziert hinterlegt ist. Derartige Stadtmodelle umfassen die Position und die äußere Gestalt aller Gebäude sowie auch zugeordnete Metadaten, z. B. zur Gebäudenutzung. Auch die Terrainoberfläche ist Bestandteil eines digitalen Stadtmodells. Es ist absehbar, dass die Stadtmodelle zukünftig auch Infrastrukturen wie Tunnel, Brücken und Versorgungsleitungen beinhalten. Digitale Stadtmodelle existieren – zumindest in einer Basisausbaustufe – mittlerweile für alle Kommunen in Deutschland.

Mit einem solchen digitalen Stadtmodell ist es möglich, die physikalischen Wirkungen einer Bombenexplosion im konkreten Umfeld des Fundorts zu analysieren und die tatsächlichen Gefährdungsbereiche realitätsnah zu berechnen. Unsere Partner haben hierzu im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts DETORBA eine Software zur Visualisierung und Evaluierung von Stadtmodelldaten entwickelt, die eine Schnittstelle zur Spezifikation von Explosions-szenarien enthält [2].

An diese Software können nun weitere Module zur Berechnung der physikalischen Wirkungen angedockt werden. Ein solches Modul ist der APOLLO-Blastsimulator [3], eine auf Explosionen, Blastwellen und Gasdynamik spezialisierte CFD<sup>1</sup>-Software, die am Fraunhofer EMI entwickelt wird. Im Gegensatz zu kommerziellen CFD-Programmen wurde der APOLLO-Blastsimulator maßgeschneidert für den oben genannten Anwendungsbereich konzipiert und kann daher in besonderem Maß die Anforderungen nach hoher Genauigkeit und kurzer Berechnungsdauer erfüllen. Zudem kann die Software weitestgehend ohne Benutzereingaben allein auf der Basis von Geometriemodellen und Szenariospezifikationen betrieben werden. Damit kann sie bestens in andere Softwareumgebungen eingebettet und automatisiert angewendet werden. Letztendlich sollen für den Nutzer beim Kampfmittelräumdienst keine besonderen CFD-Kenntnisse erforderlich sein. Zudem bildet der weitgehend automatisierte Berechnungsablauf auch eine Grundlage für zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse.

Die physikalischen Modelle, die im APOLLO-Blastsimulator verwendet werden, sind identisch oder vergleichbar mit den Modellen, die auch in anderen CFD-Verfahren, wie z. B. ANSYS Autodyn, zum Einsatz kommen. Diese Modelle beschreiben die transiente Strömung eines kompressiblen, chemisch reagierenden Gasgemischs auf der Basis der fluiddynamischen Erhaltungsgleichungen. Diese partiellen Differenzialgleichungen werden durch kalorische und thermische Zustandsgleichungen geschlossen, welche die thermodynamischen Eigenschaften der involvierten Gase (Umgebungsluft und Detonationsprodukte) und damit die Beziehungen zwischen der inneren Energie, dem Druck, der Temperatur und der Dichte angeben. Zur Beschreibung des Detonationsvorgangs des Explosivstoffs kommt noch das Chapman-Jouguet-Modell hinzu, welches den Zusammenhang der Zustandsgleichungen mit der Detonationsgeschwindigkeit und dem Detonationsdruck herstellt.

Eine numerische Lösung des so formulierten Gleichungssystems wird im APOLLO-Blastsimulator durch die Zeitintegration einer Finite-Volumen-Approximation auf einem kartesischen Rechengitter erzielt. Dazu wird ein Verfahren höherer Ordnung verwendet, welches speziell auf die Simulation von Blastwellen abgestimmt wurde. Seine besondere Leistungsfähigkeit erzielt das Simulationsverfahren jedoch durch die Verwendung einer dynamischen Gitteradaption. Dabei wird das Berechnungsgebiet (also das Umfeld des Fundorts) nicht, wie oft üblich, durch ein gleichförmiges und zeitlich unveränderliches Berechnungsgitter diskretisiert. Stattdessen wird die räumliche Auflösung des Berechnungsgitters zeitabhängig an die sich ausbreitenden Druckwellen, die örtlichen Strömungsprozesse und die Oberflächen der stationären Objekte (der Gebäude) angepasst. Dadurch wird der Berechnungsaufwand sowohl hinsichtlich der benötigten Zeit als auch hinsichtlich des benötigten Speicherplatzes gering gehalten. Diese Effizienz ist auch eine Voraussetzung für eine hohe Berechnungsgenauigkeit, die unmittelbar mit der räumlichen Auflösung verknüpft ist.

Das hier verwendete Konzept der dynamischen Gitteranpassung DMA<sup>2</sup> ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. In unserem Konzept wird das Rechenggebiet zunächst in ein grobes, gleichförmiges kartesisches Gitter aufgeteilt.

1 CFD = Computational Fluid Dynamics.

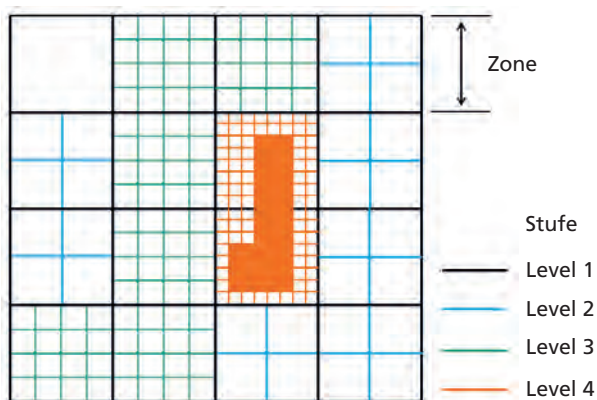
2 DMA = Dynamic Mesh Adaption. In der Literatur wird auch die Abkürzung AMR verwendet (AMR = Automatic Mesh Refinement).

Dieses Basisgitter mit der Zonenlänge  $L$  stellt die größte Auflösung für eine Simulation dar. In jede Zone kann nun ein verfeinertes Rechengitter mit einer zeitlich veränderlichen Auflösung eingebettet werden, die abhängig von den momentanen, lokalen Strömungszuständen gewählt wird. Verwendet werden dabei Auflösungen von  $2^{(N-1)}$  ( $N \in [1, \text{HiLevel}]$ ) Zellen pro Zonenkante, wobei  $N$  die Auflösungsstufe (Level) angibt. Die Auflösungsstufe wird vom Berechnungsalgorithmus anhand der in einer Zone vorliegenden Gradienten verschiedener Strömungsgrößen durch einen Vergleich mit globalen Maxima dieser Gradienten gewählt. Gebäude oder andere stationäre geometrische Objekte werden als Voxelmodell stets auf der feinsten Auflösungsstufe ( $N = \text{HiLevel}$ ) in die Rechengitter eingebettet.

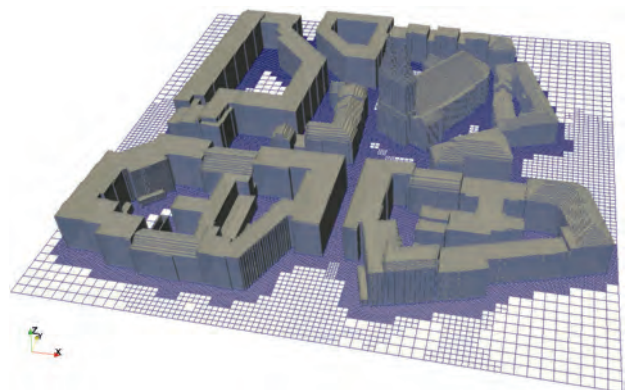
Die Größe des Rechengebiets und die verwendete Basisauflösung (Zonenlänge) werden automatisch anhand der Szenariospezifikationen, insbesondere der Bombengröße, abgeleitet. Der Benutzer kann nun entscheiden, ob eine möglichst schnelle oder eine möglichst genaue Berechnung gefordert ist. Entsprechend dieser Wahl wird die maximale Auflösungsstufe (HiLevel) festgelegt, wobei typischerweise Werte im Bereich drei bis fünf verwendet werden. Als Explosionsquellen werden entweder zylindrische Ladungen in beliebiger Orientierung modelliert oder, wenn dies physikalisch sinnvoll ist, halbkugelförmige, am Boden aufliegende Ladungen mit identischer Sprengstoffmasse als Approximationen hierfür verwendet.

Eine besondere Herausforderung bei der Simulation von Sprengstoffexplosionen ergibt sich aus der Existenz der veränderlichen Längenskalen: Die Abmessungen der Sprengstoffladung sind vergleichsweise klein gegenüber den Abmessungen des Bereichs, in dem die Wirkung der Druckwelle letztendlich zu berücksichtigen ist. In der Detonationsphase und während der initialen Blastwellenausbreitung müssen daher zur Erzielung einer hohen Genauigkeit der Simulation wesentlich höhere räumliche Auflösungen verwendet werden, als sie im späteren Verlauf der Ausbreitung der Druckwelle im Fernfeld erforderlich sind. Der eigentliche Detonationsvorgang und die initiale Blastwellenausbreitung werden daher in einem separaten Teilmodell berechnet. Dabei umfasst das anfängliche Berechnungsgebiet nur das unmittelbare Umfeld der Explosionsquelle und kann entsprechend hoch aufgelöst werden. Sobald die sich ausbreitende Blastwelle den Rand dieses Gebietsausschnitts erreicht, werden die Gebietsgröße und auch die Abmessung der Gitterzellen für die weitere Berechnung verdoppelt. Dieser Vorgang der globalen Gitteranpassung wird so oft wiederholt, bis die Ausdehnung der Blastwelle einen Übertrag in das Gesamtmodell erlaubt. Die Steuerung der globalen Gebiets- und Auflösungsanpassung und die Übertragung in das Gesamtmodell sind im APOLLO-Blastsimulator ebenfalls vollautomatisch und erfordern keine Benutzereingaben. Auch dies ist ein besonderes Merkmal unseres Konzepts.

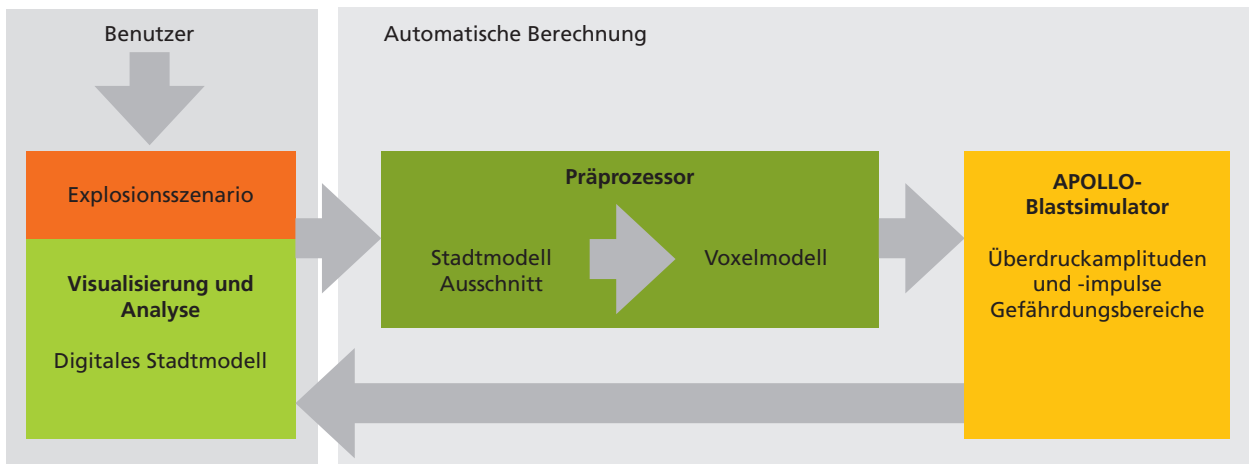
a)



b)



1 a) Schematische Darstellung des zonalen Konzepts der dynamischen Gitteradaptation, b) Beispiel eines im zonalen Berechnungsgitter eingebetteten Stadtteilmodells.



2 Prozesskette der simulationsbasierten Gefährdungsanalyse.

Eine vollständige Simulation umfasst den Zeitbereich von der Initiierung der Detonation bis zu dem Zeitpunkt, in dem die Amplitude der sich ausbreitenden Druckwelle auf einen hinreichend kleinen Wert abgeklungen ist, von dem keine Gefährdung mehr ausgeht (typischerweise ein Kilopascal). Während der Simulation werden an allen Gebäude- und Terrainoberflächen die lokal auftretenden, maximalen Überdruckamplituden und die lokal auftretenden, maximalen Überdruckimpulse<sup>3</sup> aufgezeichnet. Anhand dieser beiden charakteristischen Größen kann nun eine nachgeschaltete Gefährdungsanalyse durchgeführt werden. Hierzu sind im APOLLO-Blastsimulator eine Vielzahl von Kennlinien hinterlegt, welche die Belastungsgrenzen für typische bauliche Komponenten, wie z. B. Mauerwerkswände, Betonwände und Verglasungen, sowie auch für Personen als funktionale Zusammenhänge von Überdruckamplitude und maximalem Überdruckimpuls angeben. Damit kann die räumliche Ausdehnung der gefährdeten Bereiche spezifisch für Personenschäden und Schäden an unterschiedlichen baulichen Strukturen anhand der aufgezeichneten Verteilungen der Überdruckamplitude und des maximalen Überdruckimpulses ausgewertet werden. Zur Visualisierung der Gefährdungsbereiche und zur weiteren Verwendung durch den Benutzer werden die berechneten Bereiche wieder in das digitale Stadtmodell zurückübertragen. Damit stehen den Experten des Kampfmittelräumdiensts alle für die Festlegung des Sicherheitsbereichs relevanten Informationen in einer komfortablen Softwareumgebung zur Verfügung. Abbildung 2 verdeutlicht die so ablaufende Prozesskette.

Die eigentlichen Berechnungsprozesse laufen auf einem Server im Hintergrund der Anwendung. Die Berechnungen können daher auch von einem mobilen Endgerät aus gestartet und ausgewertet werden.

Ein beispielhaftes Ergebnis einer simulationsbasierten Gefährdungsanalyse ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Abbildung zeigt die für eine unterstellte Explosion zu erwartende räumliche Verteilung von Glasschäden (a) und Mauerwerksschäden (b) im bereits in Abbildung 2 gezeigten Stadtteilmodell. Da in den derzeit verfügbaren digitalen Stadtmodellen keine Informationen zu Bauweisen und zu vorhandenen Fenstern enthalten sind, zeigen die Auswertungen hier lediglich die gegebenenfalls auftretenden Schäden. Die Gefährdungsbereiche (rot eingefärbt) weichen deutlich von einer Kreisform ab, wie sie in der derzeit etablierten Vorgehensweise veranschlagt worden wäre. Dies ist eine Folge von Abschattungs- und Fokussierungswirkungen, die bei der Ausbreitung der Druckwelle infolge der Wechselwirkungen mit den Gebäuden auftreten.

#### Ausblick

Die Kombination der in DETORBA entwickelten Software mit dem am EMI entwickelten APOLLO-Blastsimulator wurde erstmals bei der 3. Konferenz »Digitale Städte« 2014 in Nürnberg vorgestellt. Damit die simulationsbasierte Gefährdungsanalyse bei den Kampfmittelräumdiensten im Einsatz verwendet werden kann, müssen noch weitere Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden. Hierzu gehört

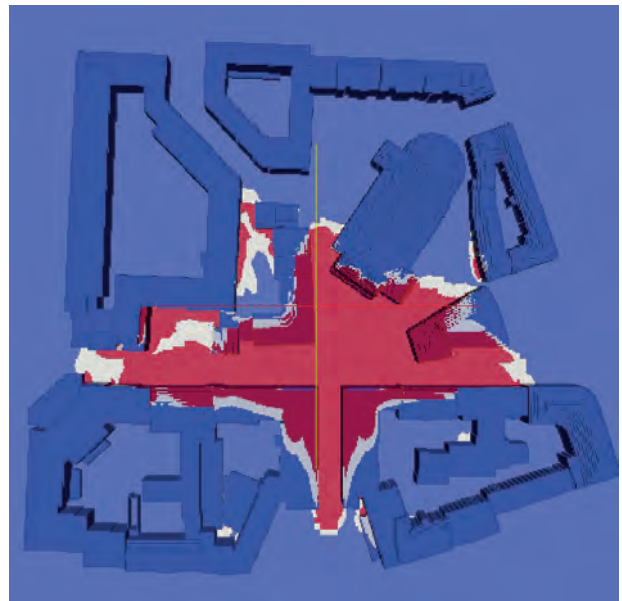
<sup>3</sup> Der Überdruckimpuls bezeichnet das Zeitintegral des Überdrucks; die Größe ist maßgeblich für den auf eine belastete Fläche übertragenen Impuls.

die Entwicklung und Implementierung eines Moduls zur Simulation der Splitterflugbahnen und zur Bewertung der Gefährdung durch Splitter. Des Weiteren soll der gesamte Berechnungsablauf beschleunigt werden. Derzeit benötigt ein Lauf mit hoher Genauigkeit je nach Szenario noch mehrere Stunden. Durch eine Optimierung des Rechenprozesses und Parallelisierung der Berechnungsverfahren wird jedoch eine deutliche Verkürzung der Rechenzeiten möglich sein. Die Arbeiten sind für 2016 vorgesehen. Unabhängig von dieser Entwicklung bietet das Fraunhofer EMI auch Lizenzen für die CFD-Software APOLLO-Blastsimulator an. Darüber hinaus nutzen wir die APOLLO-Software intensiv für Dienstleistungen im Bereich der Analyse von Explosionswirkungen, wie sie z. B. in [4] dargestellt sind.

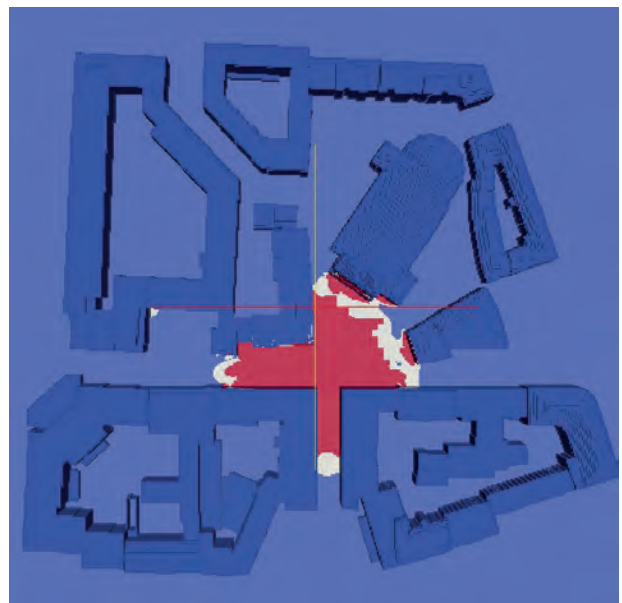
#### Referenzen

- [1] Birkenstock, G. (2011). Brisante Hinterlassenschaften. Beitrag in der Deutschen Welle vom 2. Dezember 2011, [www.dw.com/de/brisante-hinterlassenschaften/a-15573862](http://www.dw.com/de/brisante-hinterlassenschaften/a-15573862).
- [2] Verfahren zur Analyse von Detonationseinwirkungen in urbanen Gebieten (DETORBA), BMBF-Projekt. [www.schutzkommission.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/FIS/DownloadsInformationsangebote/DownloadsForschungsberichte/DownloadsKMU\\_innovativ/BroschueredeTORBA.html](http://www.schutzkommission.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/FIS/DownloadsInformationsangebote/DownloadsForschungsberichte/DownloadsKMU_innovativ/BroschueredeTORBA.html).
- [3] [www.emi.fraunhofer.de/leistungsangebot/produkte/apollo/](http://www.emi.fraunhofer.de/leistungsangebot/produkte/apollo/).
- [4] Klomfass, A., Stolz, A., Hiermaier, S. (2016). Improved Explosion Consequence Modelling with Combined CFD and Damage Models. Chemical Engineering Transactions, 48 (zur Veröffentlichung akzeptiert).

a)



b)



3 Bereiche, in denen für eine unterstellte Explosion mit Glasschäden (a) und zerstörtem Mauerwerk (b) gerechnet werden muss (Rot entspricht einer 100-prozentigen Zerstörungswahrscheinlichkeit, Blau den sicheren Bereichen, Grau kennzeichnet den Bereich der Modellunsicherheit).



**Ansprechpartner**  
**Dr. Arno Klomfass**

[arno.klomfass@emi.fraunhofer.de](mailto:arno.klomfass@emi.fraunhofer.de)

**Der Split Hopkinson Bar auf Zug eröffnet neue Möglichkeiten für die dynamische Materialprüfung**

Die Materialprüfung am Split Hopkinson Bar fristete lange ein akademisches Nischendasein. Am Fraunhofer EMI wird diese Technik jetzt zu einer von der Industrie abrufbaren Dienstleistung. Bei diesem Prüfprinzip wird eine Probe zwischen zwei Stäbe mit mehreren Metern Länge platziert. Über eine stoßartige Belastung des einen Stabs (Inputbar) wird eine Welle zunächst in den Stab eingeleitet, dann durch die Probe geleitet und schließlich in den zweiten Stab (Outputbar) ausgeleitet. Über eine Variation der Stärke bzw. Geschwindigkeit der stoßartigen Belastung und der Länge der Proben können hierbei verschiedene Verzerrungsraten erreicht werden. Am weitesten verbreitet sind Split Hopkinson Pressure Bars (SHPB), bei denen eine Druckwelle eingeleitet und damit Druckversuche durchgeführt werden können. Häufig ist jedoch das Materialverhalten bei Zugbelastung von Interesse, hierfür wurden Split Hopkinson Tension Bars (SHTB) entwickelt. Um eine Zugbelastung in der Probe zu erreichen, gibt es verschiedene Konzepte. Bei dem am Fraunhofer EMI vorhandenen Prüfaufbau ist das Ende des Inputbars mit einem Flansch versehen, um über einen Striker eine Zugwelle in den Input einleiten zu können. Je nach Probengeometrie sind dabei Dehnraten von mehr als  $1000 \text{ s}^{-1}$  möglich. Die Signalqualität ist bei gleicher Verzerrungsrate wesentlich besser als bei servohydraulischen Prüfmaschinen, was die erfolgreichen Tests sowohl an hochfesten Stählen als auch an Basispolymeren und kohlenfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) belegen. Die Prüfanlage bietet außerdem die Möglichkeit, die Proben zu temperieren. Für die Dehnungsmessung wird die am Fraunhofer EMI in großem Umfang verfügbare Hochgeschwindigkeitsmesstechnik genutzt. Dabei kann je nach Anforderung ein Dehnungsfeld über Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Grauwertkorrelation (ARAMIS) ausgewertet werden oder die direkte Verfolgung von Schwarz-Weiß-Kanten auf der Probe erfolgen. Messungen der Oberflächentemperatur mit einer Infrarotkamera generieren Informationen über die Erwärmung von Materialien beim Versagen.



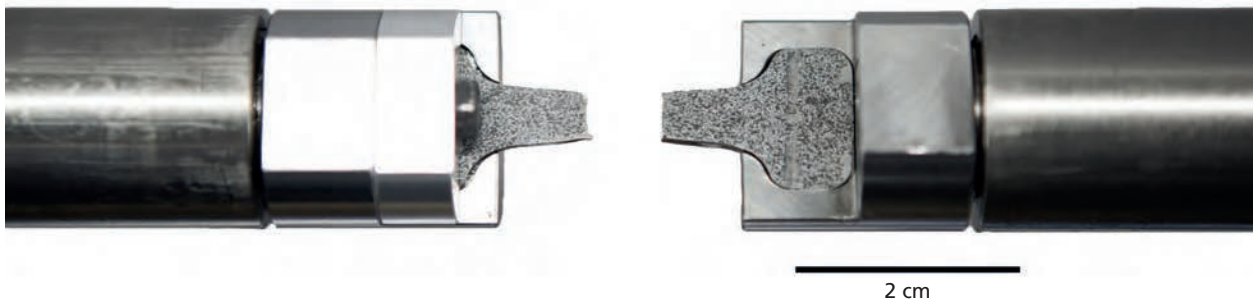


Anders als bei einer Belastung auf Druck muss beim Split Hopkinson Tension Bar eine feste Einspannung der Proben in die Stäbe erfolgen, um die Zugbelastung in die Probe übertragen zu können. Durch die hohen Geschwindigkeiten ist jedoch jegliche zusätzliche Masse zu vermeiden, da das Risiko besteht, dass die Messergebnisse dadurch verfälscht werden können. Die Wahl einer geeigneten Einspannung der Probe und damit verbunden die Wahl einer geeigneten Probengeometrie ist daher ausschlaggebend. Die einfachste Lösung ist dabei eine Prüfung von Rundproben, da diese direkt mit einem Gewinde versehen und in die Stäbe eingeschraubt werden können. Viele Materialien wie CFK oder Flachstahl liegen jedoch in einem flächigen Zustand vor und können daher nicht direkt eingeschraubt werden.

