

Verkehr

Nachhaltigkeit

Luftfahrt

Raumfahrt

Sicherheit

Verteidigung

JAHRESBERICHT

2014/15

JAHRESBERICHT 2014/15

»STABÜBERGABE UND NEUE CHANCEN«



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

Liebe Leserinnen und Leser,

Stabübergabe und ganz neue Chancen im universitären Umfeld – diese beiden Themen prägten den Jahreswechsel 2014/2015 im EMI. Die eine Hälfte bezeichnet das Ende einer Ära, die man nur nach dem Institutsleiter benennen kann, der das Institut seit 1996 geleitet hat, der Ära Thoma. Sie war gekennzeichnet durch die Entwicklung eines faktisch rein wehrtechnisch aufgestellten Instituts hin zu einem Fraunhofer-Institut mit den vier Geschäftsfeldern Verteidigung, Raumfahrt, Verkehr und Sicherheit. In allen vier Bereichen hat es sich seither national und international hervorragende Reputation erworben. Eine Zeitspanne, in welcher der Finanzierungsmix, die strategische Ausrichtung, die wissenschaftliche Exzellenz und die Infrastruktur auf Fraunhofer-Niveau entwickelt wurden. Klaus Thoma hat dies mit Weitblick, Engagement, Hartnäckigkeit und einem guten Bauchgefühl möglich gemacht. Als sein Wegbegleiter und langjähriger Stellvertreter war ich Augenzeuge dieser Entwicklung und zolle Klaus Thoma größten Respekt. Dass das gesamte Institut dieser Auffassung ist, konnten wir bei der internen Verabschiedung anlässlich der Weihnachtsfeier 2014 wie auch beim wissenschaftlichen Festkolloquium Anfang März 2015 eindrucksvoll erleben.

Schon einen Tag nach dem Abschieds-Kolloquium für Klaus Thoma wurde ein Zeichen mit Symbolcharakter für die neue Zeit gesetzt: Die feierliche Eröffnung des Leistungszentrums Nachhaltigkeit im Beisein von Fraunhofer-Präsident Reimund Neugebauer, dem Rektor der Universität Freiburg Hans-Jochen Schiewer, Freiburgs Oberbürgermeister Dieter Salomon und vielen Persönlichkeiten aus Politik und Gesellschaft. Die völlig neue Qualität in der Zusammenarbeit zwischen der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und der Fraunhofer-Gesellschaft ließe sich kaum treffender in ein Bild fassen.

Eine wesentliche Komponente in diesem Bild nimmt das künftige dritte Institut der Technischen Fakultät ein.

Das Institut für »Sustainable Systems Engineering« (ISSE) mit geplanten 14 Professuren wird zu gleichen Teilen von Universität und Fraunhofer getragen. Das Ernst-Mach-Institut erhält durch die Professur für Nachhaltige Ingenieursysteme endlich eine vollwertige universitäre Anbindung. Diese befindet sich in räumlicher Nähe, ist eingebettet in eine hervorragend aufgestellte Fakultät und bietet die einmalige Gelegenheit, sich neue Themenfelder zu erschließen, ohne dabei auf Kontinuität verzichten zu müssen. Die neuen Forschungsfelder lassen sich lückenlos als Weiterentwicklung existierender verwirklichen. Dies gilt für die Nachhaltigkeit von Werkstoffen und daraus entstehenden Ingenieursystemen genauso wie für die Resilienzforschung.

Ein fachlicher Schwerpunkt meiner Professur liegt in der Nutzung integrierter experimentell-numerischer Methoden zur Entwicklung und Optimierung von Werkstoffen und Strukturen unter ganzheitlicher Berücksichtigung der Nachhaltigkeit des resultierenden Produkts. Die ressourcenschonende Auswahl von Werkstoffen steht dabei am Anfang der Betrachtung. Sie setzt sich fort in der Identifikation effizienter Prozesse zur Verarbeitung der Werkstoffe. Die Nutzungsphase der Produkte definiert sowohl die Auswahl als auch die Prozesskette. An ihrem Ende steht der Recyclingprozess, der zum einen zusätzliche Nebenbedingungen an Auswahl und Verarbeitung stellt und zum anderen den Beginn der nächsten Nutzungsschleife mit den recycelten Werkstoffen markiert.

Zum Thema Resilienz werden Anlagen und Netzwerke im Fokus der Forschung stehen, die von hoher Relevanz für das Funktionieren unserer Gesellschaft sind. Versorgungseinrichtungen, bauliche Infrastruktur oder technische Anlagen, deren Leistung wichtig für die Aufrechterhaltung unseres täglichen Lebens sind, werden auf katastrophale Einwirkungen – seien sie naturbedingt oder menschengemacht – hinsichtlich ihrer Regenerationsfähigkeit untersucht. Ziel der Resilienzforschung ist es, die ursprüngliche Performance solcher Systeme durch kluge Vorbereitung,



Bereitstellung eines effizienten Katastrophenmanagements und der Ermöglichung schnellen Wiederaufbaus in kurzer Zeit wieder zu erlangen.

Am 1. Januar 2015 habe ich ein gut aufgestelltes Institut übernommen, dessen Erfolg der Verdienst aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und aller Förderer und Auftraggeber aus Wirtschaft und Politik ist. Bei Ihnen allen möchte ich mich herzlich für Ihr Engagement, Ihre Motivation und Ihren Einsatz bedanken. Ich freue mich auf alle Herausforderungen, die uns die Zukunft bringen wird. Wir werden gemeinsam unsere bisherigen Stärken pflegen und gezielt weiter entwickeln, und wir werden ebenso gemeinsam die neuen Chancen nutzen und daraus weitere Stärken erwachsen lassen.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen. Lassen Sie sich inspirieren von der Begeisterung für unsere einmaligen Forschungsergebnisse, für spannende Netzwerke und eine Zeit voller neuer Chancen.

Ihr

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'S. Hiermaier'. The signature is stylized with a large, sweeping initial 'S'.

Stefan Hiermaier

»MIT SICHERHEIT DYNAMISCH«

Die Ära Thoma

Am 5. März 2015 fand im Konzerthaus Freiburg ein Festkolloquium zu Ehren von Professor Klaus Thoma statt, in dessen Rahmen ihm für seine außerordentlich erfolgreiche Arbeit als Institutsleiter des Fraunhofer EMI von vielen Seiten Lob und Ehre zuteilwurde.

Allen voran dankte ihm Präsident Reimund Neugebauer und würdigte das Werk von Professor Thoma mit der Fraunhofer-Münze, der zweithöchsten Auszeichnung, die Fraunhofer zu vergeben hat.

Laudatoren aus Forschung, Politik und Industrie sprachen über seine beachtlichen Erfolge, er habe in seiner achtzehnjährigen Zeit als Leiter des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeiddynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI wahrlich eine Ära geprägt. In seine Zeit als verantwortlicher Leiter für die personelle und wissenschaftliche Entwicklung und die ausgewogene Finanzierung des Instituts nach Fraunhofer-Modell fielen die wesentlichen Maßnahmen und Entwicklungen, die das EMI heute auszeichnen.

Voraussetzung dafür waren grundlegende Umstrukturierungen eines Instituts, das zu Beginn der Ära Thoma seine Forschungsaktivitäten noch ausschließlich nach dem jeweils aktuellen Bedarf des Bundesministeriums der Verteidigung organisierte. So kennzeichnete die Vorträge von Prof. Thoma nicht von Ungefähr über zehn Jahre lang immer wieder der Titel »Das EMI – Ein Institut im Umbruch«.

Noch in der Einleitung zum sogenannten »Tätigkeitsbericht des Ernst-Mach-Instituts« aus dem Jahr 1995 war zum Thema »Weitere Entwicklung des Instituts« zu lesen:

»Die Planungen zur Entwicklung des Ernst-Mach-Instituts waren in den letzten Jahren durch die Absicht des Bundesministeriums der Verteidigung geprägt, das Institut mittelfristig in das Deutsch-Französische Forschungsinstitut ISL einzugliedern. Aufgrund der derzeitigen politischen Gegebenheiten und organisatorischer Schwierigkeiten ist diese Absicht nunmehr zurückgestellt worden.«

Diese Diskussion über eine Eingliederung des EMI in das ISL war mit Übernahme der Institutsleitung durch Prof. Thoma zum 1. Mai 1996 beendet. Eine Phase der Ungewissheit, die für das Institut und insbesondere für seine Mitarbeiter bedrückend wirkte, war damit überwunden.