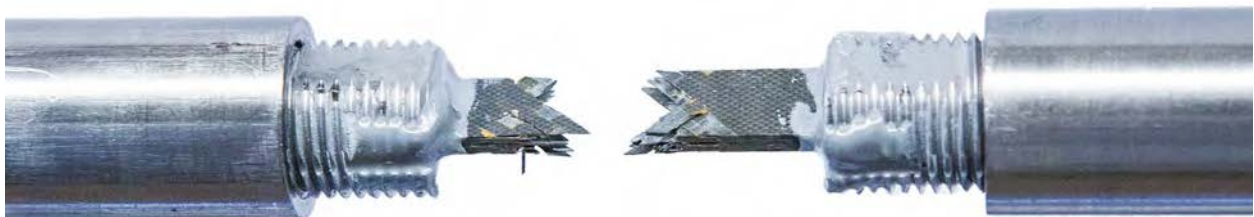
In diversen Arbeiten hat sich gezeigt, dass die Prüfung verschiedener Werkstoffe die unterschiedlichsten Herausforderungen mit sich bringt und somit für jede Werkstoff-

klasse andere Lösungskonzepte realisiert werden müssen. Im Folgenden werden vier Fallbeispiele erfolgreicher Prüfungen im SHTB vorgestellt.

Gemeinsam mit einem Stahlhersteller wurde das Verhalten eines hochfesten Flachstahls unter Zugbelastung bei Dehnraten von  $1000 \text{ s}^{-1}$  untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die Wahl der Einspannung signifikant auf die Qualität des gemessenen Kraftsignals auswirkt. Die besten Ergebnisse wurden bei einer formschlüssigen Einspannung erzielt (Abbildung 4). Im Vergleich zu der in der gängigen Literatur genutzten Einspannung, bei welcher die Lasteinleitung über ein Verkleben der Probe mit einer Halterung erfolgt, konnten die Schwingungen des Kraftsignals deutlich reduziert werden. Auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die formschlüssige Halterung vorteilhaft, denn der Aufwand für die Proben- und Versuchsvorbereitung wird signifikant reduziert.



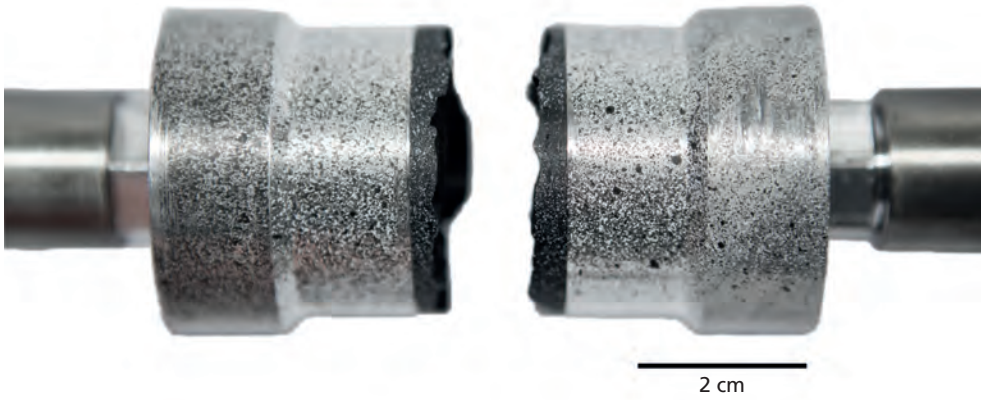
4 Flachstahlprobe inklusive formschlüssiger Halterung im SHTB.



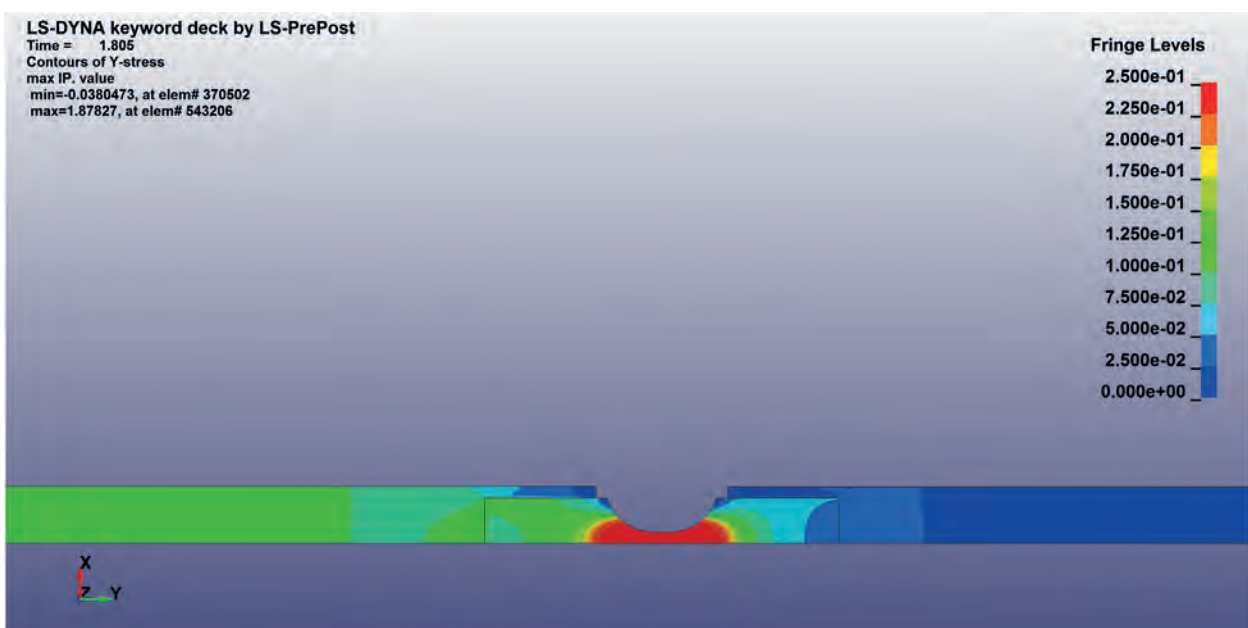
5 CFK-Probe mit geklebten Halterungen im SHTB.



6 WSM-Rundprobe im SHTB.



7 Probe zur Untersuchung einer Dickschichtklebung mit Kopfzugbelastung im SHTB.



8 Numerische Simulation einer Rundprobe im SHTB.

In einer anderen Studie wurde das dehnraten- und temperaturabhängige Materialverhalten eines CFK untersucht. Die Prüfung der höchsten Dehnrates ( $250 \text{ s}^{-1}$ ) erfolgte dabei im SHTB. Dabei wurden die temperaturabhängigen Festigkeiten bis zu einer Temperatur von 230 Grad Celsius ermittelt. Auch für diese Werkstoffklasse zeigte sich, dass die Wahl einer geeigneten Einspannung und geeigneter Probendimensionen die Aussagekraft einer Festigkeitsbestimmung stark beeinflusst. Da die Prüfung von Verbundwerkstoffen, im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen, aufgrund der Materialstruktur keine formschlüssige Einspannung erlaubt, wurde hier die Einspannung über ein Verkleben der Proben mit einer Halterung erreicht, die direkt in den SHTB eingeschraubt werden kann (Abbildung 5). In weiterführenden Forschungsarbeiten wird derzeit untersucht, mit welchen alternativen Einspannungskonzepten Verbundwerkstoffe im SHTB bei Dehnraten bis ca.  $250 \text{ s}^{-1}$  geprüft werden können. Ziel dieser Arbeiten am unteren Einsatzbereich des SHTB ist es, Werkstoffkennwerte zu generieren, die aufgrund geringerer Oszillationen während der Messung eine höhere Güte aufweisen als vergleichbare Messungen im oberen Einsatzbereich einer servohydraulischen Prüfanlage. Der Verzerrungsbereich um  $250 \text{ s}^{-1}$  ist beispielsweise relevant für die automobilen Crashanwendung.

Des Weiteren wurden dynamische Zugversuche an einem Wolframschwermetall (WSM) unter Verwendung des SHTB durchgeführt (Abbildung 6). Bei diesem Material konnten die Proben als Rundproben gefertigt und damit direkt in die Stäbe eingeschraubt werden. Bis zu einer Geschwindigkeit von acht Metern pro Sekunde konnten damit qualitativ sehr hochwertige Spannungs-Dehnungs-Kurven generiert werden. Bei höheren Geschwindigkeiten macht sich die hohe Dichte von 17,8 Gramm pro Kubikzentimeter des WSM bemerkbar. In zukünftigen Forschungsarbeiten soll das Gesamtsystem aus Stäben und Probe so angepasst werden, dass auch bei hohen Geschwindigkeiten und

schweren Materialien mit sehr hohen Dichten aussagekräftige Ergebnisse erzeugt werden können.

In einem laufenden Projekt zur Beschreibung des Verhaltens automobiler Windschutzscheiben bei Fußgängeranprall interessiert uns die Bestimmung der dehnratenabhängigen Eigenschaften von Dickschichtklebungen (Abbildung 7). Der SHTB wurde genutzt, um Eingabeparameter für die numerische Simulation zu erhalten. Um die tatsächliche Geometrie der Klebung im Bauteil möglichst gut zu approximieren, wurden verhältnismäßig große Proben geprüft. Mit diesem Proben konnte bei einer Strikergeschwindigkeit von sieben Metern pro Sekunde eine Dehnrates von  $1000 \text{ s}^{-1}$  erreicht werden, so konnten wir die Abhängigkeit des Verformungsverhaltens der Dickschichtklebung von der Belastungsgeschwindigkeit ermitteln.

Im Rahmen der Untersuchungen an verschiedenen Werkstoffen und Werkstoffkombinationen hat sich gezeigt, dass verschiedene Parameter wie das Stabmaterial, die Gestaltung der Einspannung und die Wahl der Probengeometrie einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Güte der experimentell gewonnenen Kennwerte haben. Eine zusätzliche Komplexität ergibt sich aus den komplexen Wellenphänomenen, die während eines SHTB-Versuchs auftreten. In den beschriebenen Beispielen wurde die optimale Versuchskonfiguration nach mehreren experimentellen Iterationsschleifen gefunden. Eine Möglichkeit zur Zeit- und somit Kostenreduktion dieser Parameterstudien ist die Durchführung eines »Design of Experiments« auf der Basis von Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dies ermöglicht die schnelle Bewertung verschiedener Konzepte und erhöht gleichzeitig das Verständnis für die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Aus diesem Grund haben wir erste Arbeiten begonnen, bei denen der SHTB als Gesamtsystem inklusive Probekörper und Einspannungen modelliert wird (Abbildung 8). Aufbauend darauf können wir Konzepte zur Prüfung verschiedenster Werkstoffe erarbeiten und schließlich experimentell validieren.



**Ansprechpartnerin**

**Dr. Hanna Paul**

hanna.paul@emi.fraunhofer.de





SYSTEMLÖSUNGEN

# SYSTEMLÖSUNGEN

---

## EINLEITUNG

Die Abteilung Systemlösungen ist 2015 aus der Gruppe Raumfahrttechnologie der Abteilung Impaktphysik hervorgegangen. Ziel dieser Auslagerung war es, die zunehmende Themenvielfalt der früheren Gruppe in eine neue Abteilung zu überführen, um die technologischen Aktivitäten stärker in den Mittelpunkt rücken zu können. Mit den beiden Gruppen Raumfahrttechnologie und Eingebettete Systeme wird in der neuen Abteilung Systemlösungen ein breites wissenschaftlich-technisches Themenspektrum mit Anwendungen in den Geschäftsfeldern Raumfahrt, Sicherheit und Verteidigung bearbeitet.

Die zentrale Expertise der Gruppe Raumfahrttechnologie bleibt die wissenschaftliche Untersuchung physikalischer und mechanischer Effekte beim Hypervelocity-Impakt von Objekten, etwa zum Schutz von Satelliten vor Space-Debris-Einschlägen oder bei der Bildung von Impaktkratern auf planetaren Oberflächen. Die Gruppe Eingebettete Systeme entwickelt Lösungen für Detektions- und Monitoringaufgaben, nicht nur für Raumfahrtssysteme, sondern auch für kritische Infrastrukturen, beispielweise auf der Basis von Funksensornetzwerken. In enger Zusammenarbeit entwickeln beide Gruppen zudem neue messtechnische Verfahren zur Untersuchung kurzzeitphysikalischer Prozesse, wissenschaftliche Nutzlasten für Satellitenmissionen und Technologien für Kleinstsatelliten bis hin zu einer eigenen Nanosatelliten-Trägerplattform.

Der Schutz von Raumfahrzeugen gegen Space-Debris- und Meteoriteneinschläge war auch 2015 wieder ein Forschungsschwerpunkt der Abteilung. Mit europaweit einzigartigen Beschleunigeranlagen, die beispielsweise Aluminiumkugeln in Größen von ca. 500 Mikrometern bis zu wenigen Millimetern im Routinebetrieb auf Geschwindigkeiten von über neun Kilometern pro Sekunde beschleunigen können, werden die physikalischen Phänomene bei Einschlägen experimentell untersucht, Schutzmaßnahmen entwickelt und optimiert, komplexe und technisch relevante Versagensfälle im Labor experimentell simuliert und Raumfahrzeugkomponenten qualifiziert. Die Anlagen ermöglichen die Durchführung von Impaktexperimenten unter repräsentativen Funktionsbedingungen wie Vakuum- und Thermalbedingungen. In den vergangenen Jahren wurden beispielsweise experimentelle Studien zu impaktinduzierten elektrischen Entladungen auf Solargeneratoren oder der impaktinduzierte Ausfall druckbeaufschlagter Komponenten oder elektrischer Satellitensystemkomponenten durchgeführt.

Derzeit ist nahezu unbekannt, wie stark die geplanten Megasatellitenkonstellationen das Problem des Weltraummülls für zukünftige weltweite Telekommunikationsdienste aus erdnahen Umlaufbahnen verschärfen werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass einzelne Umlaufbahnen dadurch noch erheblich stärker als bisher verschmutzt werden. Zur Untersuchung der relevanten Kleinteilchenpopulation im Größenbereich von ca. 0,1 bis 10 Millimetern können In-situ-Detektoren hier einen wichtigen Beitrag leisten. In der Vergangenheit hat das EMI bereits einen Neunkanal-detektor für Hypervelocity-Impakt entwickelt: Der Meteoroid and Space Debris Detector MDD3 fliegt seit 2011 auf dem russischen Satelliten Spektr-R und hat bisher viele Einschläge aufgezeichnet.

Grundsätzlich können die Detektion von Einschlägen und die Entschlüsselung der Parameter des einschlagenden Teilchens mehrere Zwecke verfolgen: Sie können zur Unterstützung des Satellitenbetriebs und einer verbesserten Störfallanalyse dienen sowie für zukünftige Risikoanalysen wichtige Informationen über die Partikelpopulation im Weltraum liefern. In der Gruppe Raumfahrttechnologie ist nun eine weitere wichtige, theoretische Arbeit abgeschlossen worden, nämlich zur Untersuchung sehr kurzzeitig leuchtender Impaktplasmen, mit der sich möglicherweise ein neues Detektorprinzip realisieren lässt. Die Arbeit wird im Folgenden vorgestellt.

Die Verfügbarkeit verbesserter Teilchenflussmodelle führt unmittelbar zu einer zuverlässigeren Quantifizierung des Risikos, dem Raumfahrzeuge durch Einschläge von Weltraummüll und Mikrometeoroiden ausgesetzt sind. Hierfür kann die am EMI entwickelte Software PIRAT (Particle Impact Risk and Vulnerability Assessment Tool) eingesetzt werden, die speziell zur Untersuchung von Impaktvorgängen auf Raumfahrzeugen entwickelt wurde. Die Verwundbarkeitsanalyse-Software PIRAT berechnet die Ausfallwahrscheinlichkeit der Satellitenkomponenten in Abhängigkeit zur Flugbahn und den hierfür zu erwartenden Partikeleinschlägen. Basierend auf den Ergebnissen der Verwundbarkeitsanalysen werden Schutzkonzepte und technische Lösungen zur Steigerung der Überlebensfähigkeit von Raumfahrtssystemen gegenüber Einschlägen von Partikeln und Objekten der Weltraumumgebung entwickelt.

Der zweite Beitrag gibt einen Überblick über ein gemeinsam von den Abteilungen Systemlösungen und Experimentelle Ballistik durchgeführtes Projekt zur Sicherheit von Satelliten-Bodenstationen. Thema des Projekts ist die Untersuchung der Sicherheit von Satelliten-Bodenstationen gegen physische Bedrohungen. Neben einer Gesamtdarstellung des Projekts wird im Beitrag insbesondere auf das Risiko terroristischer Anschläge mit Explosivstoffen und High-Power Microwave eingegangen. Das im EMI entwickelte innovative Sensorsystem wird vorgestellt, und erste experimentelle Funktionsnachweise werden präsentiert.



**Prof. Dr. Frank Schäfer**

Abteilungsleiter Systemlösungen

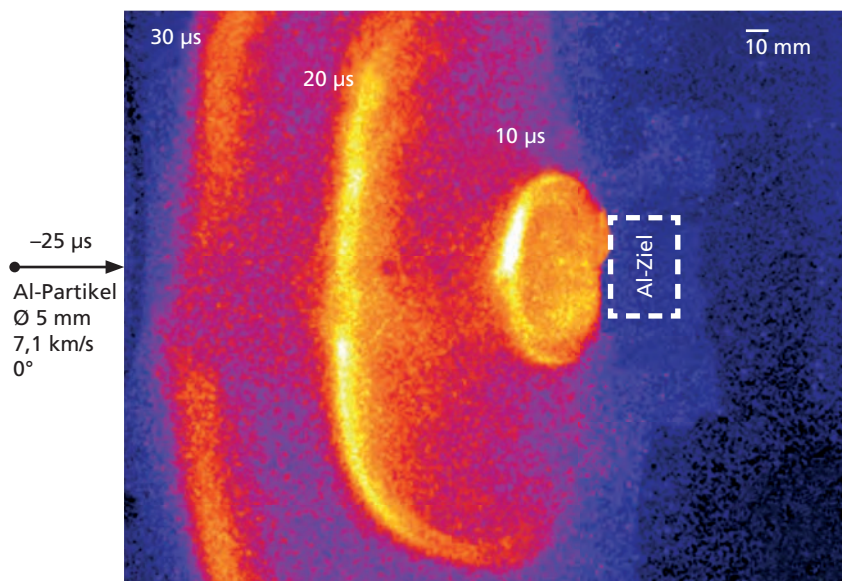
Telefon 0761 2714-421 | [frank.schaefer@emi.fraunhofer.de](mailto:frank.schaefer@emi.fraunhofer.de)

### Untersuchung eines Detektionskonzepts für Impaktplasma

Jährliche Meteorströme, besonders die Perseiden im August und die Geminiden im Dezember, sorgen für aufsehenerregende Leuchterscheinungen am nächtlichen Himmel. Wenn Meteoroiden wegen ihrer hohen Geschwindigkeit von bis zu mehreren zehn Kilometern pro Sekunde beim Eintritt in die Erdatmosphäre eine Plasmaspur hinterlassen, sind diese für uns als Sternschnuppen sichtbar. Die Meteoroiden entstammen Kollisionen und Zersetzungen von astronomischen Kleinkörpern, vor allem Kometen und Asteroiden. Ihre geringe Größe und ihre hohe Geschwindigkeit erschweren die Erforschung der Meteoroiden. Daten über die Häufigkeit ihres Auftretens und ihre grundlegenden Eigenschaften wie Größe, Dichte und chemische Zusammensetzung sind mit einer großen Ungewissheit behaftet, weil sie zumeist indirekt, z. B. durch die Radarbeobachtung von Sternschnuppen, bestimmt werden. Das macht den Hochgeschwindigkeitseinschlag von Meteoroiden auf Raumfahrtsystemen zu einer der unbestimmtesten Umwelteinflüsse der Weltraumumgebung.

Das Fraunhofer EMI widmet sich seit Jahren der Untersuchung dieser Hochgeschwindigkeitseinschläge, die im Fachjargon als Hypervelocity-Impakt bezeichnet werden. In richtungsweisenden Studien werden hier mit einzigartigen experimentellen Möglichkeiten die Phänomene und Effekte des Hypervelocity-Impakts sowie deren Konsequenzen für Raumfahrtsysteme untersucht. Meist liegt der Fokus dieser Arbeiten auf den mechanischen Effekten wie der Fragmentierung und Perforation der Raumfahrtkomponenten. Bevor diese mechanischen Effekte im Impaktprozess zur Geltung kommen, gibt es allerdings ein weiteres, kurzzeitiges Phänomen: Die Ausbreitung einer Plasmawolke, das sogenannte Impaktplasma, ist in Abbildung 1 gezeigt.

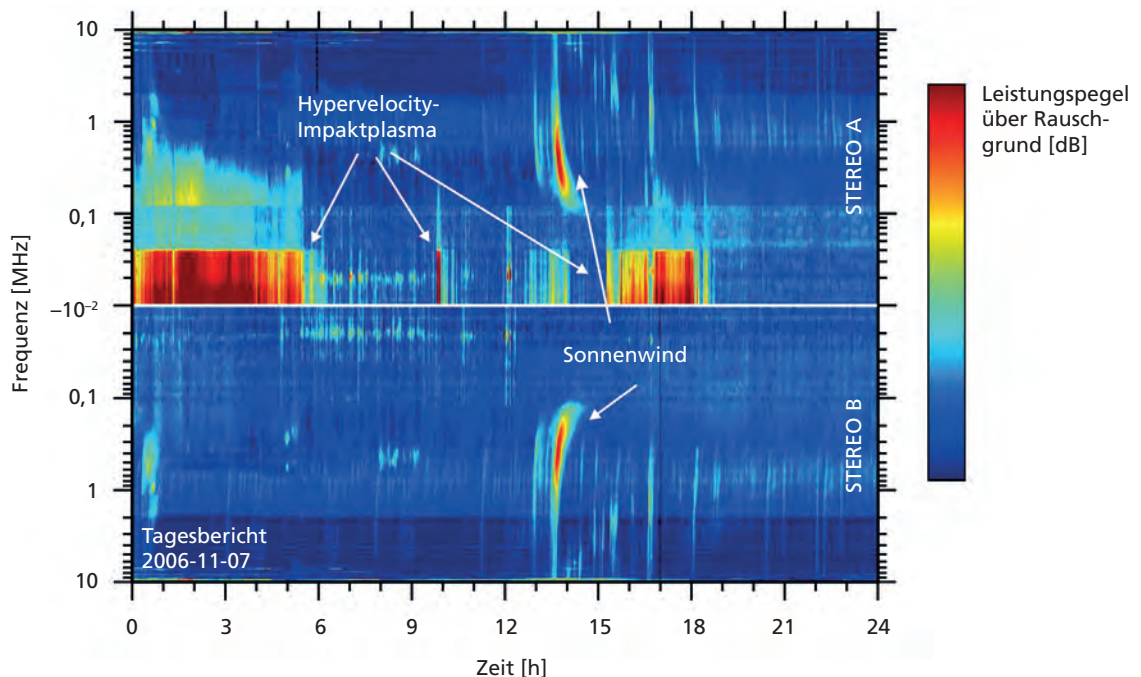
Das Impaktplasma resultiert aus den extremen Druck- und Temperaturbedingungen, die beim Aufschlag des Meteoroiden auf der Oberfläche eines Satelliten entstehen. Durch Stoßwelleneffekte wird das Material des Meteoroiden und der Oberfläche derart komprimiert, dass es bei der anschließenden Entlastung einen Phasenwechsel zum gasförmigen und den Plasmazustand erfährt. Das dabei entstehende, ionisierte Gasgemisch expandiert rasch über die Oberfläche des Satelliten, wobei es schlagartig an Dichte und Temperatur verliert.