Beherrscht ging Prof. Thoma daran, das Themenspektrum auf zivile, vor allem für die Automobilindustrie interessante Forschung zu erweitern. Nach und nach erwuchsen aus den Vorstellungen des neuen Direktors zusammen mit dem vorhandenen Potenzial hinsichtlich Personal und Infrastruktur neue Forschungsgebiete im EMI. Besonders nennenswerte Beispiele dafür sind

- Die Charakterisierung von Werkstoffen unter impakt- und crashrelevanten Lasten
- Die Entwicklung netzfreier Methoden sowie ihre Kopplung an finite Elemente

Foto 1: Frau Barbara Thoma (rechts) mit dem ehemaligen Fraunhofer-Präsidenten Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger und dessen Ehefrau; **Foto 2:** Prof. Dr. Klaus Thoma und Barbara Thoma begrüßen Dr. Karsten Michael; **Foto 3:** Prof. Dr. Klaus Thoma mit Prof. Dr. Ulrich Buller; **Foto 5:** Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger, ehemaliger Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft mit Ehefrau, Harald Stein, Präsident des Bundesamts für Ausrüstung, Informationstechnik, und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) Guido Rebstock, Ministerialdirektor im Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg und Dr. Dieter Salomon Oberbürgermeister der Stadt Freiburg i. Br. (von links); **Foto 6:** Prof. Dr. Hans-Jochen Schiewer, Rektor der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, hält seine Laudatio.

WISSENSCHAFTLICHES FESTKOLLOQUIUM ZUR VERABSCHIEDUNG
VON PROF. DR. RER. NAT. KLAUS THOMA, 5. MÄRZ 2015



WISSENSCHAFTLICHES FESTKOLLOQUIUM ZUR VERABSCHIEDUNG
VON PROF. DR. RER. NAT. KLAUS THOMA, 5. MÄRZ 2015



- Die Entwicklung von Sensoren zur Beschleunigungsmessung unter extrem dynamischen Belastungen, wie sie beim Hochgeschwindigkeitsimpakt auf harte Ziele auftreten
- Die Entwicklung einer Röntgen-Tomo-Kinematographie zur dreidimensionalen zeitlich aufgelösten Untersuchung extrem dynamischer Prozesse
- Die Ausweitung der Untersuchung von Schäden in Raumfahrzeugen nach Hypervelocity-Impakt auf die resultierende Dynamik der Gesamtstruktur
- Die Erforschung neuer Konzepte zur abstandsaktiven und elektrischen Panzerung
- Die Entwicklung von Werkstoffen zum baulichen Schutz gegen Blastbelastung unter Verwendung bio-basierter Materialien
- Die Entwicklung von Methoden der quantitativen Risiko- und Gefährdungsanalyse
- Das Forschungsgebiet der Sicherheitstechnologie.

Das Thema »Sicherheitstechnologie« machte er dabei nicht nur zu einem neuen Geschäftsfeld des Ernst-Mach-Instituts. Vielmehr ist die heutige nationale und internationale Forschungslandschaft zu Themen der Resilienz und Sicherheitstechnologie aufs Engste mit dem Namen Thoma verbunden. Klaus Thoma entwickelte dieses Thema, insbesondere hinsichtlich seiner ingenieurwissenschaftlichen Ausprägung, sowohl durch seinen unermüdlichen Einsatz in Gremien als auch in der Durchführung vielfältigster Forschungsprojekte und Kooperationen. Dabei, und das zeichnet Prof. Thoma in allen seinen Sprecherfunktionen aus, dachte und handelte er immer im Interesse aller Mitstreiter. Nur so konnte das Thema Sicherheitsforschung seine Position als eigenständiger Verbund in der Fraunhofer-Gesellschaft und seine heutige Ausprägung in der nationalen und internationalen Forschungslandschaft finden.

Zuhause am EMI begleitete eine kontinuierliche Neugliederung der Abteilungsstruktur die Umsetzung von Klaus Thomas Zielen auf organisatorischem Gebiet. Die früheren Abteilungen »Antriebsvorgänge« und »Detonik« fusionierten in der neuen Abteilung »Experimentelle Ballistik«. Die Entwicklung von neuen hoch-beschleunigungsfesten Sensoren sowie von neuer Röntgen-Blitz-Instrumentierung ließ sich damit näher an die Anwendung bringen. Außerdem entstanden die neuen Abteilungen »Werkstoffcharakterisierung und Numerische Simulation« sowie die »Mikrostrukturdynamik«. Beide Bereiche beschäftigten sich sowohl mit der experimentellen Charakterisierung beliebiger Werkstoffe unter dynamischen Lasten als auch mit der Formulierung entsprechender konstitutiver Modelle sowie der Entwicklung und Anwendung numerischer Methoden.

Die neuen Forschungsgebiete in der Ära Thoma verlangten neben kontinuierlichen Anpassungen der Infrastruktur auch nach entsprechenden baulichen Maßnahmen am Institut. An allen drei Institutsstandorten fanden seit 1996 umfangreiche bauliche Erweiterungen statt. Großzügige Labors zur Werkstoffprüfung konnten entstehen. Die Rechnerkapazität wurde kontinuierlich erweitert auf über 1000 Prozessoren in einem zentralen, Linux-basierten Hochgeschwindigkeits-Server.

Das Spektrum der Beschleunigungsanlagen reicht inzwischen von der zweistufigen Leichtgaskanone für die Raumfahrt bis zur Gesamtfahrzeug-Crashanlage. Neugebaute Hallen nahmen zwei neue, große Leichtgaskanonen auf, die über eine Beschleunigungsleistung verfügen, wie sie sonst nur noch in den USA existiert. Mit Fug und Recht kann man das Spektrum der nun verfügbaren Beschleunigungsanlagen sowie ihre Instrumentierung im EMI als weltweit einzigartig bezeichnen!

Foto 7: Die Mitwirkenden am EMI-Science-Slam; **Foto 8:** Das Publikum klatscht voller Begeisterung; **Foto 9:** Fraunhofer-Präsident Prof. Dr. Reimund Neugebauer überreicht Prof. Dr. Klaus Thoma die Fraunhofer-Münze; **Foto 10:** Fotos aus der Ära Thoma erinnerten an kleine und große Ereignisse; **Foto 11:** Prof. Dr. Wolf Uwe Reimold vom Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, bei seiner Dinner-Speech; **Foto 12:** Eine große Überraschung war ein Präsent, für das die Freiburger Werkstatt keine Mühe gescheut hat: Eine Miniaturausgabe der Doktorhüte, die im Foyer des EMI im Original stehen.

INHALTSVERZEICHNIS

Ernst-Mach-Institut

Das Institut im Profil	13
Ansprechpartner	14
Standorte.....	16
Kuratorium	18
Das Institut in Zahlen	20
Der Namenspatron Ernst Mach	23
Die Fraunhofer-Gesellschaft	25

Forschung 2014/15

Impaktphysik	29
Experimentelle Ballistik	53
Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz	73
Mikrostrukturdynamik.....	89
Werkstoffdynamik	101

Wissenschaftliches Netzwerk 2014/15

Verbünde, Allianzen und Kooperationen	115
Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg	117
Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS	123
Fraunhofer-Verbund Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS.....	124
Resilien-Tech: Kooperationsprojekt mit der acatech zur Entwicklung strategischer Zukunftsthemen im Bereich resilienter Infrastrukturen.....	127
Spitzencluster Elektromobilität Süd-West.....	129
Clean Sky.....	131
Weiterbildungsangebot »Sicherheitssystemtechnik«	133

Aktivitäten und Publikationen 2014/15

Highlights	135
Namen, Daten, Ereignisse	142
Publikationen.....	162
Wissenschaftlicher Austausch	165
Bildquellen.....	171
Impressum	173

2014/15 IM ÜBERBLICK:
ERNST-MACH-INSTITUT

DAS INSTITUT IM PROFIL



Das Fraunhofer-Institut für Kurzzeiddynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, befasst sich mit der Physik schnell ablaufender, transienter Prozesse, um daraus Lösungen für industrielle Anwendungen abzuleiten. Das EMI behandelt werkstoffübergreifend Crash-, Impakt- und Stoßwellenphänomene in Experiment und Simulation. Das Spektrum der Anwendungen umfasst

- die Prüfung und Modellierung des Werkstoffverhaltens unter dynamischen Lasten,
- die Entwicklung und Anwendung neuer Sensoren und Messtechniken im Bereich der Kurzzeitphysik,
- die Entwicklung von numerischen Berechnungsverfahren im Bereich der Strukturdynamik, Strömungsmechanik und der Kopplung des Fluid-Struktur-Verhaltens,
- die Entwicklung und Nutzung von Beschleunigungsanlagen, in denen Objekte mit Massen zwischen wenigen Gramm und einigen hundert Kilogramm Geschwindigkeiten von bis zu 40 000 Kilometern pro Stunde erreichen können.

Die am EMI mit experimentellen, computergestützten und analytischen Methoden erarbeiteten Lösungen verbessern die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauteilen und Strukturen unter dynamischen Belastungen. Durch die Nutzbarmachung neuester Forschungsergebnisse für technische Anwendungen wird deren Wirtschaftlichkeit gesteigert. Für die Gesellschaft erwachsen daraus optimierte Systeme in den Bereichen Verteidigung, Sicherheit, Raumfahrt, Verkehr, Luftfahrt und Nachhaltigkeit.

Integration in die akademische Forschungslandschaft sowie Vernetzung und kompetentes Auftreten in den Entwicklungsabteilungen der relevanten Industrie sind Voraussetzungen, um die für Fraunhofer-Institute übliche angewandte Forschung wirtschaftlich betreiben zu können.

Positioniert an der Nahtstelle zwischen Grundlagenforschung und Systementwicklung kommt im EMI der integrierten experimentell-numerischen Forschung besondere Bedeutung zu. Sowohl national als international zählt das Institut hier zu den ersten Adressen.

Das breite Spektrum an dynamischen Prozessen, das am EMI untersucht wird, verlangt ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich der experimentellen Anlagen und der verwendeten Software. Dieses ist nur zu erzielen, wenn hausinterne Entwicklungen von Prüfanlagen, Instrumentierungen, Sensoren und Computerprogrammen möglich sind. Erfahrene Senior-Scientists, Doktoranden, eigene Werkstätten sowie ein hoher Anteil an technischem Personal ermöglichen diese Eigenentwicklungen.

ANSPRECHPARTNER



Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier

Telefon 0761 2714-101

stefan.hiermaier@emi.fraunhofer.de



Referentin des Institutsleiters

Sarah Gnädinger

Telefon 0761 2714-100

sarah.gnaedinger@emi.fraunhofer.de



Stellvertretender Institutsleiter

Geschäftsfeld Sicherheit

Strategie und Kommunikation

Dr. Tobias Leismann

Telefon 0761 2714-102

tobias.leismann@emi.fraunhofer.de



Stellvertretender Institutsleiter

Geschäftsfeld Raumfahrt

Systemlösungen

Prof. Dr. Frank Schäfer

Telefon 0761 2714-421

frank.schaefer@emi.fraunhofer.de



Geschäftsfeld Verkehr

Werkstoffdynamik

Dr. Jens Fritsch

Telefon 0761 2714-472

jens.fritsch@emi.fraunhofer.de



Geschäftsfeld Verteidigung

Dr. Manfred Salk

Telefon 0761 2714-120

manfred.salk@emi.fraunhofer.de



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



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



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



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



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



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



Wissenschaftskommunikation
Brigitta Soergel
Telefon 0761 2714-362
brigitta.soergel@emi.fraunhofer.de



Verwaltungsleitung
Marcus Iwaszkiewicz
Telefon 0761 2714-353
marcus.iwaszkiewicz@emi.fraunhofer.de

STANDORTE



Institutsteil Freiburg

Eckerstraße 4
79104 Freiburg
Telefon 0761 2714-0



Institutsteil Efringen-Kirchen

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



Institutsteil Kandern

Am Christianswuh 2
79400 Kandern
Telefon 07626 9157-0

Drei Standorte

Die mehr als 300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Ernst-Mach-Instituts arbeiten an den drei Standorten Freiburg, Efringen-Kirchen und Kandern.

Freiburg

Sehr nahe an Freiburgs Stadtzentrum arbeiten hier Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Verwaltung, in der feinmechanischen Werkstatt, dem Elektronik-Labor, den Prüflabors und wissenschaftlichen Abteilungen. In Freiburg steht die Space-Gun, der schnellste Beschleuniger des Fraunhofer EMI, an dem derzeit die Versuche zur Abwehr von Meteoriten durchgeführt werden.

Efringen-Kirchen

Am Institutsteil Efringen-Kirchen forschen Bauingenieure und Wissenschaftler unter anderem an Fragen zu baulichem Schutz und Sicherheitstechnologien. Auf dem großen Institutsgelände steht das EMI-Stoßrohr, die größte Versuchsanlage des Instituts.

Das EMI-Crashzentrum mit der Gesamtfahrzeug-Crashanlage und der Komponenten-Crashanlage ist ebenfalls hier beheimatet.

Kandern

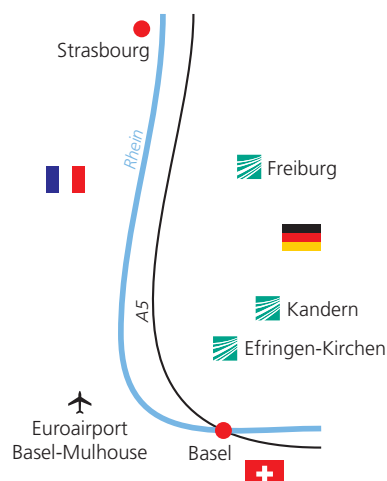
Am Standort Kandern befindet sich unter anderem der größte Leichtgasbeschleuniger des Instituts mit zahlreichen Labors und Versuchseinrichtungen zur Bearbeitung von Aufgabenstellungen aus dem Verteidigungsbereich. Hier können an einem speziellen Prüfstand geladene Batterien für Elektrofahrzeuge untersucht werden.

Die Entfernung zwischen den Institutsteilen beträgt:

Freiburg – Efringen-Kirchen 62 Kilometer

Freiburg – Kandern 59 Kilometer

Efringen-Kirchen – Kandern 15 Kilometer



KURATORIUM



Das Kuratorium des Ernst-Mach-Instituts bei seiner Sitzung im Juni 2014.

Von links nach rechts: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken, Dr. Rolf Wirtz, Brigadegeneral Erich Könen, Dr. rer. pol. Hans-Ulrich Wiese, Prof. Dr. Wolf Uwe Reimold, Patrick Hoyer, Dr. Gerhard Schwehm, Dr. Herbert Scholles, MinR'in Dr. rer. pol. Ehrentraud Graw, Prof. Dr. Rodolfo Schöneburg, Dr.-Ing. Michael Holzner, Thomas Homberg, Prof. Dr. Klaus Thoma, Dr. Rainer Kroth, MinR Wolfgang Förster, Armin Papperger und MinR Dipl.-Ing. Norbert Michael Weber.

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'in 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, Bundes-
ministerium für Bildung und Forschung, Bonn

Brigadegeneral Erich Könen
Abteilungsleiter Kampf, Bundesamt für Ausrüstung,
Informationstechnologie und Nutzung der Bundeswehr,
Koblenz

Dr. Rainer Kroth
Geschäftsführer, Diehl BGT Defence GmbH & Co.KG,
Überlingen

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

Armin Papperger (Vorsitz)
Vorstandsvorsitzender Rheinmetall AG, Düsseldorf

Prof. Dr. Wolf Uwe Reimold
Professor für Mineralogie und Petrographie, 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,
Daimler AG, Functions 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. rer. pol. Hans-Ulrich Wiese
Ehemaliger Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft,
Gräfelfing

Dr. Rolf Wirtz
Senior Vice President, Head of Sensors & Electronic
Warfare, Avionics, Airbus Defence and Space GmbH,
Ulm

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

Personalstruktur

Im Berichtsjahr waren insgesamt über 315 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Fraunhofer EMI beschäftigt. Dies entspricht einer Steigerung zum Stand des Vorjahrs. Die Zahl der festangestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter betrug durchschnittlich 240 Personen. Der Anteil an Hochschulabsolventen (Wissenschaftlern und Ingenieuren), welche direkt in der Forschung tätig waren, belief sich bei den festangestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Jahresmittel auf 60 Prozent.