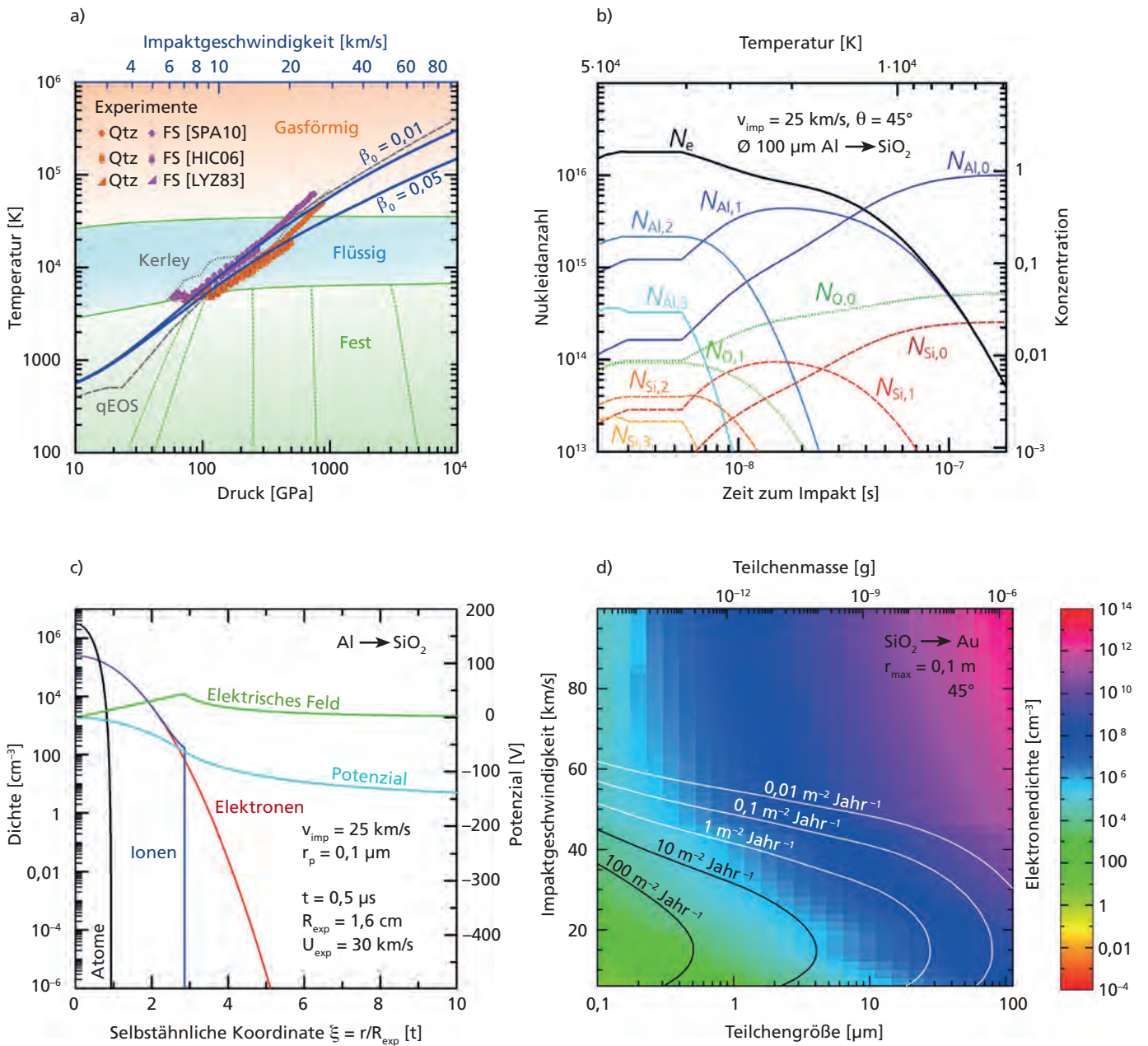
1 Kombination von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Pseudofarbendarstellung, die eine Impaktplasmawolke zu verschiedenen Zeitpunkten ihrer Ausbreitung zeigt. Die Position und Größe des Projektils vor dem Impakt sowie die Impaktbedingungen (Material, Größe, Geschwindigkeit, Winkel) sind gegeben.



Da die Eigenschaften des Impaktplasmas von den Bedingungen des Impakts, z. B. Einschlagwinkel und -geschwindigkeit, sowie von der Beschaffenheit des Meteoroiden abhängen, kann durch die Messung des Impaktplasmas auf diese Parameter zurückgeschlossen werden. Für diesen Zweck kamen auf einer Vielzahl von interplanetaren Raumfahrtmissionen Ladungsdetektoren zum Einsatz. Das sind ausgereifte, komplexe Messinstrumente, die Ladungsträger eines Impaktplasmas durch elektrische Felder extrahieren, um dessen chemische Zusammensetzung zu untersuchen (z. B. [1], [2], [3]). Gleichzeitig werden Impaktereignisse unfreiwillig als Störsignale in Radioastronomie und Weltraumplasmaexperimenten detektiert. Als Beispiel sind in Abbildung 2 Spektrogramme der WAVES-Instrumente auf den Satelliten STEREO A und B gezeigt. Während beide Satelliten ähnliche Intensitäten des Umgebungsplasmas messen, erfährt STEREO A zusätzlich Anomalien, die der Erzeugung und Ausbreitung von Impaktplasma zugeschrieben werden [4].



2 Spektrogramme des WAVES-Experiments auf den Satelliten STEREO A (oben) und B (unten) nach [5]. Das Experiment nutzt drei sechs Meter lange Monopolantennen zur Messung von Fluktuationen des lokalen Umgebungsplasmas. Im gezeigten Spektrogramm wurden auf STEREO zusätzlich Störsignale durch Hypervelocity-Impakt detektiert, die als intensive, diskontinuierliche Anomalien erscheinen.

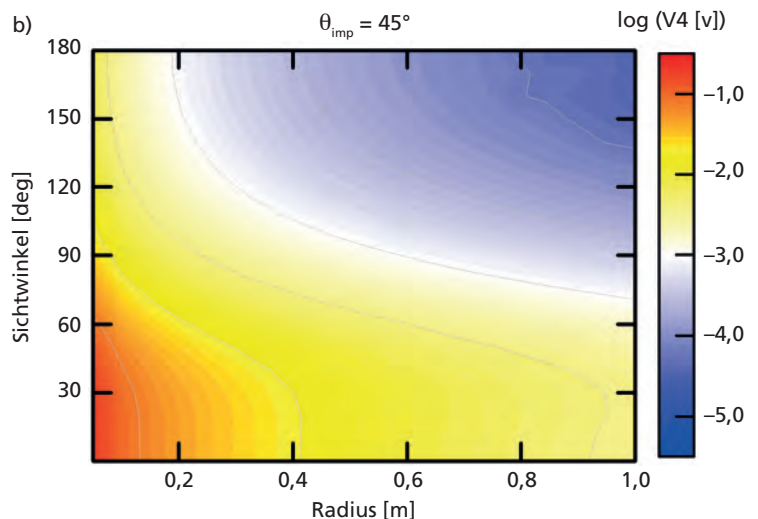
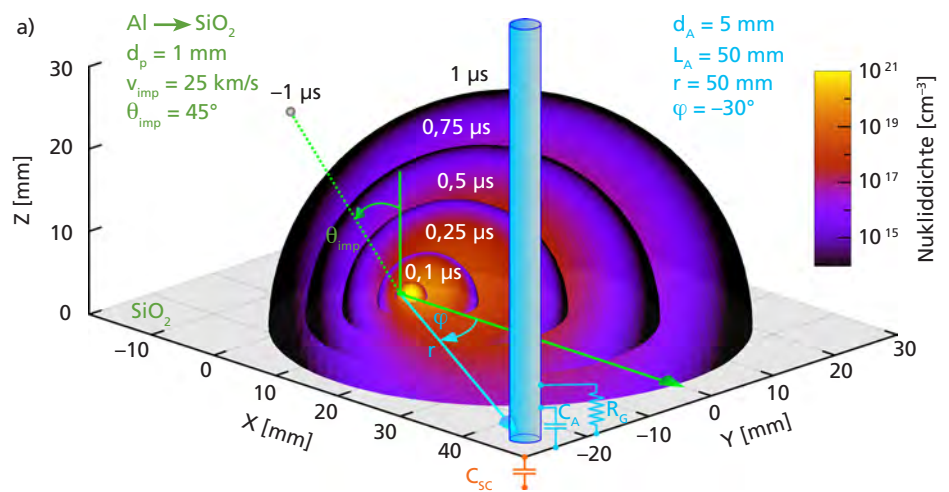


3 Simulation von Impaktplasma. a) Berechnung des Stoßzustands (blau) im Vergleich zu experimentellen Werten (rot) und Phasengrenzen für Quarz. b) Gleichgewichtszusammensetzung eines Impaktplasmas während der Expansion. c) Dichteprofile von Elektronen, Ionen und Neutralteilchen und resultierendes elektrisches Feld. d) Elektronendichte von auf zehn Zentimeter expandierte Impaktplasmen für variierte Impaktbedingungen. Die Konturen kennzeichnen die Fluenz der Meteoroiden.

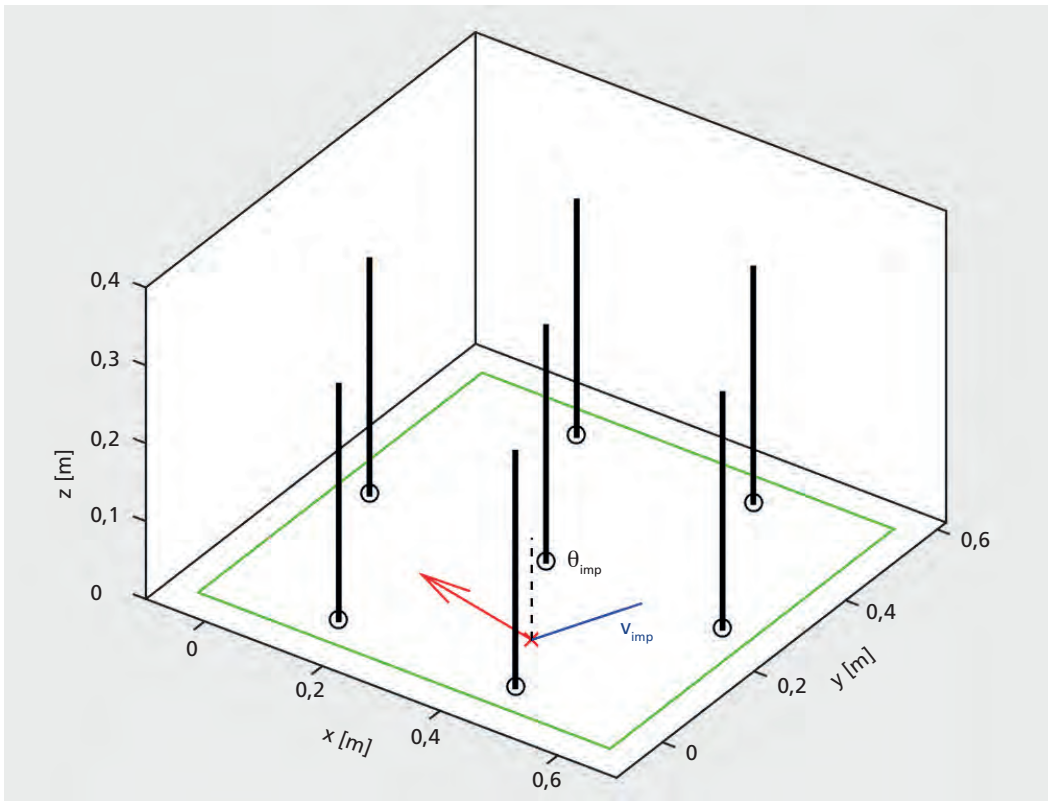
Die Messung von Störsignalen auf Antennen durch Hypervelocity-Impaktplasma warfen die Frage auf, ob und unter welchen Bedingungen die zugrunde liegenden Effekte als ein einfaches und effektives Verfahren zur Detektion von Impaktplasma und der Eigenschaften der verursachenden Impakts verwendet werden können. Dieser Frage ging das Fraunhofer EMI in einer durch die ESA geförderten Studie nach. Die Studie basiert auf numerischen Simulationen, durch die ein möglichst weiter Parameterraum untersucht werden kann, der die experimentell zugänglichen Bereiche weit übertrifft. Für die Plasmasimulationen wurde ein am Fraunhofer EMI entwickeltes Impaktplasmamodell eingesetzt. Abbildung 3 zeigt verschiedene Merkmale der Plasmasimulationen. Ausgehend von der Simulation des

Stoßzustands (a) wird die Zusammensetzung und Ionisation (b) der Plasmawolke bestimmt. Innerhalb der Wolke stellen sich Dichtegradienten der verschiedenen Konstituenten des Impaktplasmas ein (d). Das Modell erlaubt es, Eigenschaften des Impaktplasmas in Abhängigkeit zu den Impaktparametern darzustellen (d).

Die durch das expandierende Impaktplasma auf einer Antenne erzeugten Signale hängen vom Impaktort, den Abmaßen und der Verdrahtung der Antenne sowie dem Potenzial des Satelliten ab. Wie in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt, wurden diese Parameter für die Simulation variiert, um eine praktische Antennenkonfiguration zur Extraktion von Impaktparametern aus den gemessenen



4 Simulation der Antennensignale. a) Schema der Simulation der Wechselwirkungen zwischen dem aus einem spezifischen Impakt (grün) resultierenden Impaktplasma und einer definierten Antenne (blau). b) Signalamplitude als Funktion der Positionierung der Antenne.



5 Exemplarische Konfiguration eines Detektors, der auf der Messung des Impaktplasmas mittels Antennen beruht. Die Impaktparameter werden aus dem Antennensignal anhand von Triangulation und vereinfachten, aus den Plasmasimulationen abgeleiteten Fit-Funktionen bestimmt.

Antennensignalen zu finden. Dabei wirken unterschiedliche Mechanismen der Signalerzeugung wie die direkte Messung der Ladungsträgerunterschiede innerhalb der Wolke oder die Störung des Antennenpotenzials durch die Wolke. Eine wichtige Erkenntnis der Studie ist, dass die Emission von Elektronen durch die Wechselwirkungen mit den schnellen Ionen der Wolke das deutlichste Signal hervorruft und am besten zur Detektion geeignet ist.

Die parametrische Analyse der simulierten Antennensignale zeigte, dass sich mit einer einfachen Antennenanordnung grundlegende Impakteigenschaften wie Geschwindigkeitsvektor, Impaktort und Meteoroidengröße zurückverfolgen lassen. Das in Abbildung 5 dargestellte Array aus sechs Antennen mit 40 Zentimetern Länge und 30 Zentimetern Zwischenabstand ist ausreichend, um Impaktort und Geschwindigkeit mit weniger als fünf Prozent und die Meteoroidenmasse mit weniger als 15 Prozent aus den gemessenen Antennensignalen abzuleiten. Eine Roadmap für weiterführende Arbeiten zur experimentellen Bestätigung, Optimierung und technischen Umsetzung des Detektionskonzepts wurde definiert. Bestehend durch seine Einfachheit kann es dazu beitragen, die Partikelumgebung im Orbit besser zu erfassen.

## Referenzen

- [1] Dietzel, H., Eichhorn, G., Fechtig H. et al. (1973). The HEOS 2 and HELIOS Micrometeoroid Experiments. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 6, 209–217.
- [2] Göller, J. R., Grün, E., Maas, D. (1987). Calibration of the DIDSY-IPM Dust Detector and Application to Other Impact Ionisation Detectors on Board the P/Halley Probes. *Astronomy and Astrophysics*, 187, 693–698.
- [3] Srama, R., Ahrens, T. J., Altobelli, N. et al. (2004). The CASSINI Cosmic Dust Analyzer. *Space Science Reviews*, 114, 465–518.
- [4] Meyer-Vernet, N., Zaslavsky, A. (2012). In situ Detection of Interplanetary and Jovian Nanodust with Radio and Plasma Wave Instruments. I. Mann, N. Meyer-Vernet, A. Czechowski (Hrsg.): *Nanodust in the Solar System: Discoveries and Interpretations*, Springer.
- [5] Kaiser, M. (NASA official). Data Plots for STEREO-WAVES and other Instruments. <http://swaves.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/wimp.py> – Aktualisierungsdatum: 5.11.2013.



**Ansprechpartner**  
**Martin Schimmerohn**

[martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de](mailto:martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de)

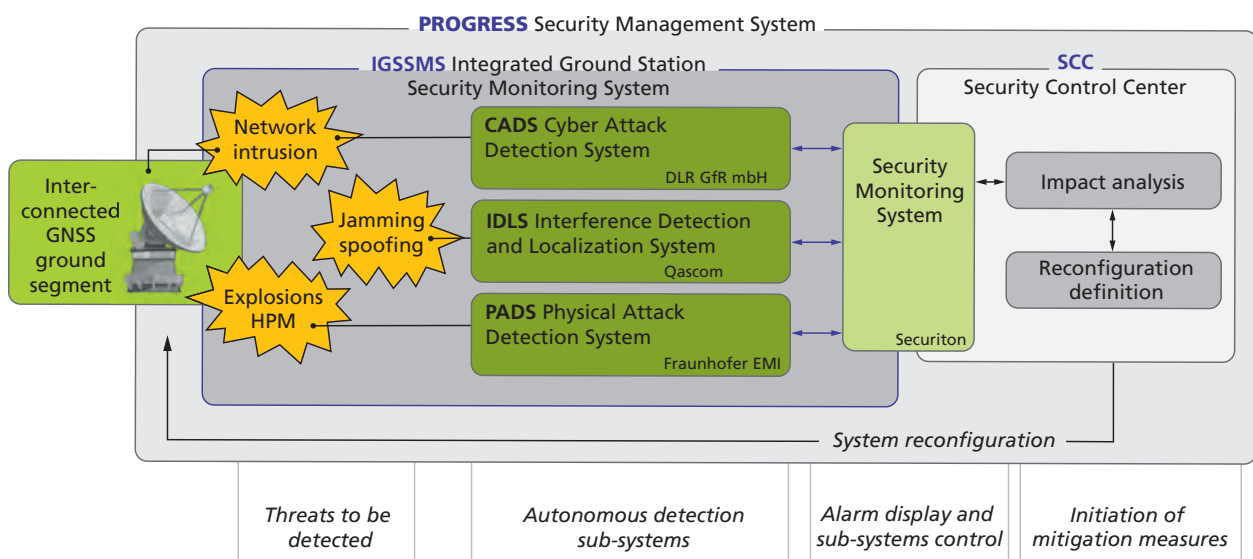
**PROGRESS – Sicherheit und Überwachung von Satelliten-Bodenstationen**

Raumfahrtanwendungen wie die Satellitennavigation sind zu einem wichtigen funktionalen Bestandteil unserer modernen Gesellschaft geworden. Deshalb gelten Satelliten und die dazugehörigen Bodenanlagen als sogenannte kritische Infrastrukturen. Als kritische Infrastrukturen werden physikalische oder computerbasierte Systeme verstanden, die wichtig für das Funktionieren der wirtschaftlichen und politischen Strukturen eines Staats sind. Vielfach, aber nicht ausschließlich, zählen dazu Transport-, Finanz-, Kommunikations-, Energie- und Logistiknetzwerke. Durch die steigende Komplexität und Vernetzung dieser Systeme steigt deren Schutzbedürftigkeit, die eine Risikobeurteilung kritischer Infrastrukturen unabdingbar macht. In der Praxis zeigt sich aber eine tendenzielle Vernachlässigung von Gefährdungen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, ungeachtet deren potenziell signifikanter Konsequenzen. Dies gilt im Besonderen für die Bedrohung durch terroristische Angriffe.

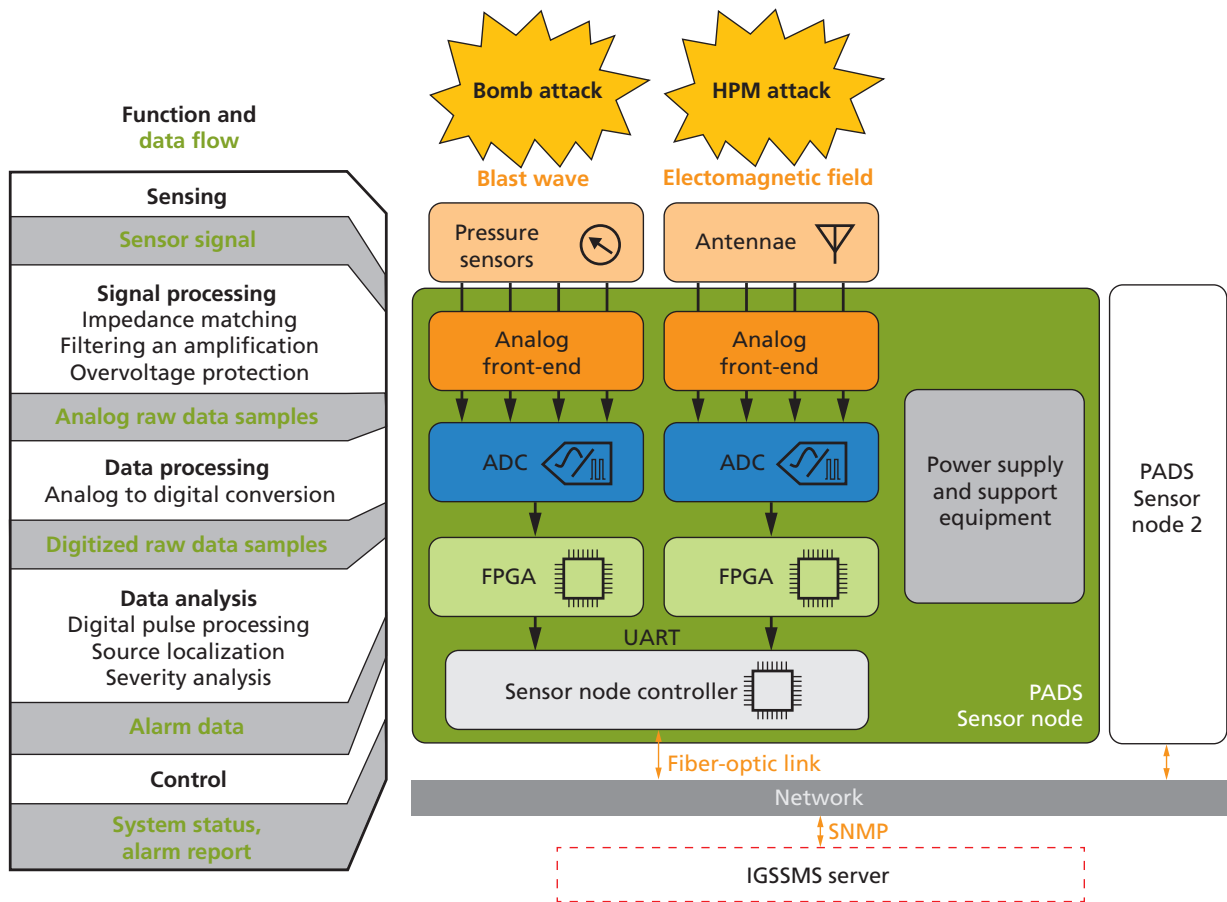
Im Projekt PROGRESS (Protection and Resilience of Ground Based Infrastructures for European Space Systems) beschäftigt sich ein europäisches Konsortium mit der Sicherheit von Bodenstationen von Satellitensystemen. Das durch die Europäische Kommission im FP7-Rahmenprogramm geförderte Projekt gilt im Speziellen der Sicher-

heit von Bodenstationen von Satellitennavigationssystemen (GNSS: Global Navigation Satellite System), bei denen Europa mit Galileo mittelfristig eine wichtige Position einnehmen wird. Das PROGRESS-Konzept umfasst, wie in Abbildung 6 gezeigt, die Entwicklung eines integrierten Sicherheitsüberwachungssystems (IGSSMS: Integrated Ground Station Security Monitoring System) und eines Sicherheitskontrollzentrums (SCC: Security Control Center) zur Lagebewertung und Initiierung von Maßnahmen zur Rekonfiguration und schnellen Wiederherstellung der Funktionalität des Gesamtsystems.

Das Fraunhofer EMI leitet die Entwicklung des IGSSMS-Detektionssystems als zentrales Element des PROGRESS-Systems. Es kombiniert verschiedene Überwachungssysteme zur Detektion relevanter, terroristischer Gefährdungen: 1) physikalische Angriffe auf die Bodenstation durch Explosionen und Hochleistungsmikrowellen, 2) Störungen der Funkstrecken durch Jamming und Spoofing (das Aussenden von Stör- bzw. manipulierten Funksignalen) und 3) Cyberattacken im Netzwerk der Bodenstation. Die dedizierten Überwachungssysteme detektieren diese Angriffe und leiten in Quasi-Echtzeit Alarmbotschaften an das Sicherheitskontrollzentrum weiter. Ein besonderes Merkmal der Überwachungssysteme ist die Lokalisierung des Angriffs. Dem Sicherheitszentrum soll die Richtung bzw. der Ort eines Angriffs und das mögliche Schädigungslevel berichtet werden, um die Analyse



6 Schema des PROGRESS-Systems zur Überwachung und Erhöhung der Sicherheit von GNSS-Bodenstationen und anderer kritischer Infrastruktur. Das IGSSMS wird unter der Führung des Fraunhofer EMI entwickelt.



7 Architektur und Funktion eines Sensorknotens zur Detektion von Explosionen und Hochleistungsmikrowellen. Eine Bodenstation kann mit mehreren dieser autonomen Sensorknoten ausgestattet werden.

der Konsequenzen für die Bodenstation und potenzieller Gegenmaßnahmen zu unterstützen.

Nachdem die erste Projekthälfte der Risikoabschätzung und der Definition möglicher Überwachungs- und Schutzmaßnahmen gewidmet war, erfolgte in 2015 die Entwicklung und Implementierung der Detektionssysteme. Das Fraunhofer EMI ist aufgrund seiner speziellen Expertise für die Umsetzung des Detektionssystems für physikalische Angriffe zuständig. Der im Aufbau befindliche Sensorknoten ist in Abbildung 7 schematisiert. Er erfasst die Detonationswellen von Explosionen mit piezoresistiven Absolutdrucksensoren und Messverstärkern bis zu einer Höhe von 50 bar. Als Sensorik für Hochleistungsmikrowellenereignisse dienen spezielle Spiralantennen in Kombination mit einem Analog-Front-End, der aus Dämpfungsgliedern, Begrenzern und einem logarithmischen Detektor mit großem Dynamikumfang und kurzer Anstiegszeit besteht. Während

die Sensorik und analoge Signalaufbereitung speziell auf die zu detektierende physikalische Messgröße zugeschnitten ist, werden im Sensorknoten identische Baugruppen zur schnellen Digitalisierung (100 Megasamples pro Sekunde Abtastrate) und Datenanalyse verwendet. Letztere erfolgt auf Basis von FPGA-Technologie (wiederprogrammierbare integrierte Schaltkreise), die speziell für Echtzeitprobleme geeignet ist. Findet beispielsweise eine Detonation statt, so werden aus dem Eingangsdatenstrom Peaks detektiert sowie charakteristische Größen wie Zeitpunkt, Intensität, Integral und Pulsbreite bestimmt. Diese werden an einen Mikrokontroller weitergeleitet, der innerhalb des FPGA in Form von in Hardwarebeschreibungssprachen verfasstem Softcore vorliegt.

Auf dem FPGA erfolgt auch die Berechnung zur Ortung eines Angriffs. Für die Detektion von Detonationen werden vier Drucksensoren an verschiedenen Orten in unterschied-

licher Ausrichtung platziert. Anhand einer auf Laufzeitunterschieden basierenden Methode kann auf die Richtung der Detonationsquelle geschlossen werden. Weil als Näherung eine ebene Welle mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der Sensorregion angenommen wird, dürfen die Sensoren nicht zu weit auseinander platziert werden, aber entfernt genug, um Laufzeitunterschiede wahrzunehmen. Die Lokalisierungsalgorithmen und die Funktionalität der gesamten Messstrecke wurden durch Explosionsversuche im Institutsteil Kändern, wie in Abbildung 8 gezeigt, erfolgreich getestet. Der ebenfalls erfolgreiche Nachweis der Hochleistungsmikrowellendetektion und -lokalisierung erfolgte Ende des Jahres bei CEA in Gramat, Frankreich.

Das Messequipment und die Energieversorgung sind in dem in Abbildung 9 gezeigten Container integriert, der Explosionslasten gegenüber robust und gegen elektromagnetische Interferenzen geschirmt ist. Die Antennen befinden sich in unterschiedlicher Ausrichtung auf einem Mast, die Drucksensoren sind an verschiedenen Positionen des Containers platziert. Die prozessierten Alarminformationen werden über einen Controller und eine interferenzresistente Glasfaserverbindung an das Netzwerk zum Server des Kontrollzentrums weitergeleitet. Nach der Fertigstellung des Sensorknotens soll im folgenden Jahr das komplette IGSSMS-Detektionssystem integriert und mittels simulierter Angriffe demonstriert werden.

Weitere Informationen sind unter [www.progress-satellite.eu](http://www.progress-satellite.eu) zu finden.



**Ansprechpartner**

**Martin Schimmerohn**

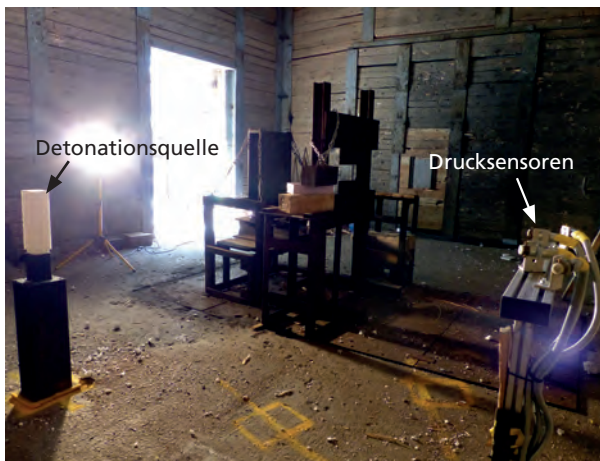
[martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de](mailto:martin.schimmerohn@emi.fraunhofer.de)



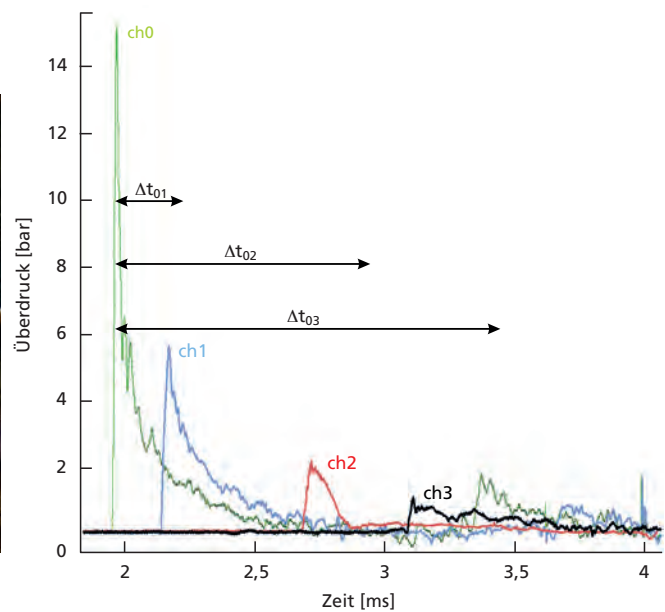


9 Prototyp eines Sensor-knotens zur Messung von Detonationen und Hochleistungsmikrowellen in der Implementierung. Am Ende des Mastes sind die Antennen positioniert, die Drucksensoren mittig und auf dem Behälter, der die Elektronik und Betriebskomponenten enthält.

a)



b)



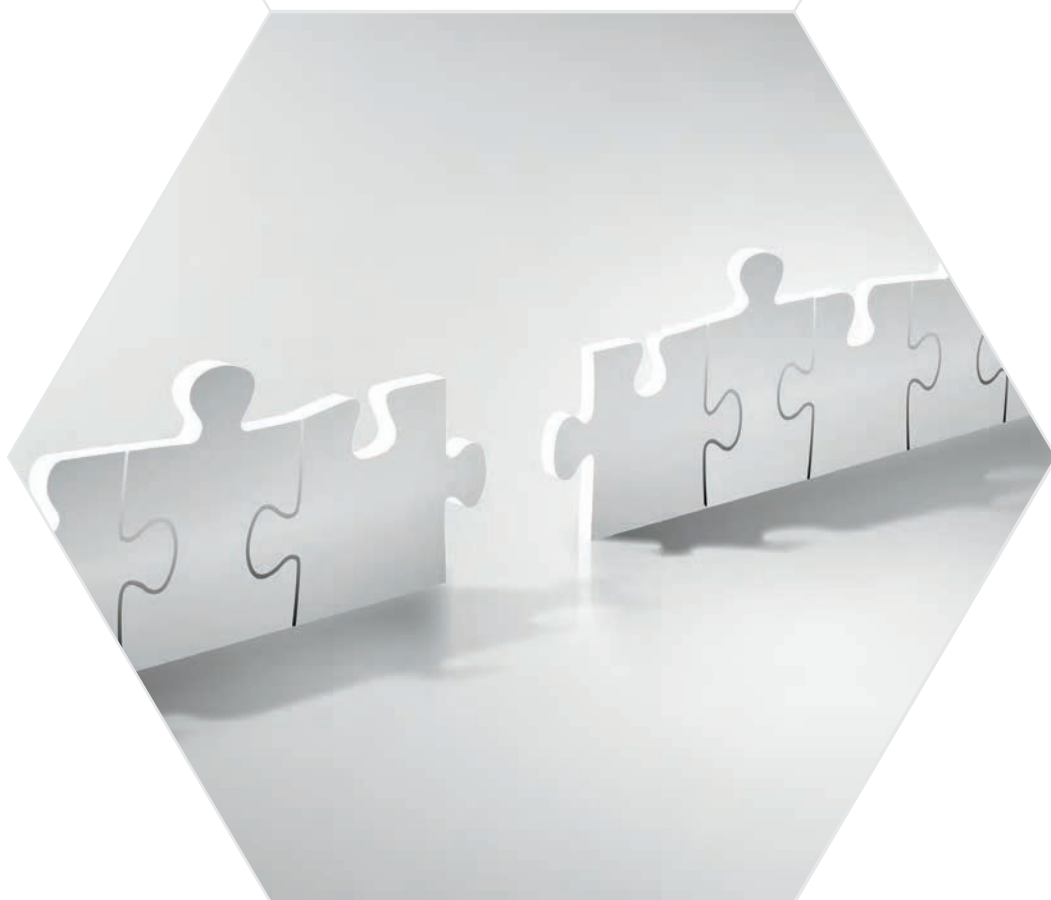
8 Messaufbau und Lokalisierung einer Detonationsquelle. a) Aufbau der Drucksensoren und der Detonationsquelle im Labor in Kandern. b) Gemessene Drucksignale. Trifft die Detonationswelle nicht frontal auf einen Drucksensor, so verringert sich die gemessene Amplitude. Zu späteren Zeitpunkten sind die abgeschwächten Reflexionen der Detonationswellen sichtbar. Zur Quellenlokalisierung werden die Laufzeitunterschiede der Messsignale verwendet.





WISSENSCHAFTLICHES  
NETZWERK

# **VERBÜNDE, ALLIANZEN UND KOOPERATIONEN MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER EMI**



### Kompetenzen bündeln

**Das Fraunhofer EMI verfügt über ein breites Portfolio an Kompetenzen, die in der angewandten Forschung national und auch international Alleinstellung genießen. Innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft ist das Institut vielschichtig vernetzt, um in gewinnbringenden Kooperationen mit anderen Fraunhofer-Instituten Synergien zu nutzen, institutsübergreifende Themen nach außen transparent und sichtbar zu gestalten sowie Anforderungen öffentlicher und privatwirtschaftlicher Auftraggeber mit umfassenden Lösungen aus der angewandten Forschung begegnen zu können.**

Fachlich verwandte Institute kooperieren innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft in Verbänden und treten gemeinsam auf dem nationalen und internationalen Markt auf.

Das Fraunhofer EMI ist Mitglied im Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS und dem Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS.

Mit seiner großen Anwendungserfahrung im Bereich der Charakterisierung und Modellierung hochkomplexer Materialien und Werkstoffe wirkt das Fraunhofer EMI im Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS mit. Mit Partnerinstituten werden Technologien und Konzepte marktnah weiterentwickelt und in Systemlösungen überführt.

Der Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS ist in Deutschland und Europa der zentrale nationale Akteur und Ansprechpartner für Politik und Wirtschaft in Fragen der zivilen und militärischen Sicherheitsforschung.

Thematisch stark fokussiert ist das Fraunhofer EMI in sieben Fraunhofer-Allianzen – darin kooperieren Institute oder Abteilungen mit unterschiedlichen Kompetenzen, um ein Geschäftsfeld gemeinsam zu bearbeiten und zu vermarkten – hervorragend vernetzt.

## VERBÜNDE

- Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS
- Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS

## ALLIANZEN

- Fraunhofer-Allianz Batterien
- Fraunhofer-Allianz Bau
- Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung
- Fraunhofer-Allianz Leichtbau
- Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation von Produkten, Prozessen
- Fraunhofer-Allianz Space

## KOOPERATIONEN

- Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, dessen Gründungsdirektor Prof. Dr. Stefan Hiermaier in Personalunion als Leiter des Fraunhofer EMI ist (Seite 134)
- Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg: eine Kooperation zwischen den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten, der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und der Industrie (Seite 116)
- Clean Sky 2 Joint Technology Initiative im Bereich Luftfahrt. Fraunhofer ist eines der zwölf Clean-Sky-Gründungsmitglieder (Seite 124)
- Tech Center i-protect: Forschungsinitiative der Daimler AG, der Robert Bosch GmbH und des Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg für zukünftige Fahrzeugsicherheit (Seite 136)
- Spitzencluster Elektromobilität Süd-West (Seite 122)
- »Centre for Security and Society«: Kooperation mit der Universität Freiburg zur gemeinsamen Sicherheitsforschung
- Weiterbildungsangebot »Resilience Engineering«: Kooperation mit der Universität Freiburg, <http://s.fhg.de/3ad>
- Weiterbildungsangebot »Safety and Security Engineering«: Kooperation mit der Universität Freiburg, <http://s.fhg.de/Yt4>

# LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT FREIBURG



DAS LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT

FREIBURG

 **Fraunhofer**



#### **Geschäftsstelle**

Benjamin Scharte, Fraunhofer EMI  
Telefon 0761 2714-538

Sorana Kamla, Universität Freiburg  
Telefon 0761 203-6803

Eckerstraße 4  
79104 Freiburg  
[geschaeftsstelle@leistungszentrum-nachhaltigkeit.de](mailto:geschaeftsstelle@leistungszentrum-nachhaltigkeit.de)

Weitere Informationen finden Sie unter  
[www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de](http://www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de)

### **Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg: Motor der Zusammenarbeit mit der Albert-Ludwigs-Universität**

Große Herausforderungen wie Klimawandel und Ressourcenknappheit können nur durch eine nachhaltige Entwicklung erfolgreich bewältigt werden. Das kann allein durch neue Erkenntnisse aus der Wissenschaft nicht gelingen. Deshalb haben die Albert-Ludwigs-Universität und die fünf Freiburger Institute der Fraunhofer-Gesellschaft gemeinsam das inter- und transdisziplinäre Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg aufgebaut.

Die Albert-Ludwigs-Universität ist als eine der renommiertesten Universitäten Deutschlands führend in der Nachhaltigkeitsforschung. Die Freiburger Fraunhofer-Institute gehören in relevanten Themenfeldern wie Material- und Resilienz-forschung zur weltweiten Spitzengruppe. Das Leistungszentrum Nachhaltigkeit forscht insbesondere in den vier zentralen Bereichen Materialforschung, Energiesysteme, Resilienzforschung sowie zur sozialen und ökologischen Transformation unserer Gesellschaft.

Eröffnet wurde das Leistungszentrum im März 2015 in einem hochkarätig besetzten Festakt mit weit über 200 Besuchern. Schon seit Januar 2015 liefen die ersten Pilotprojekte des Leistungszentrums.

Mittlerweile haben alle zwölf Pilotprojekte ihre Arbeit aufgenommen. In diesen Projekten arbeiten jeweils interdisziplinäre Teams der Fraunhofer-Institute und der Universität Freiburg an der Entwicklung nachhaltiger Lösungen. Weitere Partner wie etwa das Öko-Institut, die Hahn-Schickard-Gesellschaft und Unternehmen wie Fischer und Osram sind ebenfalls beteiligt. Die Projekte werden bis 2018 mit rund 6,5 Millionen Euro durch das Land Baden-Württemberg und die Fraunhofer-Gesellschaft gefördert. Das Fraunhofer EMI ist an dreien dieser Pilotprojekte beteiligt.

Neben den öffentlich finanzierten Pilotprojekten bilden sogenannte Ankerprojekte eine weitere wichtige Säule des Leistungszentrums. Darin engagieren sich Unternehmen zusammen mit Fraunhofer und der Universität. In den Projekten entwickelt das Leistungszentrum zusammen mit seinem jeweiligen Ankerpartner eine gemeinsame Forschungsroadmap und setzt diese anwendungsnahe und wissenschaftlich exzellent um. Ein Beispiel für erste Ankerprojekte ist die Zusammenarbeit mit Daimler und Bosch (siehe Artikel zu Tech Center i-Protect, Seite 136).

Einmal im Jahr veranstaltet das Leistungszentrum Nachhaltigkeit eine wissenschaftliche Konferenz in Freiburg. Die erste Auflage dieses Sustainability Summits wurde vom 19. bis zum 20. Oktober 2015 mit großem Erfolg durchgeführt (Seite 132).

Zudem nahm das Leistungszentrum Nachhaltigkeit als wissenschaftlicher Partner der Stadt Freiburg im Breisgau erfolgreich am BMBF-Wettbewerb »Zukunftsstadt« teil. Dort wurde Freiburg mit seinem Zukunftskonzept als eine von 50 Kommunen in ganz Deutschland ausgewählt. Das Leistungszentrum wird hier in den nächsten Jahren gemeinsam mit der Stadt innovative Lösungen, die einen echten Mehrwert für die Bürger darstellen, direkt in die Anwendung bringen.

Die Geschäftsstelle des Leistungszentrums Nachhaltigkeit, die zur Hälfte am Fraunhofer EMI angesiedelt ist, arbeitete im vergangenen Jahr intensiv daran, das Leistungszentrum in der Region und darüber hinaus bei den wichtigen Akteuren und Netzwerken bekannt zu machen. So fanden unter anderem Treffen bzw. gemeinsame Veranstaltungen statt mit der IHK Südlicher Oberrhein, dem Wirtschaftsverband Industrieller Unternehmen Baden (wvib), der Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe (FWTM), den Klimapartnern Oberrhein, dem Green Industry Park Freiburg, dem Technologieverbund Technology Mountains sowie dem Nachhaltigkeitsnetzwerk der Fraunhofer-Gesellschaft.

# FRAUNHOFER-VERBUND WERKSTOFFE, BAUTEILE – MATERIALS



*Deformationsmoden und Versagensmechanismen  
beim Stauchen von Aluminiumröhren.*

 **Fraunhofer**  
MATERIALS

Weitere Informationen finden Sie unter  
[www.materials.fraunhofer.de](http://www.materials.fraunhofer.de)



**Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS bündelt die Kompetenzen der materialwissenschaftlich orientierten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft.**

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik umfasst bei Fraunhofer die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über die Fertigungsverfahren im quasiindustriellen Maßstab und die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens. Entsprechendes gilt für die aus den Materialien hergestellten Bauteile und deren Verhalten in Systemen. In all diesen Feldern werden neben den experimentellen Untersuchungen in Labors und Technika gleichrangig die Verfahren der numerischen Simulation und Modellierung eingesetzt, dies über alle Skalen, vom Molekül bis zum Bauteil und zur Prozesssimulation. Stofflich deckt der Fraunhofer-Verbund MATERIALS den gesamten Bereich der metallischen, anorganisch-nichtmetallischen, polymeren und aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugten Werkstoffe sowie Halbleitermaterialien ab.

Der Verbund setzt sein Know-how vor allem in den Geschäftsfeldern Energie und Umwelt, Mobilität, Gesundheit, Maschinen- und Anlagenbau, Bauen und Wohnen, Mikrosystemtechnik und Sicherheit ein. Über maßgeschneiderte Werkstoff- und Bauteilentwicklungen sowie die Bewertung des kundenspezifischen Einsatzverhaltens werden Systeminnovationen realisiert. Mit strategischen Vorschauen unterstützt der Verbund die Entwicklung von Materialien und Technologien für die Zukunft.

**Ziele des Verbunds sind:**

- Erhöhung von Sicherheit und Komfort sowie Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in den Bereichen Verkehrstechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Bauen und Wohnen

- Steigerung der Effizienz von Systemen der Energieerzeugung, Energiewandlung, Energiespeicherung und -verteilung
- Verbesserung der Biokompatibilität und der Funktion von medizin- oder biotechnisch eingesetzten Materialien
- Erhöhung der Integrationsdichte und Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Bauteilen der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik
- Verbesserung der Nutzung von Rohstoffen und Qualitätsverbesserung der daraus hergestellten Produkte
- Recyclingkonzepte

**Beteiligt sind die Fraunhofer-Institute für**

Angewandte Polymerforschung IAP

Bauphysik IBP

Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Chemische Technologie ICT

Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI

Keramische Technologien und Systeme IKTS

Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI

Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

Silicatforschung ISC

Solare Energiesysteme ISE

System- und Innovationsforschung ISI

Werkstoffmechanik IWM

Windenergie und Energiesystemtechnik IWES

Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

**Sowie als ständige Gäste die Institute für**

Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Integrierte Schaltungen IIS

Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM

**Verbundvorsitzender:**

Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner, Fraunhofer ICT

**Stellvertretender Verbundvorsitzender:**

Prof. Dr. Peter Gumbsch, Fraunhofer IWM

**Geschäftsstelle:**

Dr. phil. nat. Ursula Eul, Fraunhofer LBF

ursula.eul@lbf.fraunhofer.de

# FRAUNHOFER-VERBUND VERTEIDIGUNGS- UND SICHERHEITSFORSCHUNG VVS



Weitere Informationen finden Sie unter  
[www.vvs.fraunhofer.de](http://www.vvs.fraunhofer.de)

### **Verankerung der Sicherheits- und Verteidigungsforschung im Selbstverständnis der Fraunhofer-Gesellschaft**

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist seit ihrer Gründung neben dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) auch dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) verpflichtet und deckt durch ihr Leistungsspektrum den weitaus größten Teil der institutionellen Forschung des BMVg ab.

Im Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS haben sich sieben Institute und drei Gastinstitute zusammengeschlossen, um ihre Kompetenzen zu bündeln und Forschungsaktivitäten im Bereich Verteidigung und Sicherheit zu koordinieren und umzusetzen.

In Zeiten gesellschaftlicher und politischer Turbulenzen ist Sicherheit ein Zukunftsmarkt mit enormem Wachstumspotenzial. Moderne Technologien, Produkte und Dienstleistungen sind gefragt wie nie zuvor. Wohlstand und Wachstum unserer Industriegesellschaften sind abhängig von global vernetzten kritischen Infrastrukturen, deren Störung oder Zerstörung unkalkulierbare ökonomische und gesellschaftliche Folgeschäden haben können. Schwindende Grenzen zwischen innerer und äußerer, zwischen öffentlicher und privater Sicherheit stellen unsere für die Sicherheit verantwortlichen staatlichen Institutionen vor bisher ungekannte Herausforderungen: International agierender Terrorismus, transnationale organisierte Kriminalität sowie teils globale Auswirkungen lokaler Naturkatastrophen und Großunfälle sind Beispiele dafür. Um die Vielzahl an möglichen Gefahren frühzeitig zu erkennen und möglichst zu vermeiden und um die Folgeschäden nach deren Eintritt

zu minimieren, werden innerhalb des Fraunhofer-Verbunds Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS umfassende technologische Sicherheitslösungen und begleitende methodische, prozessuale und taktische Konzepte entwickelt.