Im Jahr 2014 waren 29 Auszubildende am EMI beschäftigt. Das entspricht einem Anteil von 12 Prozent, bezogen auf die Gesamtzahl der festangestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die Anzahl der Auszubildenden soll auch weiterhin konstant hoch bleiben. Die schwierige Situation auf dem Arbeitsmarkt hat zur Folge, dass nicht alle offenen Stellen besetzt werden konnten. Im Jahresmittel waren bis zu zehn Stellen am Institut unbesetzt. Insbesondere der Ingenieurmangel in Deutschland macht die Personalakquise in diesem Bereich schwierig und langwierig. Die Fraunhofer-Gesellschaft intensiviert deshalb ihre Aktivitäten im Bereich Personalmarketing, um auch in Zukunft qualifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gewinnen zu können.

Betriebs- und Investitionshaushalt

Die finanzielle Entwicklung des EMI ist in nebenstehender Abbildung dargestellt. Der Betriebshaushalt des EMI hat im Jahr 2014 22,18 Millionen Euro betragen. Der Investitionshaushalt für Gerätebeschaffungen beläuft sich auf 2,97 Millionen Euro. Dies ergibt ein finanzielles Gesamtvolumen von 25,15 Millionen Euro im Berichtsjahr. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass die Entwicklung der Erträge weiterhin erfolgreich verläuft. Insgesamt wird deutlich, dass trotz der angespannten Lage der öffentlichen Haushalte die positive finanzielle Entwicklung des Instituts nachhaltig anhält.

Finanzielle Entwicklung des EMI

	2010	2011	2012	2013	2014
In Mio. €					
Personalaufwand	12,29	12,45	13,65	14,86	15,87
Sachaufwand	7,05	4,75	4,89	5,64	6,31
Investitionsaufwand	2,92	3,01	4,09	2,95	2,97
Gesamt	22,26	20,21	22,63	23,45	25,15

Baumaßnahmen

Am Institutsteil Efringen-Kirchen wurde die Aufstockung eines bestehenden Laborgebäudes zur Schaffung von ca. 20 neuen Büroarbeitsplätzen abgeschlossen. Im Rahmen der Sanierung des Institutsstandorts Efringen-Kirchen wurde die Schaffung einer größeren Frei- bzw. Betriebsfläche um ein bestehendes Laborgebäude abgeschlossen. Gleichzeitig wurde mit der Sanierung dieses Laborgebäudes begonnen. Weiterhin wurde die Planung für ein Lager (Infrastruktur) abgeschlossen und ein entsprechender Bauantrag gestellt.

Am Standort Kändern wurde die Planung für eine Freiflugganlage abgeschlossen und eine entsprechende Baugenehmigung eingeholt.

Am Standort Freiburg wurde die Planung zur baulichen Erweiterung des bestehenden Institutsgebäudes um ein 4/5-geschossiges Büro-/Laborgebäude mit Tiefgarage in der Albertstr. 26-30 mit einer Hauptnutzfläche von ca. 1300 m² weitgehend abgeschlossen. Nachdem nun der neue Bebauungsplan für das Quartier rechtskräftig ist, konnte ein entsprechender Bauantrag beim Baurechtsamt der Stadt Freiburg gestellt werden.



Verwaltungsleitung

Marcus Iwaszkiewicz

Telefon 0761 2714-353

marcus.iwaszkiewicz@emi.fraunhofer.de

NAMENSPATRON
ERNST MACH 1838–1916



Professor Ernst Mach, der 1838 geboren wurde, kann zu Recht als »Multitalent« bezeichnet werden. Der Österreicher war ein bedeutender Forscher in vielen Wissenschaftszweigen: Philosophie, Psychologie, Wissenschaftstheorie und insbesondere die Physik gehörten zu Machs Arbeitsfeldern. Durch seine Kritik an Newton und der rein mechanistischen Sicht auf die Physik gilt Mach als einer der Vordenker der Einstein'schen Relativitätstheorie.

Ernst Machs physikalische Forschungen konzentrierten sich auf die Gebiete der Optik, Akustik, Gasdynamik und Ballistik. Nachdem er durch den Beweis des Dopplereffekts auf sich aufmerksam gemacht hatte, wandte er sich dem Phänomen der Stoßwellen zu. Mach erkannte als Erster die Natur der Stoßwellen und ihr Verhalten in der Luft. Er untersuchte, wie Stoßwellen von Begrenzungen oder anderen Stoßwellen reflektiert werden, und entdeckte so ihr irreguläres Reflexionsmuster.

Mach beschäftigte sich besonders mit Überschallphänomenen, beispielsweise warum man beim Feuern eines Überschallgeschosses zwei Mal einen Knall hören kann. Er fand heraus, dass diesem und anderen Phänomenen das Verhalten von Stoßwellen bei Überschallgeschwindigkeit zugrunde liegt. Um seine Verdienste in diesem Forschungsgebiet zu würdigen, wurde die »Machzahl« nach ihm benannt.

Ausgehend von seinen Grundlagenuntersuchungen wandte sich Ernst Mach ballistischen Versuchen zu und erforschte, welche Stoßwellen von Projektilen verursacht werden. Mach gelang es als Erstem, ein mit hoher Geschwindigkeit fliegendes Geschoss zu fotografieren. Dies war der Beginn der Forschung zur Überschallaerodynamik. Professor Mach verfeinerte diese Aufnahmetechniken erheblich, obwohl ihm nur einfache Mittel zur Verfügung standen. Mit erfin-

dungsreichen Versuchsaufbauten entwickelte er moderne Messmethoden im kurzzeitdynamischen Bereich.

Dieser Erfindungsgeist ist am Fraunhofer EMI immer noch lebendig. In Freiburg, Efringen-Kirchen und Kändern wenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Forschungsmethoden, die von Ernst Mach entwickelt wurden, auf neue Bereiche an. Die technischen Mittel, die ihnen bei ihrer Arbeit zur Verfügung stehen, haben sich immens verbessert. Statt Schlierenfotografie können sie modernste Hochgeschwindigkeitskameras, Leichtgasbeschleuniger, leistungsfähige Computer und eine Gesamtfahrzeug-Crashanlage nutzen.

Auf der Grundlage von Machs Untersuchungen zu Stoßwellen hat sich ein breites Forschungsfeld entwickelt. In den ersten Jahren des EMI konzentrierten sich die Wissenschaftler besonders auf die Weiterführung von Machs Untersuchungen zu Stoßwellen. Neben dem Feld der Gasdynamik wurde erforscht, wie sich Stoßwellen ausbreiten und wie ihr Beschleunigungsverhalten charakterisiert werden kann. Heute werden in den vier Geschäftsfeldern Verkehr, Verteidigung, Raumfahrt und Sicherheit die von Mach entdeckten Prinzipien anwendungsorientiert weiterentwickelt.

Auf der Grundlage solcher Experimente werden numerische Methoden entwickelt, die insbesondere in der Strömungs-, Struktur- und Elektrodynamik angewendet werden. Die experimentellen Versuche werden am Ernst-Mach-Institut heute vielfach ergänzt durch Simulationsrechnungen, die auf numerischen Methoden basieren. Eine neue Forschungsrichtung, die am EMI entwickelt wurde, ist die Ballistronik, eine Verknüpfung von Ballistik und Mikroelektronik. Auch sie zieht in vielfacher Hinsicht Nutzen aus den Erkenntnissen Machs über die Ausbreitung von Stoßwellen.

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT



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 66 Institute und Forschungseinrichtungen. Knapp 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 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

ERNST-MACH-INSTITUT

FORSCHUNG
2014/15



IMPAKTPHYSIK

IMPAKTPHYSIK

Die Abteilung Impaktphysik untersucht Phänomene der Einkopplung hoher Energien und Impulse in Materialstrukturen und Komponenten. Dies umfasst sowohl klassische Impakt- und Stoßwellenprozesse als auch die Einkopplung von Energie durch elektrischen Strom oder durch Laserstrahlung.

Mit bestehenden Beschleunigern können in den Untersuchungslaboren der Abteilung Impaktphysik Geschwindigkeiten von bis zu 8 Kilometern pro Sekunde für Serienuntersuchungen erreicht werden. Diese hohen Geschwindigkeiten reichen aus, um viele Hypervelocity-Impaktvorgänge wie beispielsweise den Einschlag von Meteoriten oder Weltraumschrott (Space Debris) zu untersuchen. Da die Bahngeschwindigkeit im Low-Earth-Orbit bei 8 Kilometern pro Sekunde liegt, können Partikel von solchen Schrottteilchen beispielsweise auf Satelliten mit einer noch deutlich größeren Relativgeschwindigkeit einschlagen, die für gegenläufige Orbitalbahnen bis zu 16 Kilometer pro Sekunde betragen kann. Daher besteht für die Untersuchung der Verwundbarkeit von Satelliten großes Interesse, Serienuntersuchungen auch bei über 8 Kilometern pro Sekunde durchführen zu können. Vor diesem Hintergrund wurde am Fraunhofer EMI das neue Konzept der TwinGun entwickelt. Das Konzept dieses Leichtgasbeschleunigers mit zwei parallelen Pumpläufen wird im Folgenden vorgestellt. Ein Demonstrator für diese innovative Beschleunigungstechnologie wurde aufgebaut und befindet sich gegenwärtig in der Erprobungsphase.