#### **Verbundvorsitzender:**

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer  
Fraunhofer IOSB

#### **Stellvertretender Verbundvorsitzender:**

Prof. Dr. Peter Martini  
Fraunhofer FKIE

#### **Geschäftsstelle:**

Caroline Schweitzer  
Fraunhofer IOSB  
caroline.schweitzer@iosb.fraunhofer.de

#### **Mitgliedsinstitute sind die Fraunhofer-Institute für**

Angewandte Festkörperphysik IAF  
Chemische Technologie ICT  
Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR  
Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE  
Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI  
Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT  
Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB  
Integrierte Schaltungen IIS (Gast)  
Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI (Gast)  
System- und Innovationsforschung ISI (Gast)

# SPITZENCLUSTER ELEKTROMOBILITÄT SÜD-WEST



*Die Elektromobilität gewinnt in der Green City  
Freiburg zunehmend an Bedeutung.*



Weitere Informationen finden Sie unter [www.e-mobilbw.de](http://www.e-mobilbw.de)

**Spitzencluster Elektromobilität Süd-West:  
Fraunhofer EMI arbeitet an der nachhaltigen  
Mobilität von morgen**

Das Fraunhofer EMI ist seit einigen Jahren Partner im Spitzencluster Elektromobilität Süd-West. Der Spitzencluster verfolgt das Ziel, die Elektromobilität weiter voranzutreiben, Deutschland als Leitanbieter und Leitmarkt der E-Mobilität mit internationaler Strahlkraft zu etablieren und Baden-Württemberg zu einer im Weltmarkt führenden Region für elektromobile Lösungen zu machen. Nachdem der Cluster 2012 erfolgreich an der dritten Runde des Spitzencluster-Wettbewerbs des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) teilgenommen hat, sind dort mittlerweile über 80 renommierte große, mittlere und kleine Unternehmen, Hochschulen sowie Forschungsinstitute miteinander vernetzt.

An einem der zentralen Projekte des Spitzenclusters war das Fraunhofer EMI beteiligt. Bis zum Herbst 2015 entwickelten die Partner in DINA (Diagnose und Instandsetzung im After Sales) gemeinsam effiziente und zuverlässige Diagnosemöglichkeiten und Reparaturkonzepte sowie kostengünstige Instandsetzungslösungen im After-Sales-Bereich für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Die Forschungsschwerpunkte des EMI lagen dabei in der

Analyse der Komponenten im Gesamtsystem sowie in der Erfassung der Interaktionen, Wechselwirkungen und der sich daraus ergebenden Fehlerbilder. So wurden komplexe Fehlerzusammenhänge aufgedeckt und modelliert. Die Modelle und Fehlerbilder dienen dann als Ausgangspunkt für den Entwurf von symptom-basierten Diagnosealgorithmen (On-Board- und Off-Board-Diagnose) und wurden in ein ganzheitliches Diagnosekonzept integriert.



**Ansprechpartner**  
**Philipp Dahl**  
philipp.dahl@emi.fraunhofer.de



### **Clean Sky: Europas größtes Luftfahrt- forschungsprogramm**

Die Luftfahrt soll emissionsärmer, spritsparender und umweltfreundlicher werden – das haben sich führende Luftfahrtunternehmen und Forschungseinrichtungen im EU-Projekt »Clean Sky« zum Ziel gesetzt. 75 Prozent weniger CO<sub>2</sub>, 90 Prozent weniger NO<sub>x</sub>, 65 Prozent weniger Fluglärm: Clean Sky will Technologien entwickeln, die maßgeblich zu umweltverträglicheren Flugzeugen und einem insgesamt schadstoffärmeren Luftverkehr beitragen. Ab 2020 sollen die neu entwickelten Komponenten in Demonstratoren integriert und auf ihre Flugfähigkeit getestet werden.

Um diese ambitionierten Ziele erreichen zu können, haben sich die großen Industrieunternehmen des europäischen Luftfahrtsektors und die Europäische Union zu einer Partnerschaft, der Joint Technology Initiative Clean Sky, zusammengeschlossen. Von 2014 bis 2024 läuft Clean Sky 2 im Rahmen des EU-Forschungsrahmenprogramms Horizon 2020. Beteiligt sind die großen europäischen Luftfahrtunternehmen Airbus, Airbus Helicopters, AgustaWestland (jetzt

Leonardo-Finmeccanica), Alenia Aermacchi (jetzt Leonardo-Finmeccanica), Dassault Aviation, DLR, EADS-CASA (jetzt Airbus Defence and Space), Evezor, Liebherr, MTU, Piaggio Aero, Rolls-Royce, Saab, Safran und Thales. Fraunhofer ist mit sieben Instituten Teil dieser Partnerschaft.

In enger Abstimmung und Kooperation mit den Industriepartnern arbeitet das Fraunhofer EMI als eines von sieben Kerninstituten an Clean Sky 2 mit und entwickelt im 3D-Druck gefertigte metallische Strukturen, untersucht Auswirkungen von Hagel und Blitzschlag auf Flugzeugstrukturen und testet Micro-Debris Impact auf neue Leichtbaustrukturen.

Das Fraunhofer EMI übernimmt nicht nur die technische Entwicklungsarbeit, sondern auch Managementaufgaben innerhalb des Clean-Sky-Programms: Dr. Stephanie Günther repräsentiert die Fraunhofer-Gesellschaft im Steering Committee des Airframe Integrative Technology Demonstrator (ITD), und Dr. Michael May koordiniert die Fraunhofer-Aktivitäten in dem Bereich High Versatility Cost Efficiency (HVC) des Airframe ITD.



**Ansprechpartnerin**  
**Dr. Stephanie Günther**

stephanie.guenther@emi.fraunhofer.de

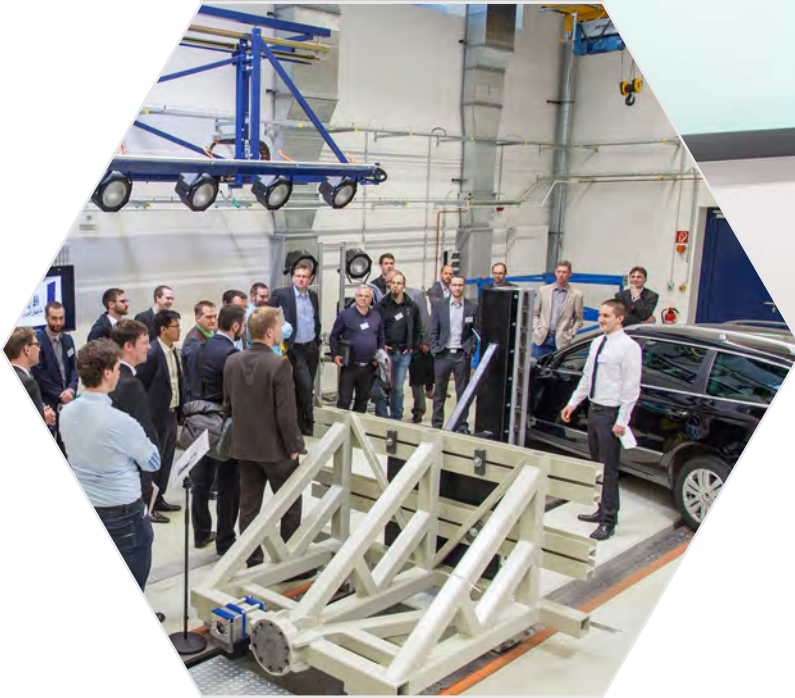






HIGHLIGHTS  
2015/2016

# CRASHMAT, FREIBURG, 21. UND 22. APRIL 2015



*crashMAT bietet mit gebündelten Kompetenzen von der Werkstoffprüfung über Komponententests und Bauteilversuche bis zur numerischen Methodenentwicklung die einmalige Kombination aus Experiment und Simulation.*

### **7. Freiburg-Workshop zum Werkstoff- und Strukturverhalten bei Crashvorgängen, 21. und 22. April 2015, EMI Freiburg**

*crashMAT* ist das Freiburg-Zentrum für crashrelevante Werkstoffcharakterisierung und eine Kooperation von Fraunhofer EMI und Fraunhofer IWM.

Im Bereich Werkstoffcharakterisierung, Simulation und Bauteilprüfung bietet *crashMAT* mit gebündelten Kompetenzen von der Werkstoffprüfung über Komponententests und Bauteilversuche bis zur numerischen Methodenentwicklung die Kombination aus Experiment und Simulation. Durch Vorträge und Diskussion auf dem alle drei Jahre stattfindenden Workshop entsteht ein Austausch zwischen Herstellern, Zulieferern und Forschungsinstituten über neue Verfahren und zukünftige interessante Aufgaben. Charakterisierung und Modellierung von Werkstoffen und Strukturen unter dynamischer Belastung – das war das zentrale Thema unseres Workshops *crashMAT* 2015.

Zu den Schwerpunkten »Versagen: Charakterisierung und Modellierung« und »Neue Werkstoffe des Leichtbaus« gab es einen spannenden Dialog zwischen Automobilindustrie und Forschung mit dem Ziel, die Anwendung der Forschungsinhalte in der industriellen Entwicklung zu fördern.

Der nächste *crashMAT*-Workshop ist für April 2018 geplant.



Weitere Informationen finden Sie unter [www.crashmat.de](http://www.crashmat.de)

# WISSENSCHAFTSMARKT, FREIBURG, 10. UND 11. JULI 2015



*Auf dem Münsterplatz im Zentrum von Freiburg begeisterte der  
Freiburger Wissenschaftsmarkt ein bunt gemischtes Publikum.*

### Freiburger Wissenschaftsmarkt – gesehen, gestaunt und mitgemacht

Am 10. und 11. Juli 2015 hieß es wieder »Wissen. Staunen. Mitmachen.« beim Freiburger Wissenschaftsmarkt auf dem Münsterplatz. Ein Marktplatz, fünf Großzelte, rund 60 Aussteller und eine Bühne: So gab es auch 2015 wieder »Forschung zum Anfassen«. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie innovative Unternehmen aus der Region standen Rede und Antwort und erklärten ihre Arbeit anhand spannender und anschaulicher Experimente und Aktionen.

Die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute zeigten auf einem Gemeinschaftsstand Beispiele aus ihren Forschungsprojekten. Für das EMI stand in diesem Jahr der bauliche Schutz im Mittelpunkt. Das Modell »Blastsimulator«, das für die BAU 2015 gefertigt worden war, demonstrierte den Besucherinnen und Besuchern sehr anschaulich, wann, wofür und auf welche Weise der Schutz von Gebäuden eingesetzt wird.

Das Modell simuliert die Detonation eines Tanksattelzugs in einer städtischen Umgebung. Verschiedene Schutzmaßnahmen an belasteten Bauwerken können durch den Betrachter zuerst vergeben werden, anschließend sieht er anhand von Farben, wie stark ein Gebäude geschädigt wurde. Die Schutzmaßnahmen sind die Verstärkung durch Polymerbeton, Hochleistungsfaserbeton UHPC, mikrobewehrten Hochleistungsbeton DUCON und kohlenstofffaserverstärktes Mauerwerk.



Weitere Informationen finden Sie unter  
[www.uni-freiburg.de/innovation/wissenschaftsmarkt](http://www.uni-freiburg.de/innovation/wissenschaftsmarkt)

# SUSTAINABILITY SUMMIT, FREIBURG, 19. UND 20. OKTOBER 2015



*Professor Stefan Hiermaier begrüßt die Gäste des ersten Sustainability Summit im Konzerthaus Freiburg (oben). Der Co-Präsident des Club of Rome Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker erläutert in seiner Keynote die Ziele nachhaltiger Entwicklung.*

### Sustainability Summit 2015: nachhaltig durch Technologie

Vom 19. bis zum 20. Oktober 2015 fand im Konzerthaus in Freiburg die erste große Konferenz des Leistungszentrums Nachhaltigkeit statt. Der Sustainability Summit soll künftig einmal im Jahr einer der wichtigsten Treffpunkte für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den verschiedensten Disziplinen sein, die sich mit der nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft beschäftigen. Der erste Summit war dabei mit über 150 Teilnehmenden aus acht verschiedenen Nationen ein großer Erfolg.

Die Bedeutung des Sustainability Summits für das Leistungszentrum und Freiburg würdigten

Prof. Dr. Hans-Jochen Schiewer, Rektor der Albert-Ludwigs-Universität, und Prof. Dr. Martin Haag, Bürgermeister der Stadt Freiburg, zu Beginn des Summits. Anerkannte Experten wie der Co-Präsident des Club of Rome Prof. Dr. Ernst Ulrich von Weizsäcker und die Vorsitzende des Rats für Nachhaltige Entwicklung der Deutschen Bundesregierung Marlehn Thieme folgten der Einladung des Leistungszentrums Nachhaltigkeit in die Green City Freiburg.

Die Konferenz bot inhaltlich ein sehr breites Themenspektrum: Zunächst wurde die Frage diskutiert, inwieweit nachhaltige Entwicklung eine gesellschaftliche und ökologische Transformation erfordert und wie diese aussehen sollte. Die zweite Session konzentrierte sich auf konkrete Umsetzungsbeispiele für nachhaltige Lösungen aus den Materialwissenschaften.

In der dritten Session drehte sich alles um die »Resilienz« – also Widerstands- und Lernfähigkeit – unserer Gesellschaft. Zum Abschluss wurde dann die Zukunft unserer Energieversorgung im Kontext der Energiewende beleuchtet.

Für das Fraunhofer EMI war die dritte Session, die den Titel »Resilience Engineering« trug, von besonderem Interesse. Prof. Dr. Michael Bruno vom Stevens Institute of Technology in New Jersey, USA, stellte die Frage, wie die Resilienz von Gesellschaften mithilfe ingenieurwissenschaftlicher Methoden und Technologien erhöht werden kann. Bruno präsentierte dazu die Ergebnisse einer Studie, die er im Auftrag der Lloyd's Register Foundation durchgeführt hatte. Mit Dr. Ivo Häring stellte in dieser Session auch ein Wissenschaftler des EMI aktuelle Erkenntnisse aus der Resilienzforschung vor. Er zeigte verschiedene ingenieurwissenschaftliche Möglichkeiten auf, mit deren Hilfe Resilienz quantifiziert werden kann.

Darüber hinaus war das EMI auch mit seinen drei Pilotprojekten in der konferenzbegleitenden Fachausstellung vertreten. Im Forschungsschwerpunkt Resilience Engineering arbeiten die Experten des EMI mit Informatikern der Universität und Mikrosystemtechnikern der Hahn-Schickard-Gesellschaft an Indikatoren zur validen Messung von Resilienz – und greifen damit direkt die Ansätze auf, die Dr. Häring in seinem Vortrag während der Konferenz vorstellte. Die zwei anderen Projekte beschäftigen sich mit nachhaltiger Materialforschung. So wollen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am EMI gemeinsam mit den Biologen der Universität Freiburg herausfinden, wie Selbstreparaturmechanismen von Pflanzen für technische Anwendungen nutzbar gemacht werden können. Außerdem beschäftigt sich das EMI mit der Frage, wie aus Lignin, einem Abfallprodukt der Holzwirtschaft, weiterverwendbare Materialien entwickelt werden können.



Weitere Informationen finden Sie unter [www.sustainability-summit.de](http://www.sustainability-summit.de)

# INATECH, FREIBURG, 22. OKTOBER 2015



*Der Rektor der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Prof. Dr. Hans-Jochen Schiewer, freut sich über die Gründung des neuen Instituts für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH), Prof. Dr. Stefan Glunz (Mitte) ist am INATECH Professor für »Photovoltaische Energiekonversion«. Die feierliche Eröffnung fand am 22. Oktober 2015 in der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg statt.*



### Neues Institut für Nachhaltige Technische Systeme: INATECH

Die Technische Fakultät der Universität Freiburg hat ein weiteres, zukunftsweisendes Standbein bekommen: Das Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) erweitert das Spektrum der Fakultät in Forschung und Lehre um das Thema der ingenieurwissenschaftlichen Nachhaltigkeitsforschung. »Diese strategische Erweiterung eröffnet uns ein riesiges Potenzial für Lehre, Forschung und Technologietransfer«, so Rektor Prof. Dr. Hans-Jochen Schiewer. »Als Volluniversität waren wir in der Forschung zum Thema Nachhaltigkeit schon zuvor herausragend profiliert. Mit dem INATECH verfügen wir nun über ein Alleinstellungsmerkmal, das viele wegweisende For-

schungsansätze und Innovationen verspricht und die internationale Attraktivität unserer Universität deutlich erhöhen wird.«

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler widmen sich am INATECH drei thematischen Schwerpunkten:

Sie erforschen nachhaltige Werkstoffe, die energie- und ressourcenschonend hergestellt und eingesetzt werden können. Sie entwickeln

Systeme, die eine zuverlässige Versorgung mit erneuerbarer Energie sowie deren Speicherung und effizienten Einsatz ermöglichen.

Und sie sichern die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit von Systemen, die sogenannte Resilienz, gegenüber kurz- und langfristigen Veränderungen wie Naturkatastrophen oder dem Klimawandel. Das Konzept für das INATECH, an dem zunächst

14 Professuren – je sieben seitens der Universität und der Fraunhofer-Gesellschaft – vorgesehen sind, haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität und der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute gemeinsam erarbeitet: Es ist zugleich der ingenieurwissenschaftliche Kern des Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg, das die Albert-Ludwigs-Universität und die Fraunhofer-Institute im März 2015 gegründet haben.

In der Lehre wird das INATECH ebenfalls neue Impulse setzen: Zum Wintersemester 2016/2017 soll der Masterstudiengang Sustainable Systems Engineering starten, ein Bachelorstudiengang soll ein Jahr später folgen. »Die Studierenden werden sich mit gesellschaftlich relevanten Themen beschäftigen und versuchen, technische Neuerungen umzusetzen. Was sie hier schaffen, wird sich auf die nächste Generation auswirken. Ich bin mir sicher, dass wir damit junge Leute begeistern und anziehen werden«, sagt Prof. Dr. Stefan Hiermaier. Er ist Gründungsdirektor des INATECH und Inhaber der Gips-Schüle-Professur für Nachhaltige Ingenieursysteme. Die Gips-Schüle-Stiftung finanziert die zum 1. Oktober 2015 eingerichtete Professur mit insgesamt 500 000 Euro für fünf Jahre. Zweck der 1965 gegründeten Stiftung ist es, Wissenschaft und Forschung zu fördern. Der Fokus liegt hierbei auf der Erforschung und Entwicklung umweltverträglicher Baustoffe und Verfahren sowie umweltfreundlicher Techniken.



Weitere Informationen finden Sie unter [www.tf.uni-freiburg.de/inatech.de](http://www.tf.uni-freiburg.de/inatech.de)

# TECH CENTER I-PROTECT, STUTTGART, 21. JANUAR 2016



*Die Partner im Tech Center i-protect freuen sich über die erfolgreiche Kooperation. Das Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg forscht gemeinsam mit Daimler und Bosch an Sicherheitslösungen für zukünftige Fahrzeuge.*

### Tech Center i-protect

Mit einer hochkarätig besetzten Pressekonferenz im Ministerium für Finanzen und Wirtschaft in Stuttgart eröffneten die Beteiligten das Tech Center i-protect im Januar 2016. Im Beisein des Ministers für Finanzen und Wirtschaft Dr. Nils Schmid unterzeichneten die Partner des Tech Centers die Kooperationsvereinbarung und gaben damit den Startschuss für eine enge Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie auf dem Gebiet der integralen Fahrzeugsicherheit (siehe Foto).

Was Mitte des 20. Jahrhunderts mit der Erfindung von Knautschzonen, Airbag und Dreipunktgurt begann, ist noch lange kein abgeschlossener Entwicklungsprozess. Fahrerassistenzsysteme und neue Möglichkeiten der Kommunikation (Car2Car, Car2X) bieten noch viel ungenutztes Potenzial, um die Sicherheit der Fahrzeuginsassen und anderer Verkehrsteilnehmer zu erhöhen. Nach wie vor ist die Fahrzeugsicherheit eines der wichtigsten Forschungsthemen in der Automobilbranche und ein sehr komplexes obendrein. Aktuelle Ergebnisse aus dem Bereich der Materialforschung spielen hier genauso mit hinein wie die Entwicklung neuer Sensoren oder Assistenzsysteme. Passive Sicherheitsmerkmale und aktive Sicherheitssysteme werden stetig weiterentwickelt und um Systeme erweitert, die bei einem unvermeidbaren Aufprall eingreifen, um den Insassenschutz zu erhöhen. Diese sogenannte integrale Sicherheit wird insbesondere vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen wie elektrische Antriebssysteme oder autonomes Fahren immer komplexer werden.

Trotz vieler Sicherheitssysteme in modernen Automobilen sterben laut Angaben des Statistischen Bundesamts jährlich über 3350 Menschen auf deutschen Straßen, mehr als 67 000 werden schwer verletzt. Dies ist Ansporn genug, die Potenziale für eine Verbesserung der integralen Sicherheit von Fahrzeugen zu erforschen und einen Beitrag zu leisten zum Ziel der EU, die Zahl der Unfallopfer im Straßenverkehr in den EU-Ländern bis 2020 zu halbieren.

Aus dieser Motivation heraus wurde das Tech Center i-protect gegründet. Es ist eine gemeinsame Forschungsinitiative der Daimler AG, der Robert Bosch GmbH und des Leistungszentrums Nachhaltigkeit, welches die Freiburger Fraunhofer-Institute und die Albert-Ludwigs-Universität Freiburg umfasst. Weitere Partner sind das Forschungszentrum SRC SimTech der Universität Stuttgart, das Institut für Automobiltechnik der TU Dresden sowie das Institut für Fahrzeugsicherheit der TU Graz. Gemeinsam erforschen die Partner in den kommenden fünf Jahren verschiedene Themen, die von einem präventiven Insassen- und Partnerschutz über innovative Werkstoffe im Automobilbau bis hin zu zukünftigen Prüftechnologien in der Fahrzeugsicherheit reichen. Die Industriepartner Daimler AG und Robert Bosch GmbH stellen für diese Forschung insgesamt sechs Millionen Euro zur Verfügung. Erste zukunftsweisende Projekte wurden bereits begonnen.

Weitere Informationen finden Sie unter [www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de/ankerprojekte/tech-center-i-protect](http://www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de/ankerprojekte/tech-center-i-protect)





NAMEN, DATEN,  
EREIGNISSE

# GIRLS' DAY AM FRAUNHOFER EMI, 24. APRIL 2015



*Präzision ist gefragt bei der Arbeit mit dem Lötcolben. Die Teilnehmerinnen des Girls' Day beim Bau einer LED-Taschenlampe im Elektronik-Labor des Fraunhofer EMI.*

## Der Girls' Day 2015 am Fraunhofer EMI

Mädchen interessante und spannende Einblicke in die vielseitigen Ausbildungsberufe und Studiengänge in IT, Handwerk, Naturwissenschaften und Technik zu geben und sie für eine Tätigkeit in genau solchen Bereichen zu ermutigen ist das Ziel des deutschlandweit durchgeführten Girls' Day. Der Mädchen-Zukunftstag bietet eine Chance, Mädchen zu zeigen, dass Frauen auch in scheinbar typischen Männerberufen erfolgreich sein können.

Dafür öffnen am Girls' Day zahlreiche Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Institutionen ihre Türen für Schülerinnen ab der fünften Klasse. Denn gerade in den Berufs- und Studienfeldern rund um die Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik, den sogenannten MINT-Fächern, ist der Anteil von Frauen

immer noch gering. Aktuelle Zahlen des Statistischen Bundesamts belegen zwar, dass es in den letzten Jahren einen erfreulichen Anstieg der Studienanfängerinnen in den klassischen ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen und in der Informatik gab, die Zahl der Studienanfängerinnen in allen MINT-Fächern lag im Wintersemester 2014/2015 im Vergleich zu den männlichen Studienanfängern jedoch bei lediglich 29 Prozent.

Hier gilt es aufzuholen – ein Ziel, dem sich die Fraunhofer-Gesellschaft verpflichtet hat. Die berufliche Gleichstellung von Mann und Frau und die Förderung von Frauen in Fach- und Führungspositionen ist bei Fraunhofer ein zentraler Bestandteil der Unternehmenspolitik. Um auch junge Frauen früh für die Arbeit in Wissenschaft und Forschung

zu begeistern, nutzt Fraunhofer Aktionen wie den Girls' Day.

Der Mädchen-Zukunftstag fand am 23. April 2015 am Freiburger EMI statt und hielt eine spannende Mischung aus theoretischem Input und praktischen Versuchen bereit. Nach der Vorstellung der Fraunhofer-Gesellschaft und der Arbeitsgebiete des Ernst-Mach-Instituts durch Birgit Bindnagel lernten die acht Mädchen der Klassenstufen 8 bis 10 mit Dr. Hanna Paul ein echtes Rollenvorbild kennen. Sie gewannen Einblicke in den Forschungsalltag einer Ingenieurin und erfuhren aus erster Hand, wie man an einem Fraunhofer-Institut zu den brandaktuellen und spannenden Themen unserer Zeit wie etwa dem Leichtbau und der Energieeinsparung wissenschaftlich und anwendungsorientiert beitragen kann.

Ein Gang durch die Labore führte die Mädchen in die Bereiche der technischen Praxis des EMI ein. In der Werkstatt zeigte der Werkstattleiter Helmut Zettl, wie Werkzeuge hergestellt werden und was die Lehrlinge der Feinwerkmechanik am EMI lernen. Sie konnten dabei zusehen, wie ein Flaschenöffner in Pferdeform gefertigt wurde, und diesen dann als praktische Erinnerung mit nach Hause nehmen. Auch ein Besuch im Materiallabor, wo Hanna Paul und Noah Ledford einen Versuch zum Thema Leichtbau durchführten, gab den Mädchen spannende Einblicke in die ungekannte Welt der Technik.

In der zweiten Hälfte des Tages durften die acht Mädchen selbst Hand anlegen, denn im Elektronik-Labor hieß es »Ran an den LötKolben!«: Unter der professionellen Anleitung von Kevin Kreklow, Ulrike Clausen und Max Ortlieb sowie der Auszubildenden Melina Haller durfte jedes Mädchen selbst eine LED-Taschenlampe bauen und dadurch praxisnahe Erfahrungen mit der ingenieurwissenschaftlichen Arbeit in einem Forschungsinstitut gewinnen.



Weitere Informationen finden Sie unter [www.girls-day.de](http://www.girls-day.de)

# BUSINESSRUN FREIBURG, 11. JUNI 2015



*Strahlende Gesichter und viel Erfolg: Die Mitarbeitenden am EMI sind nicht nur in der Forschung »kurzzeitdynamisch«!*



### Bestleistungen beim BusinessRun Freiburg 2015

Auch in diesem Jahr hieß es für 39 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fraunhofer EMI: »Auf die Plätze, fertig, los!« Am 11. Juni 2015 lockte der Freiburger BusinessRun über 5500 Läuferinnen und Läufer aus rund 400 Unternehmen auf die Laufstrecke entlang der Dreisam. Insgesamt 189 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Freiburger Fraunhofer-Institute gingen an den Start. Mit insgesamt 63 Dreierteams stellten die Freiburger Fraunhofer-Institute die zweitgrößte Teilnehmerzahl.

Die Begeisterung und Laufdisziplin zahlten sich aus: Im Firmenranking belegte das gesamte Fraunhofer-Freiburg-Team nach dem Universitätsklinikum den zweiten Platz. Auch die EMI-Läufer konnten sich über Bestleistungen freuen: Besonders hervorzuheben ist die Leistung von Markus Jung, der mit einer Zeit von 20 Minuten und 12 Sekunden in seiner Altersklasse den ersten Platz belegte. Das Team »Schneller als Ernst«, mit den Läufern Stefan Hiermaier, Frank Boraus und Markus Jung, war das schnellste EMI-Team und belegte in der Teamwertung »Männer« den vierten Platz. Neben diesen Bestleistungen dürfte nach sechs Kilometern Laufstrecke für jeden der Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Einlauf ins Schwarzwald-Stadion eine gelungene Belohnung gewesen sein.

Der nächste BusinessRun Freiburg findet als »B2Run« im Juli 2016 statt.

Mehr Informationen erhalten Sie unter [www.b2run.de](http://www.b2run.de)

# AUSZEICHNUNG FÜR EMI-WISSENSCHAFTLER, SAN DIEGO, USA, 21. BIS 24. JUNI 2015



*Dr. Michael May (rechts) und Torsten Lässig mit dem Preis für das beste Paper in der Kategorie »Best Practical Use of Simulation Technology«.*

### **Auszeichnung für EMI-Wissenschaftler**

Vom 21. bis 24. Juni 2015 fand in San Diego, USA, der NAFEMS World Congress statt. Hier trafen sich mehr als 550 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Forschung und Industrie zum Austausch von praxisnahen Anwendungen moderner Simulationstechnologien.

Unter den mehr als 270 Fachvorträgen war auch das Ernst-Mach-Institut mit insgesamt drei Vorträgen aus verschiedenen Themenbereichen (Automobilcrash, Impakt, Preprocessing) vertreten.

Wir freuen uns darüber, dass Dr. Michael May und Torsten Lässig für ihren Beitrag »Simulation of Hypervelocity Impact on Hard Ballistic Composites« mit dem Preis für das beste Paper in der Kategorie »Best Practical Use of Simulation Technology« ausgezeichnet wurden.

# AUSZEICHNUNG DER BESTEN FRAUNHOFER-AZUBIS, 23. BIS 24. NOVEMBER 2015



*Der ausgezeichnete Timo Müller (Mitte) zusammen mit seinem  
Ausbilder Kevin Kreklow (links) und Fraunhofer-Vorstand für Personal,  
Recht und Verwertung Prof. Dr. Alexander Kurz.*

### Ein Abschluss voller Ehren – Auszeichnung der besten Fraunhofer-Azubis am 23. und 24. November 2015

Ein erfolgreicher Berufsabschluss ist nach einer spannenden und fordernden Ausbildung eine bedeutsame Erfahrung. Dabei jedoch als einer der Besten abzuschließen ist ein besonders herausragendes Verdienst, der von der Fraunhofer-Gesellschaft belohnt wird.

Aus diesem Anlass wurden am 23. und 24. November 2015 die Besten unter den Fraunhofer-Azubis für ihre herausragenden Leistungen geehrt, die sie im Rahmen ihrer Ausbildung oder im Wettbewerb »Jugend forscht« erbracht hatten. Auch die Ausbilderinnen und Ausbilder, die mit ihrem Engagement wesentlich zum Erfolg der Azubis beitrugen, wurden mitprämiiert.

Aus dem Ernst-Mach-Institut durfte sich Timo Müller, Auszubildender im Elektronik-Labor in Freiburg, über eine Auszeichnung freuen. Er schloss seine Ausbildung mit dem Prädikat »sehr gut« ab. Doch damit nicht genug: Für sein Vorhaben, zusätzlich noch ein Fernstudium anzutreten, erhielt Herr Müller den Förderpreis der Firma SICK. Den Bachelor of Engineering Elektro- und Informationstechnik hat Herr Müller bereits einen Monat nach seinem Abschluss angetreten. Er beendet bald das zweite Semester. »Der Förderpreis«, so Müller, »unterstützt mich sehr gut und ist ein zusätzlicher Ansporn zum Lernen.« Zum erfreulicherweise wiederholten Mal wurde auch sein Ausbilder Kevin Kreklow für sein Engagement als Ausbilder mit einer Ehrenurkunde gewürdigt.

Im Rahmen der Ehrungsfeier verbrachten Herr Müller und Herr Kreklow gemeinsam mit weiteren jungen Talenten und deren Ausbilderinnen und Ausbildern zwei interessante Tage im Deutschen Museum und in der Fraunhofer-Zentrale in München. »Mir hat es sehr gut gefallen«, so Müller, »auch einmal die Azubis aus den anderen Fraunhofer-Instituten kennenzulernen und sich persönlich über die Arbeit dort auszutauschen.«

Am 23. November 2015 gab es zunächst eine Einführung im Ehrensaal durch den Forschungsdirektor des Deutschen Museums Herrn Prof. Dr. Helmut Trischler woraufhin eine Führung durch die Ausstellung zum Menschenzeitalter »Willkommen im Anthropozän. Unsere Verantwortung für die Zukunft der Erde« folgte.

Welche konkrete Rolle Fraunhofer als wissenschaftlicher Partner des Zentrums Neue Technologien im Deutschen Museum (ZNT) spielt, war Thema einer anschließenden Diskussion, die von Frau Dr. Christine Kolczewski, Leiterin des ZNT, geführt wurde. Am zweiten Tag fand in der Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft die Ehrung statt, bei welcher Herr Prof. Dr. Alexander Kurz, Vorstand im Bereich Personal, Recht und Verwertung, feierlich die Auszeichnungen überreichte. Diese Anerkennung durch die Verantwortlichen der Ausbildung bei Fraunhofer begeisterte Herrn Müller besonders: »Ich fand es toll, dass auch der Vorstand diese besonderen Leistungen wertschätzt und persönlich die Auszeichnungen überreichte.«

Die Ehrung in München war ein würdiger Abschluss der Ausbildung bei Fraunhofer und läutete feierlich eine neue Phase im beruflichen Leben der Azubis ein.

# DOKTORANDEN



*Die Doktorhüte des Fraunhofer EMI sind kleine Kunstwerke, die die Werkstatt individuell und kunstvoll anfertigt. Tobias Hoerth (links) zeigt seinen Hut einem echten Fachmann: Prof. Dr. Thomas Kenkmann, Prodekan der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.*

### Doktoranden am EMI 2015 – der Doktorhut steht ihnen gut

Mit Tobias Hoerth, Robert Külls, Oliver Millon und Stefan Moser haben im Jahr 2015 vier Doktoranden am Fraunhofer EMI ihre Promotion erfolgreich abgeschlossen. Dies war für die vier Wissenschaftler und ihre Verwandten, Freunde und Kollegen ein freudiger Anlass, ihren hart erarbeiteten und verdienten Erfolg zu feiern. Die Doktorandenfeiern gaben ihnen hierfür den angemessenen Rahmen.

#### Tobias Hoerth

Tobias Hoerths Promotion wurde unter dem Titel »Investigations on meteorite impact based on hypervelocity impact

experiments on rock targets« kumulativ veröffentlicht und liegt sowohl in der Bibliothek der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen der Universität Freiburg als auch in der Universitätsbibliothek vor. Im Rahmen seiner Arbeit führte Herr Hoerth Impactexperimente unter Verwendung von zweistufigen Leichtgasbeschleunigern durch. Dabei wurden Modellmeteoriten auf Geschwindigkeiten von mehreren Kilometern pro Sekunde beschleunigt, welche anschlie-

ßend in Gesteinsmaterialien einschlugen. Mithilfe spezieller Hochgeschwindigkeitskameras sowie leistungsstarker Beleuchtungstechnik konnte der hochdynamische Prozess des durch den Einschlag verursachten Materialauswurfs (Ejekta) über einen Zeitraum von mehreren Millisekunden aufgenommen werden. Außerdem wurden Untersuchungen zum Einfluss von Parametern wie z. B. Porosität und Wassersättigung des Targetmaterials auf die Kraterbildung, das Kraterwachstum und die Auswurf-dynamik durchgeführt. Durch den Einbau von Drucksensoren konnte Herr Hoerth zudem quantitative Informationen über Amplitude, Form sowie das Abklingverhalten der durch den Impact hervorgerufenen Druckwelle gewinnen. Mithilfe eines Split Hopkinson Bars wurde der Drucksensor unter dynamischer Belastung kalibriert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Auswurf von Material beim Impact in Sandstein in mehreren Phasen abläuft und dass die Materialeigenschaften die Kraterbildung entscheidend mitprägen: So beeinflusst die Porosität des Targetmaterials sowohl die Kratereffizienz als auch den Auswurfsprozess. Weiterhin zeigte sich, dass das Kraterwachstum im wassergesättigten Material schneller abläuft und größere Durchmesser des transienten Kraters erreicht werden. Mithilfe eines ballistischen Pendels bestimmte Tobias Hoerth darüber hinaus den beim Impact auf das Target übertragenen Impuls. Zusätzlich zu den Impactexperimenten wurden die Targetmaterialien speziellen Materialtests zur Bestimmung von Parametern wie z. B. Festigkeit und Dichte, welche insbesondere für Skalierungsgesetze erforderlich sind, unterzogen. Mit seinen Untersuchungen trug Herr Hoerth entscheidend zu einem erhöhten Verständnis der transienten Prozesse bei der Impactkraterbildung bei.



*Die Doktorwürde zaubert ein Lächeln auf jedes Gesicht,  
Robert Külls mit Prof. Dr. Klaus Thoma (links) und Oliver Millon (rechts).*



### Robert Külls

Robert Külls hat in seiner Dissertation »Systematik eines Beschleunigungssensor-Designkonzepts auf MEMS-Basis« eine Methodik für die Entwicklung von Beschleunigungssensoren zur Messung hochfrequenter Belastungen hoher Amplitude erarbeitet. Hintergrund seiner Arbeit ist ein grundsätzlicher, physikalischer Widerspruch: Zur Messung der wirkenden Beschleunigung bei kurzzeitphysikalischen Vorgängen ergeben sich extreme Anforderungen an Messbereich und Bandbreite der eingesetzten Sensoren, die möglichst gleichzeitig mit einer hohen Sensitivität erfüllt werden sollen. Während jedoch die Forderungen nach hohem Messbereich und hoher Bandbreite noch komplementär sind, ist es der zusätzliche Wunsch nach hoher

Sensitivität nicht, d. h., die genannten Eigenschaften können nicht gleichzeitig optimiert werden. Dies ist das Kernproblem beim Design eines Hoch-g-Beschleunigungssensors. Die erarbeitete Methodik analysiert und quantifiziert diesen Widerspruch und identifiziert Wege, wie dennoch grundlegend neue Sensordesigns gefunden und weiter optimiert werden können. Darauf basierend wird ein piezoresistiver Sensor entwickelt und gefertigt, der höhere Leistungsdaten aufweist als bisher existierende Lösungen. Zwar hat Herr Külls in seiner Arbeit Beschleunigungsmessungen betrachtet, das Ergebnis seiner Dissertation ist aber

allgemein für Inertialsensoren bzw. andere schwingungsfähige Systeme relevant. Die Dissertation wurde 2015 in der Schriftenreihe »Epsilon-Punkt-Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik« im Band 28 veröffentlicht.

### Oliver Millon

Oliver Millons Dissertation trägt den Titel »Analyse und Beschreibung des dynamischen Zugtragverhaltens von ultra-hochfestem Beton« und wurde 2015 im Band 27 der Schriftenreihe »Epsilon-Punkt-Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik« veröffentlicht.

In seiner Arbeit befasste sich Millon mit dem Thema des baulichen Schutzes. Hintergrund der Dissertation ist die steigende Tendenz des Eintretens von extremen Einwirkungen, durch die der Schutz von Bauwerken zunehmend an Bedeutung zunimmt. Dabei sind Konstruktionen aus Beton im Bauwesen elementar. Jedoch ist die Schutzwirkung von normalfestem Beton stark begrenzt. Der mit Stahlfasern bewehrte ultrahochfeste Beton (UHPC) ist eine Möglichkeit, den gestiegenen Anforderungen des baulichen Schutzes gerecht zu werden. In Herr Millons Arbeit wird das dynamische Verhalten eines Ultrahochleistungsbetons mit grober Gesteinskörnung und Mikrosta-hlfaserbewehrung experimentell untersucht und mittels mathematischer Formulierungen beschrieben. Das Ergebnis der Arbeit ist ein mesomechanischer Modellansatz, der das Zugspannungs-Rissöffnungs-Verhalten von einaxial beanspruchtem UHPC sowohl unter quasistatischer als auch unter hochdynamischer Belastung berechnet. Das Verhalten des nicht bewehrten Betons sowie des Fasermaterials wird separat analysiert, mathematisch beschrieben und schließlich zusammengeführt. Mittels experimenteller und analytischer Nachweisverfahren konnte Herr Millon zeigen, dass der Modellansatz nicht nur für den Referenz-UHPC, sondern auch für variierende Fasergehalte und Faserlängen anwendbar ist.



*Trägt nicht nur den neuen Titel mit Fassung: Stefan Moser mit seinem Doktorhut.*

### Stefan Moser

Stefan Mosers Dissertation trägt den Titel »Computertomographie mit stark unterbestimmten Datensätzen für komplexe Anwendungen« und wird in der Schriftenreihe »Epsilon-Punkt-Forschungsergebnisse aus der Kurzdynamik«. Der Fokus seiner Arbeit liegt auf der Anwendung für dynamische Vorgänge auf der Skala von Mikrosekunden, der 3D-Bildgebung großvolumiger Objekte in komplexen Umgebungen und der Korrektur von Artefakten durch unvollständige Bilddaten. Dies ist für das Verständnis vieler dynamischer Vorgänge in der Material- oder der Luft- und Weltraumforschung sowie in der KFZ-Entwicklung, aber auch für den Bereich der Sicherheitsanwendungen am Flughafen oder im Frachtwesen interessant.

In diesen Feldern galt der Einsatz von 3D-fähigen tomografischen Methoden bislang als nicht möglich beziehungsweise nicht realistisch. Herr Moser konnte in seiner Arbeit jedoch erstmalig zeigen, dass

mit der Hochgeschwindigkeitsröntgentomografie mit wenigen Projektionen auch komplexe, mehrere unterschiedliche Materialien enthaltende Volumen quantitativ analysiert werden können. Zu diesem Zweck wurde ein Experimentalaufbau für hochdynamische Versuche modifiziert und der Rekonstruktionsalgorithmus um eine Regularisierungsmethode erweitert, diese charakterisiert und eingesetzt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass beispielsweise auch unregelmäßig geformte Stahlfragmente mit einer Geschwindigkeit von ca. 300 Metern pro Sekunde erfolgreich detektiert und Messgrößen wie Masse, Ort, Geschwindigkeit und Impuls gleichzeitig abgeleitet werden können. Beim Umgang mit fehlerbehafteten, unvollständigen Bilddaten konnte gezeigt werden, dass das von Herrn Moser im Rahmen der Dissertation implementierte voxel- und informationsbasierte Metallartefakt-korrekturverfahren (IBMAR) sowohl zur Reduktion von Metallartefakten geeignet ist als auch Bildfehler von mit neuartigen, direkt konvertierenden Detektoren akquirierten Datensätzen kompensiert. Herr Mosers Dissertation belegt, dass Computertomografie mit unterbestimmten Datensätzen für Hochgeschwindigkeits- und Sicherheitsanwendungen, in denen bislang der Einsatz von 3D-fähigen tomografischen Methoden als nicht möglich bzw. als nicht realistisch galt, erfolgreich umgesetzt werden kann.

# EMI-ALUMNI



Alumni-Netzwerke gewinnen auch in der Fraunhofer-Gesellschaft an Bedeutung. Das Wort Alumnus kommt aus dem Lateinischen und bedeutet wörtlich übersetzt »Zögling«, es kommt von alere, »ernähren, aufziehen«. Unsere Alumni haben am Ernst-Mach-Institut gearbeitet und viele von ihnen auch promoviert. Sie haben am EMI den Grundstein für ihre künftige Karriere gelegt und freundschaftliche Verbindungen geknüpft.

Das Fraunhofer-Prinzip des »Transfers durch Köpfe« bedeutet auch, dass die Alumni Fraunhofer verlassen, um in Industrie und Wissenschaft wichtige Positionen zu besetzen. Zu ihnen wollen wir Kontakt halten und mit ihnen ein für beide Seiten gewinnbringendes Netzwerk bilden.

Im Alumni-Programm des Fraunhofer EMI tun wir dies bereits seit elf Jahren. Unsere Alumni tragen das am Ernst-Mach-Institut erworbene Wissen an ihre Arbeitsplätze in der Industrie, anderen Forschungseinrichtungen oder Behörden und entwickeln es dort weiter.

Aus dem wissenschaftlichen und persönlichen Kontakt entstehen neue Projektideen und immer ein fruchtbarer Austausch. Wir freuen uns, unsere Alumni bei den EMI-Institutsfesten oder wissenschaftlichen Veranstaltungen zu treffen und mit ihnen über neue Entwicklungen und Ideen zu diskutieren.

# GASTWISSENSCHAFTLER AM EMI

## Gastwissenschaftler am EMI



*Dr. Matti Isakov von der Technischen Universität Tampere, Finnland.*

Dr. Matti Isakov forscht vom 18. Januar 2016 bis zum 30. November 2016 als Gastwissenschaftler am Fraunhofer EMI. Als Materialwissenschaftler an der Technischen Universität Tampere in Finnland beschäftigt sich Dr. Isakov mit der experimentellen Charakterisierung metastabiler austenitischer Stähle unter hohen Verzerungsraten. Im Rahmen eines ersten Forschungsaufenthalts am Fraunhofer EMI von September 2013 bis August 2014 hat Dr. Isakov ein Materialmodell für diese besonderen Werkstoffe entwickelt und in ein kommerzielles FE-Programm implementiert. Der zweite Forschungsaufenthalt am Fraunhofer EMI knüpft nahtlos an diese Forschungsarbeiten an. Ziel seiner Forschung ist es, zu einem verbesserten Verständnis dieser speziellen Werkstoffklasse zu führen.





PUBLIKATIONEN,  
WISSENSCHAFTLICHER  
AUSTAUSCH

# PUBLIKATIONEN

## Veröffentlichungen in Monographien, Fachzeitschriften und Proceedings mit Peer Review

- Aberg, D.; Hermansson, P.; Sättler, A.; Rakus, D. (2015): Plasma ignition response for LOVA gun propellant at low loading densities. In: IEEE Transactions on Plasma Science 43 (5), S. 1316–1320. DOI: 10.1109/TPS.2015.2415591.
- Andricevic, N.; Duddeck, F.; Hiermaier, S. (2016): A novel approach for the assessment of robustness of vehicle structures under crash. In: International Journal of Crashworthiness 21 (2), S. 89–103. DOI: 10.1080/13588265.2015.1125618.
- Bauer, W.; Romberg, O.; Putzar, R. (2015): Experimental verification of an innovative debris detector. In: Acta Astronautica 117, S. 49–54. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.07.008.
- Behner, T.; Heine, A.; Wickert, M. (2016): Dwell and penetration of tungsten heavy alloy long-rod penetrators impacting unconfined finite-thickness silicon carbide ceramic targets. In: International Journal of Impact Engineering 95, S. 54–60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.04.008.
- Cunrath, R.; Wickert, M. (2016): Numerical analysis of the response of thick wires to extreme dynamic electromechanical loads. In: IEEE Transactions on Plasma Science 44 (1), S. 121–127. DOI: 10.1109/TPS.2015.2496370.
- Curatella, F.; Vinetti, P.; Rizzo, G.; Vladimirova, T.; Vendictis, L. de; Emter, T. et al. (2015): Toward a multifaceted platform for humanitarian demining. In: Book of Papers of the 12<sup>th</sup> International Symposium »MINE ACTION 2015«. 12<sup>th</sup> International Symposium »MINE ACTION 2015«. Biograd, Croatia, 27.–30.4.2015, S. 133–144.
- Deppisch, S.; Fingerle, M.; Forstmeier, S.; Thoma, K.; Wink, R. (Hg.) (2016): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien (Studien zur Resilienzforschung).
- Drube, L.; Harris, A. W.; Hoerth, T.; Michel, P.; Perna, D.; Schäfer, F. (2015): NEOShield – A global approach to near-earth object impact threat mitigation. In: Joseph N. Pelton und Firooz Allahdadi (Hg.): Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense: Springer International Publishing, S. 763–790. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03952-7\\_61](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03952-7_61).
- Durr, N.; Sauer, M. (2015): Mesoscale modeling of quartzite and sandstone under shock loading: Influence of porosity and pressure-dependent quartz stiffness on macroscopic behavior. Proceedings of the 2015 Hypervelocity Impact Symposium (HVIS 2015). In: Procedia Engineering 103, S. 105–112. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.015.
- Durr, N.; Sauer, M. (2015): Mesoscale simulation of quartzite and porous sandstone at high loading rates. In: Geomechanics from Micro to Macro: CRC Press, S. 789–794.
- Elies, S. (2015): Performance analysis of commercial accelerometers: A parameter review. In: Sensors & Transducers 193 (10), S. 179–190.
- Fischer, K.; Häring, I.; Riedel, W.; Vogelbacher, G.; Hiermaier, S. (2016): Susceptibility, vulnerability, and averaged risk analysis for resilience enhancement of urban areas. In: International Journal of Protective Structures 7 (1), S. 45–76. DOI: 10.1177/2041419615622727.
- Fischer, K.; Stolz, A. (2015): Deterministic consequence assessment of urban spaces due to blast loading. In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of Effects of Munitions with Structures (ISIEMS). 16<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of Effects of Munitions with Structures (ISIEMS). Sandestin, Florida, USA, 9.–13.11.2015.
- Früh, P.; Heine, A.; Weber, K. E.; Wickert, M. (2015): Effective depth-of-penetration range due to hardness variation for different lots of nominally identical target material. In: Defence Technology 12 (2), S. 171–176. DOI: 10.1016/j.dt.2015.10.002.
- Ganzenmüller, G. (2015): An hourglass control algorithm for Lagrangian Smooth Particle Hydrodynamics. In: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (286), S. 87–106. DOI: 10.1016/j.cma.2014.12.005.
- Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S.; May, M. (2015): Improvements to the prototype micro-brittle model of peridynamics. In: M. Griebel und M. A. Schweitzer (Hg.): Meshfree Methods for Partial Differential Equations VII, Bd. 100. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computational Science and Engineering), S. 163–183.
- Ganzenmüller, G.; Hiermaier, S.; May, M. (2015): On the similarity of meshless discretizations of Peridynamics and Smooth-Particle Hydrodynamics. In: Computers & Structures (150), S. 71–78. DOI: 10.1016/j.compstruc.2014.12.011.
- Ganzenmüller, G.; Sauer, M.; May, M.; Hiermaier, S. (2016): Hourglass control for Smooth Particle Hydrodynamics removes tensile and rank-deficiency instabilities. In: The European Physical Journal Special Topics 225 (2), S. 385–395. DOI: 10.1140/epjst/e2016-02631-x.
- Heider, N.; Steinbrenner, A.; Aurich, H.; Salk, M. (2015): A method for the determination of the viscoelastic relaxation function of reactive materials. In: European Physical Journal Special Topics, S. 1–11. DOI: 10.1140/epjst/e2015-02559-7.
- Heine, A.; Wickert, M. (2015): Scale-independent description of the rigid-body penetration of spherical projectiles into semi-infinite adobe targets. In: International Journal of Impact Engineering 75, S. 27–29. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.009.
- Hoerth, T.; Schäfer, F.; Hupfer, J.; Millon, O.; Wickert, M. (2015): Momentum transfer in hypervelocity impact experiments on rock targets. In: Procedia Engineering 103, S. 197–204. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.027.
- Horak, J.; Heunoske, D.; Lück, M.; Osterholz, J.; Wickert, M. (2015): Numerical modeling and characterization of the laser-matter interaction during high-power continuous wave laser perforation of thin metal plates. In: Journal of Laser Applications 27, S28003. DOI: 10.2351/1.4906467.
- Isakov, M.; Hiermaier, S.; Kuokkala, V.-T. (2015): Effect of strain rate on the martensitic transformation during plastic deformation of an austenitic stainless steel. In: Metallurgical and Materials Transactions A, S. 1–4. DOI: 10.1007/s11661-015-2862-z.
- Kisters, T.; Kuder, J.; Nau, S. (2015): Autonomous gauge for blast impulse determination close to explosive charges. In: Shock Waves, S. 1–11. DOI: 10.1007/s00193-015-0590-3.
- Klomfass, A.; Stolz, A.; Hiermaier, S. (2016): Improved explosion consequence analysis with combined CFD and damage models. In: Chemical Engineering Transactions 48, S. 109–114. DOI: 10.3303/CET1648019.
- Kupka, F.; Losch, M.; Zaussinger, F.; Zweigle, T. (2015): Semi-convection in the ocean and in stars: A multi-scale analysis. In: Meteorologische Zeitschrift, S. 1–16. DOI: 10.1127/metz/2015/0643.
- Lang, T.; Kervarc, R.; Bertrand, S.; Carle, P.; Donath, T.; Destefanis, R. et al. (2015): Short and long term efficiencies of debris risk reduction measures: Application to a European LEO mission. In: Advances in Space Research 55 (1), S. 282–296. DOI: 10.1016/j.asr.2014.07.039.