Auf der Grundlage bestehender Beschleunigertechnologie in der Abteilung werden Analysen zum Impact auf die Oberflächen von Planeten und Himmelskörpern durchgeführt. Beispielsweise kann das Material von Asteroiden hochporös aufgebaut sein, und Gesteine der Erdoberfläche können auch einige zehn Volumenprozent Porosität aufweisen. Entsprechend wird eine Analyse der Abhängigkeit des Impaktkraterbildungsphänomens von der Porosität dargestellt. Für die Analyse eines Einschlags auf die Erdoberfläche wurde der Impact auf das geologische Material Sandstein untersucht. Hier interessiert auch die Struktur der Stoßwelle, die dabei erzeugt wird. Derartige Prozesse haben die vorzufindenden Gesteinsformen in Regionen mit erdgeschichtlich bedeutsamen Impaktereignissen wie das Nördlinger Ries geprägt. Da solche Messungen von transienten Drücken in Gestein bislang noch nicht durch-



Dr. Matthias Wickert

Abteilungsleiter Impaktphysik

Telefon 0761 2714-384 | matthias.wickert@emi.fraunhofer.de

geführt worden waren, war hierzu ein geeigneter Sensor auszulegen und herzustellen. Das Verhalten von metallischen Strukturen unter der Einkopplung hoher Energien in Form von elektrischem Strom wurde im Rahmen einer wissenschaftlichen Ausarbeitung hinsichtlich der resultierenden strukturmechanischen Materialantwort auf derartig hohe Pulslasten im Modell abgebildet und simuliert. Dies bietet eine theoretische Grundlage für das Verständnis des Verhaltens von Konstruktionswerkstoffen bei Blitzschlag oder der Anwendung elektromagnetischer Prinzipien für den Schutz gegen militärische Bedrohungen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Impaktvorgängen und Explosionen besteht darin, dass beim Einschlag eines Projektils durch dessen kinetische Energie am Auftreffort lokal eine hohe Impulsänderung und damit Kraftwirkung auftritt, während die Stoßwellen aus Sprengvorgängen sich in der Regel allseitig ausbreiten, wobei der Impuls sich mit zunehmender Entfernung auf eine immer größere Fläche verteilt und damit in der Amplitude abnimmt. Das Fraunhofer EMI konnte jedoch ein Wirkprinzip entwerfen und als Focal Enhanced Blast Effektor realisieren, mit dem auch ohne Einsatz von Fragmenten mit einer Explosivstoffladung eine stark gerichtete Kraftwirkung ermöglicht wird.

Abschließend wird dargestellt, wie gerichteter Energieeintrag durch Lichtwellen in Form eines Hochleistungslaserstrahls auf Material einwirkt. Im Rahmen des europäischen Sicherheitsforschungsprogramms »Encounter« werden die Prozesse beim Laserimpakt auf Explosivstoffe untersucht. Auf der Basis von simultan gemessenen Verläufen von Temperatur und Druck soll an exemplarischen Explosivstoffen ein Modell für eine geeignete Reaktionskinetik entwickelt werden, die die Umsetzung in energetischen Materialien zu beschreiben vermag und damit auf eine kontrolliert ablaufende Neutralisation von Sprengfallen bei großem Abstand hinführen soll.

Neben dieser Art der Analyse der Einwirkung eines Laserstrahls auf Materie wird die Gruppe Lasertechnologie neu im Jahr 2015 eine Lasersinteranlage in Betrieb nehmen, um das Potenzial von schichtenweise, auf der Basis von Lasereinwirkung im 3D-Druckverfahren aufgebauten Materialstrukturen und Komponenten untersuchen zu können.

TwinGun – Neuartiges Konzept für einen Leichtgasbeschleuniger

Einleitung

Die stark angewachsene Menge von Weltraumschrott im erdnahen Weltraum stellt zusammen mit Mikrometeoriten eine ständige Gefährdung für Satelliten durch Einschläge dar. Aufgrund der hohen im Orbit erreichten Relativgeschwindigkeiten von bis zu 16 Kilometern in der Sekunde können selbst besonders häufig auftretende kleine Schrottpartikel, wie wenige Millimeter große Teilchen, auf Satellitenoberflächen auftreffen, Komponenten beschädigen und zum Ausfall von Satellitenmissionen führen.

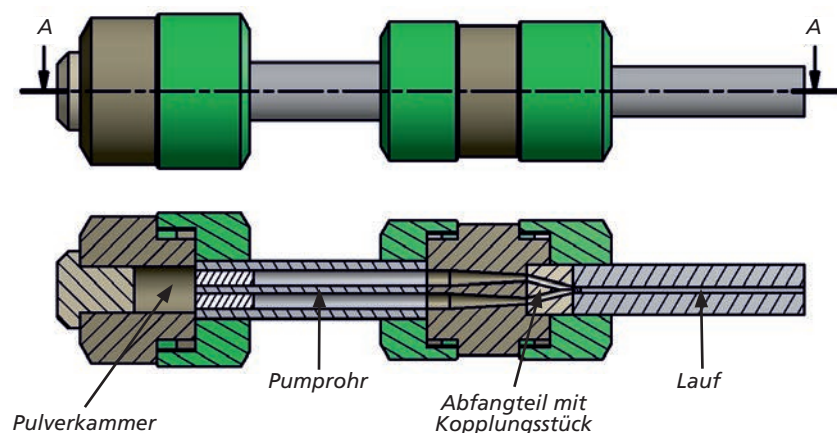
Zur Untersuchung der Auswirkungen solcher Einschläge ist die Wissenschaft und Forschung auf Beschleuniger angewiesen, mit denen diese Bedingungen im Labor reproduziert werden können. Weltweit werden für solche Versuche vorwiegend zweistufige Leichtgasbeschleuniger eingesetzt, was hauptsächlich auf die Vielseitigkeit und die Reproduzierbarkeit der Versuche mit diesem Beschleunigertyp zurückzuführen ist.

Mit aktuellen Beschleunigern werden am Fraunhofer EMI und bei vergleichbaren Anlagen weltweit routinemäßig Geschwindigkeiten im Bereich von sieben bis acht Kilometern in der Sekunde erreicht. Das Fraunhofer EMI untersucht derzeit ein neuartiges Konzept für einen Leichtgasbeschleuniger, mit dem Serienuntersuchungen auch bei mehr als 8 Kilometern pro Sekunde durchgeführt werden können sollen.

Das Konzept basiert auf dem Funktionsprinzip zweistufiger Leichtgasbeschleuniger. Der Beschleuniger besteht aus einer Kompressionsstufe und einer Beschleunigerstufe. In der Kompressionsstufe wird molekular leichtes Gas auf einen sehr hohen Druck (im Bereich mehrerer Tausend bar) verdichtet. In der Beschleunigerstufe wird mithilfe des komprimierten Gases ein Projektil beschleunigt.

Die Kompression erfolgt bei normalen Leichtgasbeschleunigern durch einen Kolben in einem Rohr (sog. Pumprohr oder Treibrohr). Durch einen Konus im Abfangteil am Ende des Pumprohres wird der eintreffende Kolben deformiert, wodurch der Kolben insgesamt zwar abgebremst wird, die Vorderseite jedoch zunächst stark beschleunigt wird. Dieser Deformationsprozess führt zu einem schnellen Druckanstieg zum Ende der Kompressionsphase, was für eine hohe Beschleunigerleistung erforderlich ist. Jedoch fällt der Druckpuls relativ schnell wieder ab. Der Antrieb der Kompressionsstufe wird bei Hochleistungs-Leichtgasbeschleunigern in der Regel mit Treibladungspulver realisiert.

Durch herkömmliche Kompressionsstufen wird am Eintritt der Beschleunigerstufe ein Druckpuls erzeugt, der anschließend auf das Projektil wirkt und dieses beschleunigt. Die TwinGun besitzt gegenüber herkömmlichen Leichtgasbeschleunigern eine neuartige Kompressionsstufe. Diese besitzt eine zweite Pumprohrbohrung, in der ein zweiter Kolben nahezu synchron zum ersten beschleunigt wird. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der



1 Schematische Darstellung des am Fraunhofer EMI entwickelten TwinGun-Beschleunigers. Gegenüber herkömmlichen Leichtgasbeschleunigern besitzt die TwinGun eine zweite Pumprohr-Bohrung in der Kompressionsstufe.

TwinGun. Durch geschickte Wahl von geringfügig sich unterscheidenden Eigenschaften dieses zweiten Kolbenkompressors wird erreicht, dass die Kolben ihr jeweiliges konisches Abfangteil mit einem geringen zeitlichen Versatz erreichen. Damit wird ein verlängerter, aber nicht in der Amplitude weiter erhöhter Druckpuls erreicht, wodurch insgesamt eine höhere Energie auf das Projektil übertragen wird, was wiederum zu einer höheren Abgangsgeschwindigkeit führt. Abbildung 2 zeigt einen schematischen Vergleich des Druck-Zeit-Verlaufs von herkömmlichen Leichtgasbeschleunigern und der TwinGun.

Die wesentlichen Herausforderungen beim Betrieb der TwinGun bestehen darin, die Versetzung der sonst synchronen Bewegung der beiden Kolben kontrolliert erzeugen und reproduzieren zu können, um einen optimalen Druck-Zeit-Verlauf am Eintritt der Beschleunigerstufe sicherzustellen.

Die Verwendung einer gemeinsamen Pulverkammer für beide Pumprohrbohrungen stellt hierbei den zentralen Ansatz für die erfolgreiche Synchronisierung der beiden Kolben dar. Pulverabbrand ist in der Regel mit einer hohen zeitlichen Ungenauigkeit behaftet (Streuung bei der TwinGun: mehrere Millisekunden). Durch die gemeinsame Pulverkammer wird somit eine grobe Synchronisierung der Bewegung der beiden Kolben sichergestellt.

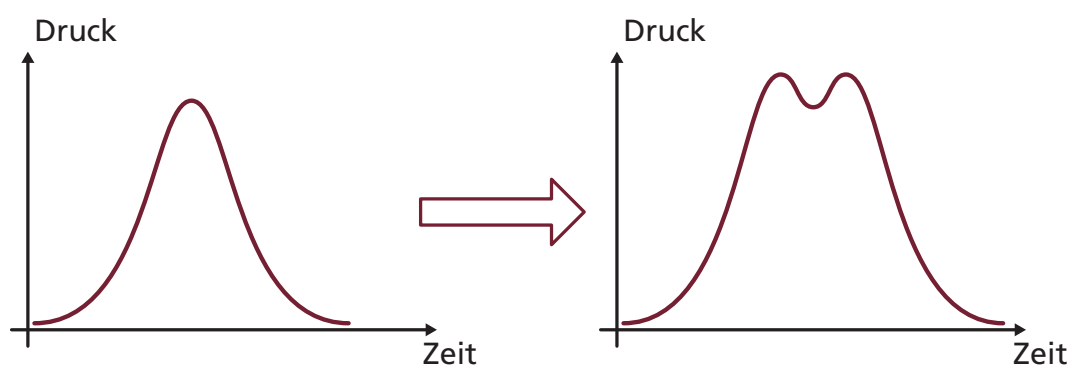
Die Machbarkeit des Konzepts wurde durch eine Vielzahl numerischer Simulationen untersucht. Dabei konnte unter

anderem gezeigt werden, dass mit der TwinGun die gleiche Projektilgeschwindigkeit wie mit einem herkömmlicher Leichtgasbeschleuniger bei gleichzeitig verringerter Belastung der Anlage erreicht werden kann. Weiterhin wurden Möglichkeiten untersucht, die Kolbenbewegung gezielt zu beeinflussen. Dabei hat sich eine Variation der Kolbenmasse als aussichtsreichster Ansatz herausgestellt, um schließlich auch höhere Projektilgeschwindigkeiten zu erreichen.

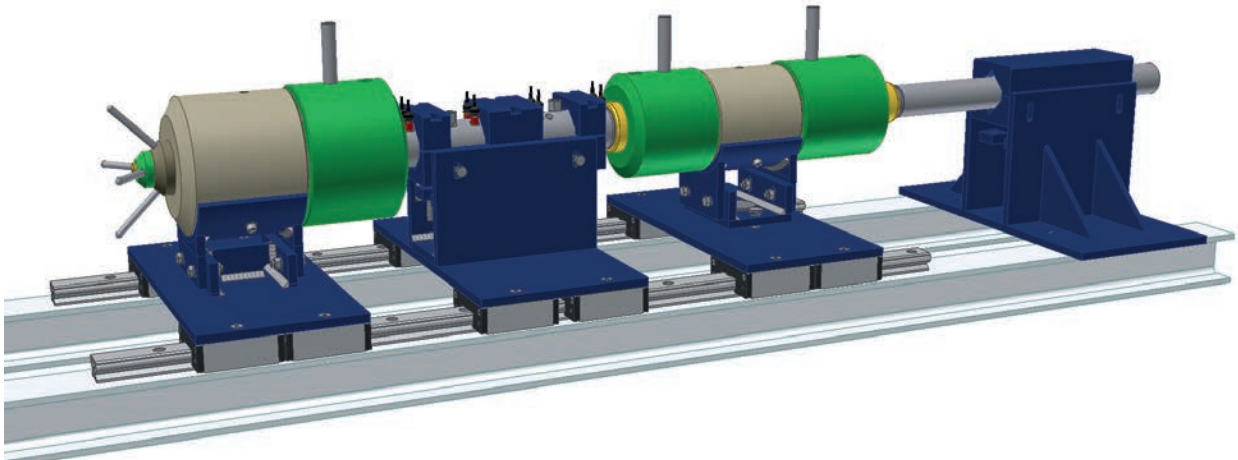
Im Anschluss an die Untersuchungen zur Machbarkeit wurde die TwinGun-Anlage entwickelt, konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Abbildung 3 zeigt ein CAD-Modell der TwinGun, während Abbildung 4 den fertigen Beschleuniger-Prototypen unmittelbar vor der Inbetriebnahme zeigt.

Bei der Inbetriebnahme konnte bereits mit wenigen Versuchen die Machbarkeit des Konzepts auch im Experiment bestätigt werden. Die hierbei aufgezeichneten Daten weisen einen verlängerten Druckpuls am Eintritt der Beschleunigerstufe auf. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Druck-Zeit-Verlauf am Eintritt der Beschleunigerstufe aus einem Versuch.

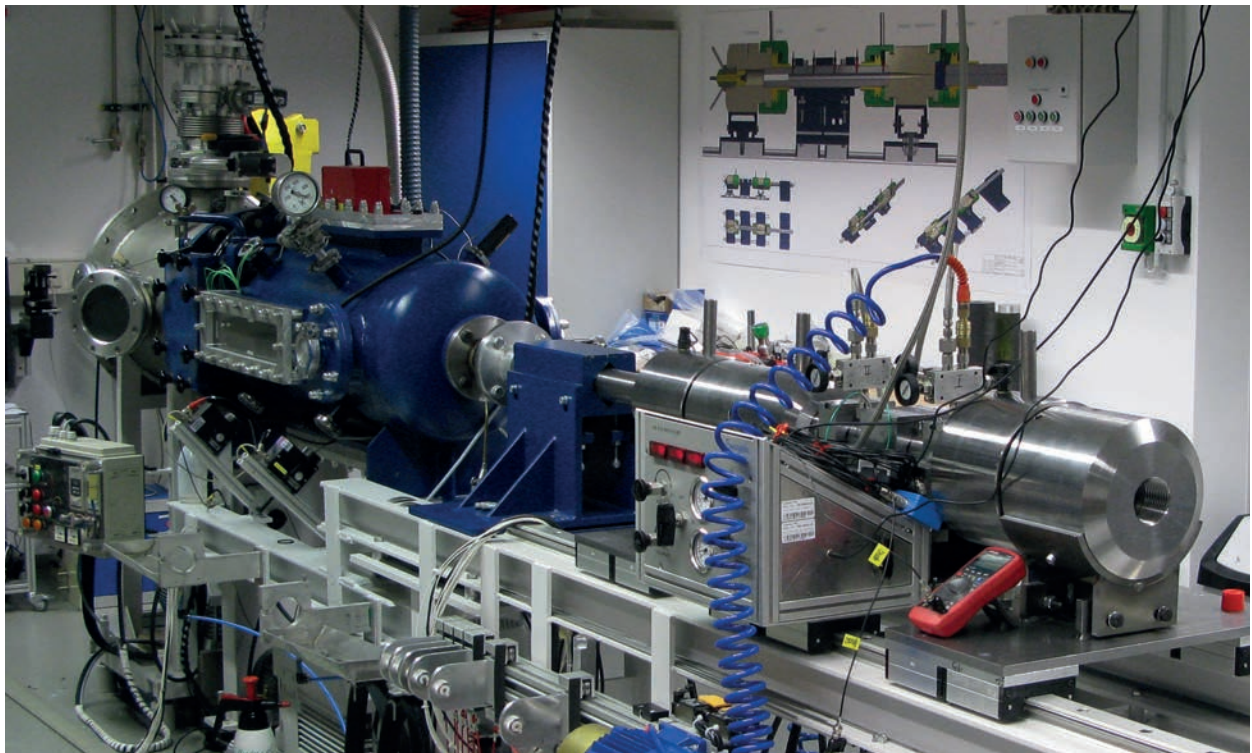
In diesem Versuch hatten die beiden Kolben beim Eintritt in das Abfangteil einen zeitlichen Abstand von etwa 90 Mikrosekunden. Der zeitliche Abstand der beiden Maxima im Druck-Zeit-Verlauf beträgt ebenfalls etwa 90 Mikrosekunden.