- Lässig, T.; Bagusat, F.; May, M.; Hiermaier, S. (2015): Analysis of the shock response of UHMWPE composites using the inverse planar plate impact test and the shock reverberation technique. In: *International Journal of Impact Engineering* 86, S. 240–248. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.08.010.
- Lässig, T.; Nguyen, L.; May, M.; Riedel, W.; Heisserer, U.; van der Werff, H.; Hiermaier, S. (2015): A non-linear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations. In: *International Journal of Impact Engineering* 75, S. 110–122. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.004.
- Leroch, S.; Varga, M.; Eder, S. J.; Vernes, A.; Rodriguez Ripoll, M.; Ganzenmüller, G. (2015): Smooth Particle Hydrodynamics simulation of damage induced by a spherical indenter scratching a viscoplastic material. In: *International Journal of Solids and Structures*, S. 188–202. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.11.025.
- Matura, P.; Heilig, G.; Lück, M.; Sauer, M. (2015): Simulation and experiments of hypervelocity impact in containers with fluid and granular fillings. In: *Proceedings of the 2015 Hypervelocity Impact Symposium (HVIS 2015)* 103, S. 365–372. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.034.
- May, M. (2015): Numerical evaluation of cohesive zone models for modeling impact induced delamination in composite materials. In: *Composite Structures* 133, S. 16–21. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.07.032.
- May, M. (2016): Measuring the rate-dependent mode I fracture toughness of composites – A review. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 81, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.10.033.
- May, M.; Furlan, S.; Mohrmann, H.; Ganzenmüller, G. (2016): To replace or not to replace? – An investigation into the residual strength of damaged rock climbing safety equipment. In: *Engineering Failure Analysis* 60, S. 9–19. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.036.
- May, M.; Ganzenmüller, G.; Wolfrum, J.; Heimbs, S. (2015): Analysis of composite T-joint designs for enhanced resistance to hydrodynamic ram. In: *Composite Structures* 125, S. 188–194. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.012.
- May, M.; Hesebeck, O. (2015): Assessment of experimental methods for calibrating rate-dependent cohesive zone models for predicting failure in adhesively bonded metallic structures. In: *Engineering Failure Analysis* 56, S. 441–453. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.12.008.
- May, M.; Hesebeck, O. (2015): Failure of adhesively bonded metallic T-joints subjected to quasi-static and crash loading. In: *Engineering Failure Analysis*, S. 454–463. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.12.007.
- May, M.; Hesebeck, O.; Marzi, S.; Böhme, W.; Lienhard, J.; Kilchert, S. et al. (2015): Rate dependent behavior of crash-optimized adhesives – Experimental characterization, model development, and simulation. In: *Engineering Fracture Mechanics* 133, S. 112–137. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2014.11.006.
- Michal, M.; Keuser, M.; Millon, O. (2016): Verbund von Beton und Bewehrungsstahl bei hoch-dynamischer Belastung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (1), S. 32–40. DOI: 10.1002/best.201500050.
- Müllers, I.; Fischer, K.; Nawabi, A.; Riedel, W. (2015): Design against explosions and subsequent progressive collapse. In: *Structural Engineering International* 25 (3), S. 319–325. DOI: 10.2749/101686615X14210663188736.
- Nguyen, L.; Lässig, T.; Ryan, S.; Riedel, W.; Mouritz, A.; Orifici, A. (2015): Numerical modelling of ultra-high molecular weight polyethylene composite under impact loading. In: *Proceedings of the 2015 Hypervelocity Impact Symposium (HVIS 2015)* 103, S. 436–443. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.043.
- Putzar, R.; Schäfer, F. (2015): EMI's TwinGun concept for a new light-gas gun type hypervelocity accelerator. In: *Procedia Engineering* 103, S. 421–426. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.041.
- Putzar, R.; Schäfer, F. (2016): Concept for a new light-gas gun type hypervelocity accelerator. In: *International Journal of Impact Engineering* 88, S. 118–124. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.09.009.
- Ramin, M. von; Grunwald, C.; Riedel, W.; Stolz, A. (2015): Simulating accidental explosion of cased and stacked sources in storages. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of Effects of Munitions with Structures (ISIEMS)*. 16<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of Effects of Munitions with Structures (ISIEMS). Sandestin, Florida, USA, 9–13.11.2015.
- Ramin, M. von; Stolz, A.; Millon, O.; Rinder, T. (2016): Assessment of urban building complexes subjected to natural and man-made hazards. *ACI 377 Special Publication on Structural Integrity and Resilience*. Farmington Hills, MI.
- Renger, P.; Siebold, U.; Kaufmann, R.; Häring, I. (2015): Semi-formal static and dynamic modeling and categorization of airport checkpoints. In: T. Nowakowski, M. Mlynczak, A. Jodejko-Pietruczuk und S. Webinska-Wojciechowska (Hg.): *Safety and Reliability. Methodology and Application*. European Safety and Reliability Conference (ESREL) 2014. London: Taylor & Francis, S. 1721–1731.
- Riedel, W.; Fischer, K.; Stolz, A.; Häring, I.; Bachmann, M. (2015): Modeling the vulnerability of urban areas. In: M. Stewart und M. Netherton (Hg.): *Design and Analysis of Protective Structures – Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS)*. 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS). Newcastle, Australia, 3.–6.2.2015, S. 469–477.
- Roller, C.; Stolz, A.; Fischer, K.; Cleave, R. (2015): Extended applicability of a lightweight retrofit system against varied explosion loads. In: M. Stewart und M. Netherton (Hg.): *Design and Analysis of Protective Structures – Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS)*. 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS). Newcastle, Australia, 3.–6.2.2015.
- Scharte, B.; Thoma, K. (2016): Resilienz – Ingenieurwissenschaftliche Perspektive. In: S. Deppisch, M. Fingerle, S. Forstmeier, K. Thoma und R. Wink (Hg.): *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien (Studien zur Resilienzforschung), S. 123–150.
- Schoppe C.; Zehetner, J.; Finger, J.; Baumann, D.; Siebold, U.; Häring, I. (2014): Risk assessment methods for improving urban security. In: *Safety and Reliability: Methodology and Applications*: CRC Press, S. 701–708. Online verfügbar unter <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b17399-98>.
- Stolz, A.; Fischer, K.; Roller, C.; Hauser, S. (2015): Design and assessment method for innovative ductile concrete elements to resist blast. In: M. Stewart und M. Netherton (Hg.): *Design and Analysis of Protective Structures – Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective*

Structures (ICPS). 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS). Newcastle, Australia, 3.–6.2.2015, S. 581–588.

Stolz, A.; Millon, O.; Klomfass, A. (2016): Analysis of the resistance of structural components to explosive loading by shock-tube tests and SDOF models. In: *Chemical Engineering Transactions* 48, S. 151–156. DOI: 10.3303/CET1648026.

Stolz, A.; Ruiz Ripoll, M. L. (2015): Experimental and computational characterization of dynamic loading and structural resistance of tunnels in blast scenarios. In: *Fire Technology*, S. 1–24. DOI: 10.1007/s10694-015-0496-8.

Thoma, K.; Scharte, B.; Hiller, D.; Leismann, T. (2016): Resilience engineering as part of security research: Definitions, concepts and science approaches. In: *European Journal for Security Research* 1 (1), S. 3–19. DOI: 10.1007/s41125-016-0002-4.

Uhlig, W. C.; Heine, A. (2015): Electromagnetic diagnostic techniques for hypervelocity projectile detection, velocity measurement, and size characterization: Theoretical concept and first experimental test. In: *Journal of Applied Physics* 118 (18). DOI: 10.1063/1.4935086.

Vignjevic, R.; Hughes, K.; Vuyst, T. de; Djordjevic, N.; Campbell, J. C.; Stojkovic, M. et al. (2015): Lagrangian analysis led design of a shock recovery plate impact experiment. In: *International Journal of Impact Engineering* 77, S. 16–29. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.002.

Wagner, P.; Bruder, T.; van Paepegem, W.; May, M. (2015): Energy based method for numerical fatigue analysis of multidirectional carbon fibre reinforced plastics. In: *Plastics, Rubber and Composites* 43 (3), S. 123–128. DOI: 10.1179/1743289815Y.0000000006.

#### Veröffentlichungen in Monographien, Fachzeitschriften und Proceedings ohne Peer Review

Bagusat, F.; Rohr, I. (2015): The role of the modified Taylor impact test in dynamic material research. In: E. Cadoni, H. Couque und S. Hiermaier (Hg.): *EPJ Web of Conferences. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, Bd. 94. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. Lugano, Switzerland, 7.–11.9.2015. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159401026>.

Bauer, W.; Romberg, O.; Putzar, R. (2014): Experimental verification of an innovative debris detector. In: *Proceedings of the 65<sup>th</sup> International Astronautical Congress*. Toronto, Canada, 23.9–3.10.2014, S. 1–5.

Büttner, M.; Moser, S.; May, M. (2015): Bridging the gap from CT-analysis to predictive finite element modeling. In: *Proceedings NAFEMS World Congress 2015. NAFEMS World Congress 2015*. San Diego, USA, 21.–24.6.2015, S. 1–11.

Cadoni, E.; Couque, H.; Hiermaier, S. (Hg.) (2015): *EPJ Web of Conferences. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. Lugano, Switzerland, 7.–11.9.2015.

Dlugosch, M. (2015): Test facility investment. Crash education. In: *Crashtest Technology International* (September 2015), S. 10–14.

Dlugosch, M.; Fritsch, J.; Lukaszewicz, D.; Hiermaier, S. (2015): New method to analyze numerical crash simulation data to assess the suitability of hybrid composite structures in automotive applications. In: 30. *Proceedings of the*

American Society for Composites. 30. American Society for Composites Technical Conference. East Lansing, Michigan, USA, 28.–30.9.2015 Lancaster, Pa.: DEStech Publications.

Dlugosch, M.; Lukaszewicz, D.; Fritsch, J.; Hiermaier, S. (2015): Mechanical characterization of hybrid material systems consisting of sheet metal and advanced composites. In: *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials. 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials*. Copenhagen, Denmark, 19.–24.7.2015.

Dolak, M. (2015): Erzeugung resonanter Stoßwellen aus transsonischen Strömungen zur Anwendung in fluidischen elektroakustischen Wandlern. Dissertation. Universität der Bundeswehr, Hamburg.

Domse, N.; Weber, M.; Schäfer, F. (2015): Reconfigurable cryptographic subsystem for Cubesats – Implementation of AES-128 on custom designed FPGA platform. In: *Small Satellites for Earth Observation. Digest of the 10<sup>th</sup> International Symposium of the International Academy of Astronautics*. Berlin, 20.–24.4.2015. 1. Auflage. Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag, S. 313–316.

Elies, S.; Ebenhöch, S. (2015): Performance analysis of commercial accelerometers of different technologies. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Sensor Device Technologies and Application – SENSORDEVICES 2015. The Sixth International Conference on Sensor Device Technologies and Application*. Venice, Italy, 23.–28.08.2015, S. 1–6.

Fischer, K.; Häring, I.; Riedel, W. (2015): Risk-based resilience quantification and improvement for urban areas. In: J. Beyerer, A. Meissner und J. Geisler (Hg.): *Security Research Conference. 10<sup>th</sup> Future Security*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 417–424.

Fischer, K.; Klomfass, A.; Riedel, W. (2015): An engineering approach for risk, resilience and vulnerability of urban areas. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference of Design and Analysis of Protective Structures (DAPS). 5<sup>th</sup> International Conference of Design and Analysis of Protective Structures (DAPS)*. Singapore, 19.–21.5.2015, S. 1–10.

Hiermaier, S. (2015): Foreword. In: E. Cadoni, H. Couque und S. Hiermaier (Hg.): *EPJ Web of Conferences. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, Bd. 94. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. Lugano, Switzerland, 7.–11.9.2015. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159400001>.

Hoerth, T.; Schäfer, F. (2016): Asteroid deflection using a kinetic impactor: Insights from hypervelocity impact experiments. In: *Geophysical Research Abstracts* 18, S. EGU2016-18325-1. Online verfügbar unter <http://meeting-organizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-18325-1.pdf>.

Horch, C.; Domse, N.; Schäfer, F.; Buhl, M. (2015): High level software development for a stand-alone data processing and storage unit for a micro-satellite hyperspectral payload. In: *Small Satellites for Earth Observation. Digest of the 10<sup>th</sup> International Symposium of the International Academy of Astronautics*. Berlin, 20.–24.4.2015. 1. Auflage. Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag, S. 207–210.

Horch, C.; Hupfer, J.; Schäfer, F. (2015): Distributed fiber optical sensing inside the foundation slab of a high-rise building. In: *Proceedings SENSOR 2015 // AMA Conferences 2015. SENSOR 2015*. Nürnberg, 19.–21.5.2015. Wunstorf: AMA Service GmbH, S. 531–535.

Kempf, S.; Schäfer, F.; Cardone, T.; Ferreira, I.; Gerene, S.; Destefanis, R.; Grassi, L. (2015): Simplified S/C vulnerability assessments at component level in early design phase at ESA's CDF. In: *Proceedings of the 66<sup>th</sup> International*

Astronautical Congress. 66<sup>th</sup> International Astronautical Congress. Jerusalem, Israel, 12.–16.10.2015, S. 1–12, IAC-15,A6,3,4,x31608.

Kilchert, S.; Nossek, M.; May, M. (2015): Challenges and limitations in measuring the mechanical properties of braided composites. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Mechanical Response. 5<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Mechanical Response. Bristol, UK, 7.–9.9.2015, S. 1–15.

Ledford, N.; Paul, H.; Ganzenmüller, G.; May, M.; Höfemann, M.; Otto, M.; Petrinic, N. (2015): Investigations on specimen design and mounting for Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) experiments. In: E. Cadoni, H. Couque und S. Hiermaier (Hg.): EPJ Web of Conferences. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, Bd. 94. DYMAT 2015 – 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. Lugano, Switzerland, 7.–11.9.2015. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159401049>.

Léost, Y.; Boljen, M. (2014): Crash simulations of electric cars in the EVERS SAFE project. In: 13. LS-DYNA Forum. Bamberg, 6.–8.10.2014. Online verfügbar unter <http://www.dynamore.de/de/download/papers/2014-ls-dyna-forum/documents/crash-ii/crash-simulations-of-electric-cars-in-the-ever-safe-project>.

Léost, Y.; Boljen, M. (2015): Crash simulations of electric cars in the EVERS SAFE Project. In: E. Onate (Hg.): Computational Plasticity XIII : Proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity – Fundamentals and Applications. International Conference on Computational Plasticity. Barcelona, Spain, 1.–3.9.2015, S. 307–318.

Mahdavi Shahri, M.; Ruiz Ripoll, M. L.; Mavrikakis, N.; Zwaag, S. van der; Alderliesten, R. C.; Schut, H. (2015): Exploring the option of fatigue life improvement of aluminium AA2024 via dynamic precipitation in the under-aged state. In: Zwaag, S. van der und Eddy Brinkman (Hg.): Self Healing Materials. Pioneering Research in the Netherlands, S. 79–85.

May, M. (2015): Crash simulation of adhesively bonded structures. In: Proceedings NAFEMS World Congress 2015. NAFEMS World Congress 2015. San Diego, USA, 21.–24.06.2015, S. 1–16.

May, M.; Lässig, T. (2015): Hypervelocity impact simulation on hard ballistic composites. In: Proceedings NAFEMS World Congress 2015. NAFEMS World Congress 2015. San Diego, USA, 21.–24.6.2015, S. 1–15.

Millon, O.; Stolz, A. (2015): Analyse des Widerstandes von Verglasungen bei extremen Belastungen. In: Xia – Intelligente Architektur 92, S. 12–13.

Neugebauer, R.; Jarke, M.; Thoma, K. (Hg.) (2014): Strategie- und Positionspapier Cyber-Sicherheit 2020: Herausforderungen für die IT-Sicherheitsforschung. Fraunhofer-Verbünde Informations- und Kommunikationstechnologie, Verteidigungs- und Sicherheitsforschung. Online verfügbar unter [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-2909216.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2909216.pdf).

Rathjen, S.; Häring, I.; Slotosch, S. (2015): Gestaltung des Wissenstransfers aus Forschungsergebnissen in Lehr-/Lernmaterial. In: J. Besters-Dilger und G. Neuhaus (Hg.): Modulare wissenschaftliche Weiterbildung für heterogene Zielgruppen entwickeln. Formate – Methoden – Herausforderungen. Freiburg: Rombach (Schriftenreihe Freiburger universitäre Weiterbildung), S. 133–144.

Roller, C.; Stolz, A.; Bach, A. (2015): Pre-stressed RC-elements under blast loading - FEA from implicit to hydrocode. In: ANSYS Conference & 33. CADFEM Users' Meeting 2015: Conference Proceedings. ANSYS Conference & 33. CADFEM Users' Meeting 2015. Bremen, 24.–26.6.2015: CADFEM GmbH.

Ruiz Ripoll, M. L.; Millon, O.; Hoerth, T. (2015): Dynamic behavior of brittle geological materials under high strain rates. In: Anales de Mecánica de la Fractura 32, S. 1–6.

Ruiz Ripoll, M. L.; Stolz, A. (2015): Verbundprojekt »Schutz kritischer Brücken und Tunnel« (SKRIBT Plus). Bewertung terroristischer Bedrohungen – Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Schmitt, D.; Ruiz Ripoll, M. L.; Millon, O.; Stolz, A.; Thoma, K. (2016): Damage behaviour of reinforced concrete plates under impact loadings. In: Anales de Mecánica de la Fractura. XXXIII Encuentro del Grupo Español de Fractura. San Sebastián, 9.–11.3.2016, S. 506–511. Online verfügbar unter <http://www.gef2016.es/docs/anales-de-mecanica-de-la-fractura-33.pdf>.