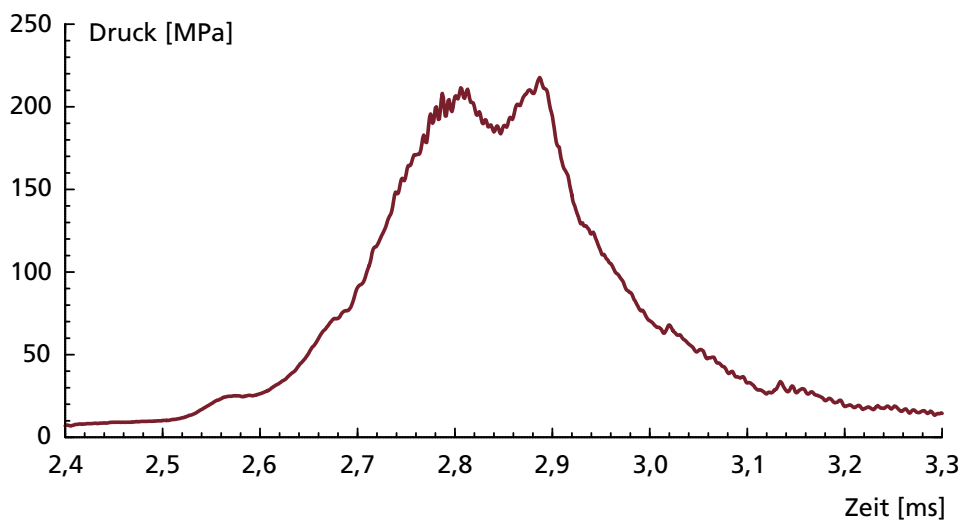
2 Schematischer Vergleich des Druck-Zeit-Verlaufs, der am Eintritt der Beschleunigerstufe erzeugt wird. Links der Verlauf bei herkömmlichen Leichtgasbeschleunigern, rechts der Verlauf bei einer TwinGun. Durch die zweite Pumprohr-Bohrung kann der Druckpuls der Kompressionsstufe verlängert werden, was zu einer erhöhten Abgangsgeschwindigkeit des Projektils führt.



3 CAD-Modell der TwinGun.



4 Foto der TwinGun unmittelbar vor der Inbetriebnahme.



5 Druck-Zeit-Verlauf am Eintritt der Beschleunigerstufe mit dem am Fraunhofer EMI aufgebauten TwinGun-Beschleuniger. Die beispielhafte Messkurve für den Druck-Zeit-Verlauf entspricht den Erwartungen aus den theoretischen Überlegungen und demonstriert die Machbarkeit des Konzepts.

Der Druck-Zeit-Verlauf in Abbildung 5 gleicht qualitativ dem in Abbildung 2 dargestellten und vom Konzept her erwarteten Verlauf. Durch die beiden deutlich voneinander abgegrenzten Maxima ist der Beitrag jeder einzelnen Pumprohr-Bohrung klar erkennbar. Bei kürzeren Abständen der Kolben verschmelzen die beiden Maxima zu einem einzelnen, verlängerten Druckpuls. Tatsächlich ist ein solcher einzelner, verlängerter aber in der Amplitude nicht vergrößerter Druckpuls für einen optimalen Betrieb erwünscht, weil sich hierbei der auf die Komponenten einwirkende Maximaldruck nicht erhöht.

Durch das vorgestellte Konzept wird die Robustheit der Komponenten des Beschleunigers im Beschleunigungszyklus berücksichtigt. Dadurch ist es möglich, die erreichbare Geschwindigkeit zu maximieren und gleichzeitig die Belastung der Anlage auf ein in Hinblick auf den Verschleiß kontrollierbares Niveau zu begrenzen.

Bei der anfangs mithilfe numerischer Simulationen durchgeführten Machbarkeitsanalyse wurde gezeigt, dass das vorgestellte Konzept eine Leistungssteigerung gegenüber einem herkömmlichen Leichtgasbeschleuniger durch eine Verbreiterung des für die Projektileschleunigung nutzbaren Druckpulses ermöglicht. Ein entsprechend ausgelegter Beschleuniger ist in Betrieb. Die bisher gewonnenen Daten zeigen, dass die modifizierte Kompressionsstufe des Beschleunigers den gewünschten verlängerten Druckpuls erzeugen kann.

Er wird derzeit dazu genutzt, das neuartige Beschleunigerkonzept weiter zu bewerten. Bei den sich an die Inbetriebnahme nun anschließenden Arbeiten steht das Sicherstellen einer synchronen Kolbenbewegung mit einer zuverlässigen Einstellmöglichkeit für den Kolbenversatz im Mittelpunkt. Danach soll untersucht werden, welche Projektilgeschwindigkeiten sich mit dem Konzept in der Praxis für Impaktversuche erreichen lassen.

Planetare Wissenschaft: Untersuchungen zum Einschlag von Himmelskörpern

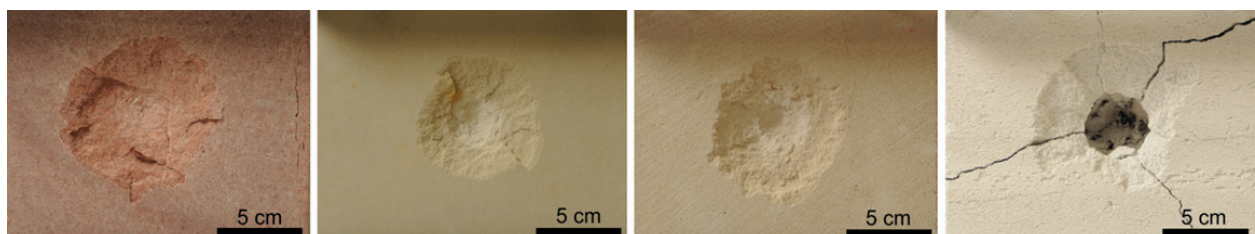
Impaktkraterbildung ist ein fundamentaler geologischer Prozess. Am EMI werden die transienten physikalischen Prozesse, die beim Einschlag von Himmelskörpern auftreten, mit experimentellen Methoden untersucht. In den experimentellen Untersuchungen werden mithilfe zweistufiger Leichtgasbeschleuniger Projektilen auf bis zu 8 Kilometer pro Sekunde beschleunigt, um sie auf Proben von Gesteinsmaterialien einschlagen zu lassen. Der Impakt, die Kraterbildung sowie der Auswurf des Targetmaterials laufen im Laborversuch, der gegenüber dem planetaren Maßstab stark skaliert ist, innerhalb von Mikrosekunden bzw. Millisekunden ab und können nur mit spezieller Hochgeschwindigkeitsdiagnostik experimentell untersucht werden. So werden beispielsweise Hochgeschwindigkeitskameras sowie spezielle Sensoren eingesetzt, um den Auswurfsprozess sowie durch den Impakt angeregte Druckamplituden im Zielmaterial zu charakterisieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Porosität des Materials einen starken Einfluss auf die Impaktkraterbildung sowie den Auswurfsprozess hat. Abbildung 6 zeigt vier Impaktkrater in Quarzit, Sandstein, Kalkstein und Porenbeton, die jeweils mit 5-Millimeter-Aluminiumprojektilen bei einer Impaktgeschwindigkeit von ungefähr 6 Kilometer pro Sekunde gebildet wurden. Die Materialien weisen stark unterschiedliche Porositäten zwischen 3 Prozent (Quarzit) und 87 Prozent (Porenbeton) auf.