Stolz, A. (Hg.) (2014): A Comparison of Existing Standards for Testing Blast Resistant Glazing and Windows – Thematic Group: Resistance of Structures to Explosion Effects. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Stolz, A. (Hg.) (2014): Numerical Simulations for Classification of Blast Loaded Laminated Glass: Possibilities, Limitations and Recommendations – ERNCIP Thematic Group: Resistance of Structures to Explosion Effects. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Stolz, A.; Millon, O. (Hg.) (2015): Recommendations for the Improvement of Existing European Norms for Testing the Resistance of Windows and Glazed Façades to Explosive Effects – ERNCIP Thematic Group: Resistance of Structures to Explosion Effects. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

# WISSENSCHAFTLICHER AUSTAUSCH, VORTRÄGE

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

- Aurich, H.; Sättler, A.; Holzwarth, A. (2015): Initiation of high explosive charges by fragment impact. DEA 1671 Energetic Materials. Picatinny Arsenal, Picatinny, NJ, USA, 9.6.2015.
- Büttner, M.; Moser, S.; May, M. (2015): Bridging the gap from CT-analysis to predictive finite element modeling. NAFEMS World Congress. San Diego, USA, 24.6.2015.
- Denefeld, V.; Heider, N.; Holzwarth, A. (2015): Experimentelle Bestimmung der Impulsverteilung bei IED-Ansprengungen. 16. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. Meppen, 27.5.2015.
- Denefeld, V.; Heider, N.; Holzwarth, A. (2015): Einfluss von Fahrbahnplatten auf die Fahrzeugbelastung bei IED-Detonation. 17. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. Meppen, 17.11.2015.
- Dlugosch, M. (2015): Gewichtsoptimiertes Design crashrelevanter Fahrzeugstrukturen in Hybridbauweise. CrashMat 2015. Freiburg, 22.4.2015.
- Dlugosch, M.; Fritsch, J.; Lukaszewicz, D.; Hiermaier, S. (2015): New method to analyze numerical crash simulation data to assess the suitability of hybrid composite structures in automotive applications. 30. American Society for Composites Technical Conference. East Lansing, Michigan, USA, 28.9.2015.
- Dlugosch, M.; Lukaszewicz, D.; Fritsch, J.; Hiermaier, S. (2015): Mechanical characterization of hybrid material systems consisting of sheet metal and advanced composites. 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials. Copenhagen, Denmark, 23.7.2015.
- Durr, N. (2015): Exemplarische Hopkinson-Bar- und Planarplattenimpakt-Simulationen in Gestein. CMME-Treffen. Freiburg, 3.2.2015.
- Durr, N.; Matura, P.; Sauer, M. (2015): Material models of HMX and binder. CMME-Treffen. Freiburg, 16.12.2015.
- Durr, N.; Matura, P.; Sauer, M. (2015): Modeling HMX/binder interactions. CMME-Treffen. Freiburg, 16.12.2015.
- Durr, N.; Sauer, M. (2015): Mesoscale modeling of shock waves in rock. MEMIN Biannual Meeting. Hamburg, 26.1.2015.
- Durr, N.; Sauer, M. (2015): Mesoscale modeling of quartzite and sandstone under shock-loading and homogenization to macroscale. Bridging the Gap III: Impact Cratering in Nature, Experiments and Modeling. Freiburg, 21.9.2015.
- Fischer, K.; Häring, I.; Riedel, W. (2015): Risk-based resilience quantification and improvement for urban areas. Future Security, 10<sup>th</sup> Security Research Conference. Berlin, 15.9.2015.
- Fischer, K.; Klomfass, A.; Riedel, W. (2015): An engineering approach for risk, resilience and vulnerability assessment of urban areas. 5<sup>th</sup> International Conference on Design and Analysis of Protective Structures (DAPS). Singapore, 19.5.2015.
- Fischer, K.; Stolz, A.; Ramin, M. von (2015): Deterministic consequence assessment of urban spaces due to blast loading. 16<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS). Sandestin, Florida, USA, 13.11.2015.
- Heider, N.; Steinbrenner, A.; Aurich, H. (2015): Mechanical characterization and modelling of reactive polymeric materials with the SHPB. 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading. Lugano, Switzerland, 7.9.2015.
- Heunoske, D.; Osterholz, J.; Schimmerohn, M.; Schäfer, F.; Wickert, M. (2015): Zeitaufgelöste Emissionsspektroskopie an transienten Plasmen. DPG-Frühjahrstagung. Bochum, 3.3.2015.
- Hoerth, T.; Hupfer, J.; Schäfer, F.; Millon, O.; Wickert, M. (2015): Momentum transfer in hypervelocity impact experiments on rock targets. 13<sup>th</sup> Hypervelocity Impact Symposium. Boulder, Colorado, USA, 26.4.2015.
- Hoerth, T.; Poelchau, M. H.; Kenkmann, T.; Schäfer, F. (2015): Influence of impactor size on momentum multiplication. Bridging the Gap III: Impact Cratering in Nature, Experiments and Modeling. Freiburg, 21.9.2015.
- Kilchert, S.; May, M.; Nossek, M. (2015): Experimentelle und numerische Studie an Konzeptbauteilen aus triaxialem Faserverbundgeflecht. CrashMat 2015, 22.4.2015.
- Kilchert, S.; Nossek, M.; May, M. (2015): Challenges and limitations in measuring the mechanical properties of braided composites. 5<sup>th</sup> Thematic Conference on Mechanical Response of Composites. Bristol, UK, 9.9.2015.
- Kurfiß, M.; Fritsch, J. (2015): Neue Messsysteme für dynamische Crashdiagnostik. CARHS Praxiskonferenz Heckaufprall – Sitze – Whiplash 2015. Bad Wörishofen, 25.11.2015.
- May, M. (2015): Crash simulation of adhesively bonded structures. NAFEMS World Congress. San Diego, USA, 24.6.2015.
- May, M.; Lässig, T. (2015): Hypervelocity impact simulation on hard ballistic composites. NAFEMS World Congress. San Diego, USA, 22.6.2015.
- Moser, S. (2015): X-ray computed tomography (XCT): method and capabilities. Research Seminar Geology WS 2015/2016. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 10.11.2015.
- Niklas, W.; Engelmann, F. (2015): Lasersicherheitsanalysetool, Sachstandsbesprechung. BAAINBw. Koblenz, 11.6.2015.
- Osterholz, J.; Lück, M.; Lexow, B.; Wickert, M. (2015): Neutralisierung von Sprengsätzen mit Hochleistungs-Lasern. 8. Tagung Optik und Optronik in der Wehrtechnik. Hamburg, 21.9.2015.
- Paul, H. (2015): Bewertung von langfaserverstärkten Kunststoff-Metall-Hybridverbunden auf der Basis des Verformungs- und Versagensverhaltens. DGM-Fachausschuss Hybride Werkstoffe und Strukturen. Paderborn, 4.3.2015.
- Paul, H.; Ledford, N.; Ganzenmüller, G.; Wolfrum, J.; Petrinic, N.; May, M. (2015): Investigations of the rate and temperature dependent behavior of carbon fiber reinforced composites with Split Hopkinson Tension Bar (SHTB) Experiments. V ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites. Bristol, UK, 7.9.2015.
- Putzar, R. (2014): EMI's Twin Gun – Concept for a new light-gas gun type hypervelocity accelerator. 65<sup>th</sup> Meeting of the Aeroballistic Range Association. Arcachon, Frankreich, 20.10.2014.
- Putzar, R.; Hildisch, J.; Becker, M. (2015): Hydrogen density measurements in two-stage light-gas guns. 66<sup>th</sup> Meeting of the Aeroballistic Range Association. San Antonio, Texas, USA, 2015.

- Ramin, M. von; Grunwald, C.; Riedel, W.; Stolz, A. (2015): Simulating accidental explosion of cased and stacked sources in storages. 16<sup>th</sup> International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures (SIEMS). Sandestin, Florida, USA, 11.11.2015.
- Riedel, W. (2015): Protection of critical infrastructures. Experimental, numerical and engineer methods. VGB-Arbeitskreis. Kernkraftwerk Forsmark, Schweden, 14.7.2015.
- Riedel, W.; Fischer, K.; Stolz, A.; Häring, I.; Bachmann, M. (2015): Modeling the vulnerability of urban areas to explosion scenarios. 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS3). Newcastle, Australia, 3.2.2015.
- Rinder, T.; Stolz, A.; Horch, C.; Schäfer, F. (2015): Development of time-efficient collapse prognosis software for the protection of critical infrastructure buildings. Critical Infrastructure Protection and Resilience Europe (CIPRE). Den Haag, Netherlands, 2.3.2015.
- Roller, C.; Stolz, A.; Bach, A. (2015): Pre-stressed RC-elements under blast loading - FEA from implicit to hydrocode. ANSYS Conference & 33. CAD-FEM Users' Meeting (ACUM). Bremen, 24.6.2015.
- Roller, C.; Stolz, A.; Fischer, K.; Cleave, R. (2015): Extended applicability of a lightweight retrofit system against varied explosion loads. 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS3). Newcastle, Australia, 3.2.2015.
- Schäfer, J.; Kaufmann, R. (2015): Quantitative mine risk analysis tool and database web application. D-BOX Developments – Stakeholder Workshop and Demonstration of Toolbox v1. Szcztyno, Poland, 21.5.2015.
- Schäfer, J.; Vogelbacher, G. (2015): Software solutions in support of humanitarian demining. Final Demonstration of TIRAMISU Mine Action Tools. Oud-Heverlee, Belgium, 24.9.2015.
- Schäfer, J.; Weissbrodt, J.; Pfeiffer, M.; Radtke, F. (2015): ENCOUNTER quantitative risk analysis tool. Final ENCOUNTER Symposium. Brussels, Belgium, 20.10.2015.
- Schimmerohn, M. (2015): Detection of transient plasma induced by impacts of meteoroids and space debris. 21<sup>st</sup> SPINE Meeting, ESA Headquarters. Paris, France, 18.5.2015.
- Stolz, A.; Fischer, K.; Roller, C.; Hauser, S. (2015): Design and assessment method for innovative ductile concrete elements to resist blast. 3<sup>rd</sup> International Conference on Protective Structures (ICPS3). Newcastle, Australia, 3.2.2015.
- Straßburger, E.; Bauer, S. (2015): Ballistische Bewertung neuer Spinell-Keramiken. 16. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. Meppen, 27.5.2015.
- Straßburger, E.; Bauer, S. (2015): Schutzwirkung transparenter Panzerungen mit erhöhtem Kunststoffanteil gegen P-Ladungs-IEDs. 17. Tagung »Schutz gegen IED und ballistische Bedrohung«. Meppen, 17.11.2015.
- Straßburger, E.; Bauer, S.; Popko, G.; Salk, M. (2015): Simultaneous impact damage visualization and deformation measurement in glass laminates. 2015 MACH Conference. Annapolis, MD, USA, 8.4.2015.
- van Keuk, J.; Sättler, A.; Schmitt, S.; Heiser, R. (2015): EMI Innenballistik-Code SimIB\_V1.0. Deutsches Wehrtechnik-Seminar 2015. Fraunhofer ICT. Pfintzal-Berghausen, 23.6.2015.
- Wickert, M.; Osterholz, J.; Hoschke, K. (2015): Dynamische Lastanforderungen an Werkstoffstrukturen und Bauteile bei 3D-Druck für wehrtechnische Anwendungen. Wehrtechnisches Symposium 3D-Druck in der Bundeswehr, 14.10.2015.

**Seminarvorträge im EMI**

Bagusat, F. (2015): Probenminiaturisierung zur Erweiterung hochdynamischer Untersuchungsmöglichkeiten. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Büttner, M. (2015): Durchblick – Röntgen-CT und ihre Anwendung für die Verteidigungs- und Sicherheitsforschung. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 15.12.2015.

Durr, N. (2015): Mesoskalige Simulation von Quarzit und Sandstein unter dynamischer Belastung. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 20.3.2015.

Ebenhöch, S. (2015): Resilienzmaße zur Optimierung technischer Systeme. 2. Kammingespräch des Leistungszentrums für Nachhaltigkeit Freiburg. EMI Freiburg, 27.7.2015.

Ebenhöch, S.; Mußbach, R.; Grumber, C.; Elies, S.; Stein, J.; Niklas, W. et al. (2015): Entwicklung effizienter Forschungswerkzeuge zur Bewertung der Sicherheit wehrtechnischer Systeme. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Fischer, K. (2015): Statistische Auswertung sicherheitskritischer Ereignisse und deren Anwendung auf urbane Gebiete. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 20.11.2015.

Haase, T. (2015): Untersuchung an einem selbstheilenden Polymer bei konstanten Dehnraten. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 20.11.2015.

Haase, T. (2015): Theorie und Praxis: Zugversuche an einem Polymer bei konstanter Dehnrate. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Haase, T. (2015): Theorie und Praxis: Zugversuche an einem Polymer bei konstanter Dehnrate. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 15.12.2015.

Heine, A. (2015): Charakterisierung und Konditionierung des Verhaltens von SiC-Keramiken für den Schutz gegen WSM-Penetratoren. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Heusinger, V. (2015): Artefakt-Reduktion in der Computer-Tomographie mit wenigen Projektionen. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 22.5.2015.

Hoerth, T. (2015): Untersuchungen zum Meteoritenimpakt auf der Basis von Hypervelocity-Impaktexperimenten. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 22.5.2015.

Hoschke, K. (2015): 3D-Druck für wehrtechnische Anwendungen. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Kisters, T. (2015): Untersuchungen zur Sicherheit moderner Batterien. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Külls, R. (2015): Wissenschaftliche Untersuchungsmethoden für die Entwicklung komplexer Munition. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Lück, M. (2015): Innovative Technologieansätze zur Neutralisierung von Sprengsätzen. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 15.12.2015.

Nau, S. (2016): Mathematische Analyse der Impulssicherung in einer Schärf- und Sicherungsvorrichtung (SAD). EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 15.12.2016.

Paul, H. (2015): Neue Möglichkeiten der Werkstoffcharakterisierung bei hohen Dehnraten. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Putzar, R. (2015): Gasdynamik in zweistufigen Leichtgasbeschleunigern. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 18.9.2015.

Roller, C. (2015): Wirkungsdämpfung bei Unterwasserdetonationen – Phänomene und Einflussfaktoren. Doktorandenseminar EMI. EMI Freiburg, 23.10.2015.

Sättler, A. (2015): SimB – Entwicklung einer nationalen Code-Familie für die Innenballistik. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Schimmerohn, M. (2015): Potenzial von Kleinstsatelliten-Technologien. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 15.12.2015.

Stolz, A. (2015): Schadensklassifizierung von Gebäuden unter Explosionsbelastung. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 15.12.2015.

van Keuk, J.; Sättler, A.; Schmitt, S.; Heiser, R. (2015): SimB – Entwicklung einer nationalen Code-Familie für die Innenballistik. EMI-Symposium Forschung und Technologie. EMI Freiburg, 14.12.2015.

Weidemaier, P. (2015): Zündung von HE durch Stoßwellen. Internes Seminar, EMI Freiburg, 17.11.2015.

**Lehrgänge/Seminarvorträge der Carl-Cranz-Gesellschaft**

Ebenhöch, S. (2015): Überblick funktionale Sicherheit nach IEC 61508 und verwandte Normen und Standards. CCG-Seminar VS 1.53 »Funktionaler Sicherheitsnachweis für wehrtechnische Systeme«. EMI Freiburg, 3.2.2015.

Ebenhöch, S. (2015): Praxisnahe Anwendung von Techniken und Maßnahmen für Entwicklung und Sicherheitsnachweis für Hardware. CCG-Seminar VS 1.53 »Funktionaler Sicherheitsnachweis für wehrtechnische Systeme«. EMI Freiburg, 4.2.2015.

Engelmann, F.; Niklas, W. (2015): Anwendungsbeispiele zur quantitativen Gefährdungs- und Risikoanalyse zur Festlegung von Gesamtsicherheitsanforderungen bzw. SIL-Anforderungen. CCG-Seminar VS 1.53 »Funktionaler Sicherheitsnachweis für wehrtechnische Systeme«. EMI Freiburg, 3.2.2015.

Heiser, R.; van Keuk, J. (2015): US-XNOVA (XKTC)-Code/Gasdynamische Modelle. CCG-Seminar VS 1.54 »Modelle und Rechenmethoden in der Ballistik«. Meppen, 20.4.2015.

Kanat, B. (2015): Methoden zur Gefährdungs- und Risikoanalyse, klassische Systemanalysemethoden, Zuverlässigkeitsvorhersage und Erweiterungen. CCG-Seminar VS 1.53 »Funktionaler Sicherheitsnachweis für wehrtechnische Systeme«. EMI Freiburg, 3.2.2015.

Sättler, A. (2015): Der IBHVG2-Code. CCG-Seminar VS 1.54 »Modelle und Rechenmethoden in der Ballistik«. Meppen, April 2015.

Siebold, U. (2015): Potential der Nutzung semi-formaler Modellierung in der Entwicklung sicherheitsbezogener Systeme. CCG-Seminar VS 1.53 »Funktionaler Sicherheitsnachweis für wehrtechnische Systeme«. EMI Freiburg, 4.2.2015.

Siebold, U. (2015): Praxisnahe Anwendung von Techniken und Maßnahmen für Entwicklung Software und Softwaresicherheit. CCG-Seminar VS 1.53 »Funktionaler Sicherheitsnachweis für wehrtechnische Systeme«. EMI Freiburg, 4.2.2015.

Straßburger, E. (2015): Röntgenblitzkinematografie in der Endballistik. Seminar VS 3.02 »Ballistische Messtechnik und experimentelle Verfahren«. ISL, Saint-Louis, 24.3.2015.

Straßburger, E. (2015): Ballistic properties and protective strength of ceramics for body armor. Seminar VS 2.04 »Effectiveness of Body Armor«. ISL, Saint-Louis, 21.10.2015.

van Keuk, J. (2015): US-Software PRODAS (Projectile Design and Analysis System). CCG-Seminar VS 1.54 »Modelle und Rechenmethoden in der Ballistik«. Meppen, 20.4.2015.

van Keuk, J.; Klomfass, A. (2015): DLR-FLOWer/EMI-HERMES (Aerodynamik/Außenballistik von Geschossen). CCG-Seminar VS 1.54 »Modelle und Rechenmethoden in der Ballistik«. Meppen, 20.4.2015.

van Keuk, J.; Sättler, A.; Schmitt, S.; Heiser, R. (2015): EMI SimIB-Code (Simulation of Interior Ballistics). CCG-Seminar VS 1.54 »Modelle und Rechenmethoden in der Ballistik«. Meppen, 20.4.2015.

#### Lehrgänge des Bildungszentrums der Bundeswehr, Mannheim

van Keuk, J.; Sättler, A.; Schmitt, S.; Heiser, R. (2015): SimIB\_V1.0 – a new lumped parameter code for interior ballistics simulations. DEA 1060. Bildungszentrum der Bundeswehr (BiZBw). Mannheim, 5.5.2015.

#### Vorlesungen

Fischer, K.: Bauteilverhalten unter hochdynamischer Belastung, Bewertung mit Ingenieurmodellen. Ein Vortrag im Rahmen der Vorlesung von Werner Riedel (»Schutz kritischer Infrastruktur«, Hochschule Furtwangen).

Osterholz, J. (Wintersemester 2014/2015): High-Energy-Density Physics. Vorlesung im Masterstudiengang Physik an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Wintersemester 2014/2015.

Riedel, W. (Wintersemester 2014/2015): Schutz kritischer Infrastrukturen. Vorlesung an der Hochschule Furtwangen, Fakultät SSE, Masterstudiengang »Security and Safety Engineering«, Wintersemester 2014/2015.

Sauer, M. (Wintersemester 2015): Numerische Simulationsverfahren. Vorlesung und Laborpraktikum im Master-Modul »Finite Methoden und Stoffgesetze Hochdynamik«, Studiengang Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München, Wintersemester 2015.

Sauer, M. (Wintersemester 2015): Werkstoffcharakterisierung. Vorlesung und Laborpraktikum im Master-Modul »Finite Methoden und Stoffgesetze Hochdynamik« im Studiengang Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München, Wintersemester 2015.

Stolz, A. (Sommersemester 2015): Baudynamik. Vorlesung an der Hochschule Koblenz, Sommersemester 2015.

#### Gastwissenschaftler im EMI

Dr. W. Casey Uhlig, US Army Research Laboratory, USA, 4.8.2014–30.6.2015.

Dr. Matti Isakov, Tampere University of Technology, Finland, 18.1.2016–30.11.2016.

#### Promotionen

Andricevic, N. (2016): Robustheitsbewertung crashbelasteter Fahrzeugstrukturen. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg. Technische Fakultät.

Bach, A. (2015): Stahlbetonteile unter kombinierten statischen und detonativen Belastungen in Experiment, Simulation und Bemessung. Dissertation. Technische Universität, Dresden. Fakultät für Bauingenieurwesen.

Hoerth, T. (2015): Investigations on Meteorite Impact Based on Hypervelocity Impact Experiments on Rock Targets. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg. Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen.

Külls, R. (2015): Systematik eines Beschleunigungssensor-Designkonzepts auf MEMS-Basis. Dissertation. Universität der Bundeswehr, München. Fakultät für Elektro- und Informationstechnik.

Millon, O. (2014): Analyse und Beschreibung des dynamischen Zugtragverhaltens von ultra-hochfestem Beton. Dissertation. Technische Universität, Dresden. Fakultät für Bauingenieurwesen.

Moser, S. (2015): Computertomographie mit stark unterbestimmten Datensätzen für komplexe Anwendungen. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg. Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen.

Schimmerohn, M. (2016): Impaktinduzierte Effekte auf Solargeneratoren im geostationären Orbit. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig. Fakultät für Maschinenbau.

#### Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten

Becker, M. (2015): Bestimmung des Zustandes von Wasserstoffgas in einem Leichtgasbeschleuniger. Bachelorarbeit. Betreuer: Putzar, R. Technische Universität Ilmenau (EMI-Bericht A 01/15).

Focsa, A. (2015): Numerical Analysis on Fluid-Structure Interaction of a Water Tunnel under Blast Load. Masterthesis. Betreuer: Roller, C. Ruhr-Universität Bochum (EMI-Bericht A 37/15).

Schaufelberger, B. (2015): Analysis of Concrete Failure Modes in Nail-Setting Processes – Precision Experiments and Hydrocode Modeling. Masterthesis. Betreuer: Hiermaier, S.; Riedel, W. Universität Stuttgart (EMI-Bericht I-36/15).

Scheld, P. (2015): Erweiterung eines Split-Hopkinson-Tension-Bars zur Materialprüfung von Polymeren. Bachelorarbeit. Betreuerin: Paul, H. DHBW Lörrach (EMI-Bericht A 17/15).

Sonntag, A. (2015): Charakterisierung und Modellierung einer Fahrzeugfelge unter crashrelevanten Belastungen. Bachelorarbeit. Betreuer: Léost, Y.; Boljen, M.; Nahme, H. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (EMI-Bericht A 24/15).

Vijayalakshmi, A. (2016): Fluid Structure Interaction Due to Underwater Explosion in a Steel Tank – Numerical and Experimental Analysis. Masterthesis. Betreuer: Roller, C. FH Aachen (EMI-Bericht A 04/16).

Wagner, L. (2015): Konzeptionierung und Umsetzung eines Hagelprüfstandes. Bachelorarbeit. Betreuer: Schmitt, D. DHBW Lörrach (EMI-Bericht A 21/15).

#### Patente

Haase, T.; Schäfer, F. (2015): Anordnung mit selbstheilender Schutzschicht. Veröffentlichungsnr.: DE 10 2010 047 735 B4.

Krell, A.; Straßburger, E. (2015): (21.04.2015) Transparent composite pane for safety applications FhG-Zeichen: IKTS-11 F52350 WO-US. Anmeldenr.: US 14/236,530. Veröffentlichungsnr.: US 9,012,045 B2.

#### Schriftenreihe des Ernst-Mach-Instituts

Külls, R. (2016): Systematik eines Beschleunigungssensor-Designkonzepts auf MEMS-Basis. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Schriftenreihe Epsilon-Punkt – Forschungsergebnisse aus der Kurzezeitdynamik, 28).

Millon, O. (2015): Analyse und Beschreibung des dynamischen Zugtragverhaltens von ultra-hochfestem Beton. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Schriftenreihe Epsilon-Punkt – Forschungsergebnisse aus der Kurzezeitdynamik, 27).

#### Workshops und Veranstaltungen

Erste EMI-Doktoranden Summer School 2015. EMI Freiburg.

2<sup>nd</sup> CompMethGlass Project Meeting (2015). EMI Freiburg, 23.9.2015.

#### Mitwirkung in Fachgremien, Fachverbänden und Programmkomitees

Aurich, H.:  
Mitglied Arbeitsgruppe »Initiierung von Sprengstoffen«.

Heine, A.:  
Student Award Committee, International Ballistics Society.

Hiermaier, S.:  
Member Governing Board, European Association for the Promotion of Research into the Dynamic Behaviour of Materials and its Applications (DYMAT).

Mitglied im Programmkomitee 10<sup>th</sup> Future Security Research Conference Berlin, 15.–17.9.2015.

Leismann, T.:  
Mitglied im Programmkomitee 10<sup>th</sup> Future Security Research Conference Berlin, 15.–17.9.2015.

Putzar, R.:  
Chairman Elect der Aeroballistics Range Association (ARA).

Repräsentant des Ernst-Mach-Instituts in der Aeroballistic Range Association (ARA), 2015.

Secretary der Aeroballistics Range Association (ARA), 2015.

Ramin, M. von:  
Klotz Group.

Mitglied beim American Concrete Institute (ACI).

Mitglied beim Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb).

Riedel, W.:  
Advisory Board Member. International Conference on Structural Safety under Fire & Blast (CONFAB). Glasgow.

VGB-Arbeitskreis Anlagensicherung.

Sättler, A.:  
Leitung der Taskforce Innenballistik-Simulation.

Mitglied im Arbeitskreis Innenballistik.

Mitglied in der Arbeitsgruppe Initiierung.

Stolz, A.:  
Coordinator Thematic Area: »Resistance of structures to explosion effects«. European Reference Network for Critical Infrastructure Protection ERNCIP.

Mitglied der Characterisation of Explosive Weapons Expert Group of the Geneva International Centre for Humanitarian Demining.

Repräsentant des EMI in der Internationalen Tunneling Association. Committee on Operational Safety of Underground Facilities ITA COSUF.

Thoma, K.:  
Group of Personalities on the Preparatory Action for CSDP-related Research, Sherpa of R. Neugebauer, President of the Fraunhofer-Gesellschaft.

Wickert, M.:  
Member of the Board of Directors International Ballistics Society.



# BILDQUELLEN

Seite 33, Abbildung 1:

The research leading to these results has received funding from the European Commission's Seventh Framework Programme (FP7/2007–2013) under Grant Agreement No 285505.

Seite 114:

MEV Verlag GmbH.



# IMPRESSUM

## **Redaktion**

Birgit Bindnagel, Tobias Leismann, Stefan Hiermaier

## **Redaktionelle Mitarbeit**

Heide Haasdonk, Johanna Holz, Nicole Packhaeuser

## **Layout und grafische Bearbeitung**

Sonja Weber

## **Bildredaktion**

Birgit Bindnagel, Sonja Weber

## **Redaktionsanschrift**

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Presse und Öffentlichkeitsarbeit  
Eckerstraße 4  
79104 Freiburg  
Telefon 0761 2714-366  
birgit.bindnagel@emi.fraunhofer.de  
www.emi.fraunhofer.de

© Fraunhofer EMI, Freiburg 2016

## **Druck**

Simon Druck GmbH & Co.  
Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier.

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,  
Ernst-Mach-Institut, EMI  
Eckerstraße 4  
79104 Freiburg  
Telefon +49 761 2714-0  
[info@emi.fraunhofer.de](mailto:info@emi.fraunhofer.de)  
[www.emi.fraunhofer.de](http://www.emi.fraunhofer.de)

Standorte  
Freiburg, Efringen-Kirchen und Kandern