Zum Vergleich des Einflusses der Porosität auf den Auswurfsprozess (»Ejekta«) sind in Abbildung 7 zwei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für Impaktvorgänge in Quarzit und Sandstein gezeigt. Die Aufnahmen wurden mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 40 000 Bildern pro Sekunde durchgeführt.

Beide Materialien zeigen einen kegelförmigen Auswurf, jedoch ist dieser Auswurf beim Quarzit steiler als beim Sandstein. Werden mehrere aufeinanderfolgende Bilder ausgewertet, kann die Ejektageschwindigkeit bestimmt werden. Dabei ergibt sich eine höhere Ejektageschwindigkeit für Quarzit als für Sandstein.

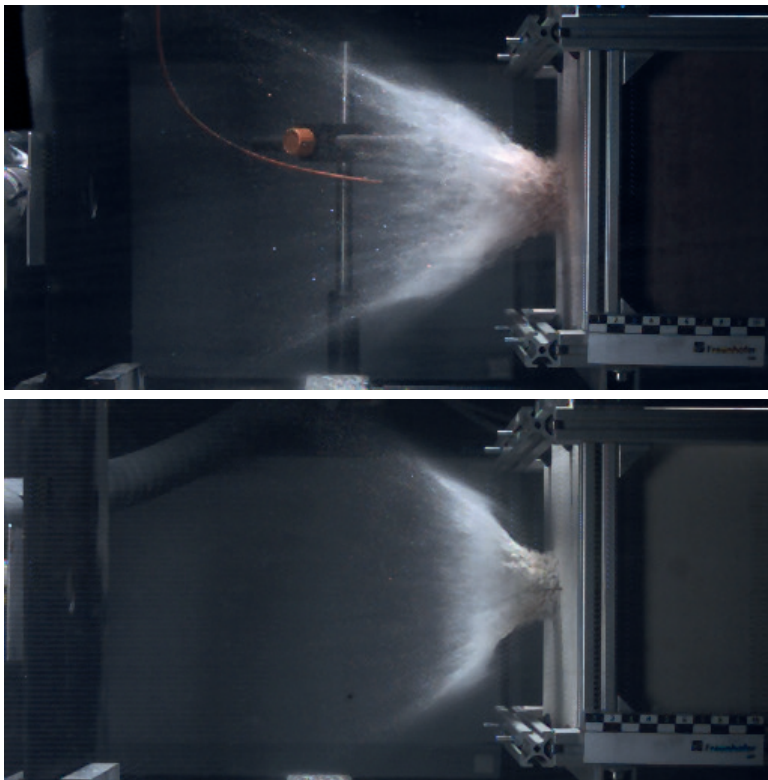
Der Meteoriteneinschlag in Russland am 15. Februar 2013 sowie der Vorbeiflug eines Asteroiden an der Erde am selben Tag haben die potenzielle Gefahr durch den Einschlag eines erdnahen Objekts (»NEO – Near Earth Object«) ins öffentliche Bewusstsein gerückt. Am EMI wird im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projekts NEOShield eine spezielle Methode zur Ablenkung erdnaher Objekte aus ihrer Bahn in Laborexperimenten untersucht. Dabei soll der Einschlag einer Masse mit hoher Geschwindigkeit zu einer Änderung der Flugbahn des abzulenken- den Objektes führen. Das entgegen der Einschlagsrichtung ausgeworfene Material (Abbildung 7, nächste Seite) liefert einen zusätzlichen Impulsübertrag auf das Target. Der sogenannte Impulserhöhungsfaktor β beschreibt das Verhältnis der Änderung des Targetimpulses nach dem Impakt zum Projektilimpuls vor dem Impakt und kann in



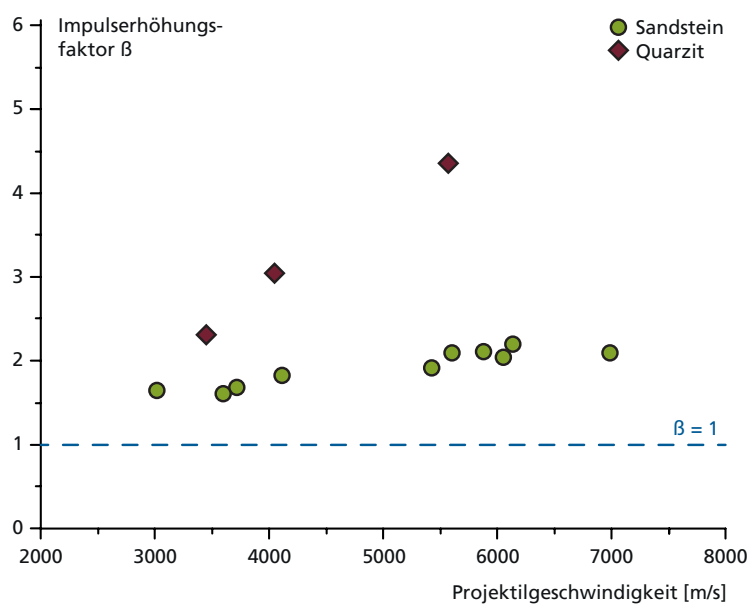
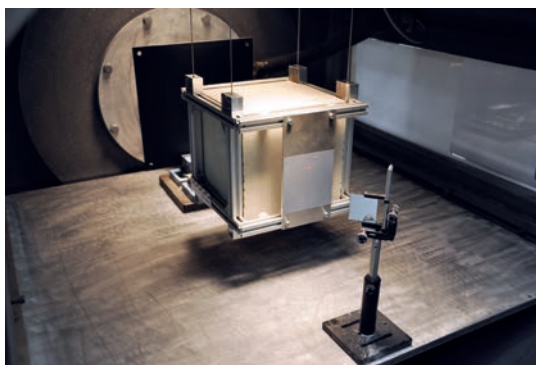
Porosität



6 Vergleich zwischen vier Impaktkratern, die in Materialien mit unterschiedlicher Porosität ϕ gebildet wurden: Quarzit ($\phi \sim 3\%$), Sandstein ($\phi \sim 25\%$), Kalkstein ($\phi \sim 31\%$) und Porenbeton ($\phi \sim 87\%$).



7 Vergleich der Ejekta zwischen Quarzit (oben) und Sandstein (unten).



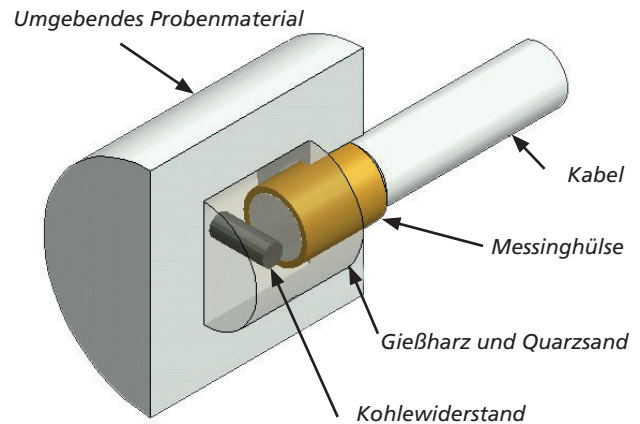
8 Impulserhöhungsfaktor β in Abhängigkeit der Projektilgeschwindigkeit.

Impaktexperimenten gemessen werden. Auswurf von Material entgegengesetzt zur Einschlagsrichtung führt zu $\beta > 1$. Abbildung 8 zeigt den experimentellen Aufbau, bei dem das Target in ein ballistisches Pendel fixiert wird, wobei die Auslenkung des Pendels berührungsfrei mit einem Laservibrometer gemessen wird. In Abbildung 8 sind gemessene Werte für den Impulserhöhungsfaktor β dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass β sowohl von der Impaktgeschwindigkeit als auch von den Eigenschaften des Targetmaterials abhängt: Poröse Materialien wie Sandstein zeigen kleinere β -Werte als beispielsweise Quarzit. Mit steigender Projektilgeschwindigkeit steigt β bei Quarzit steiler an. Ursache ist die unterschiedliche Ejektdynamik bei porösen und nichtporösen Materialien (Abbildung 7).

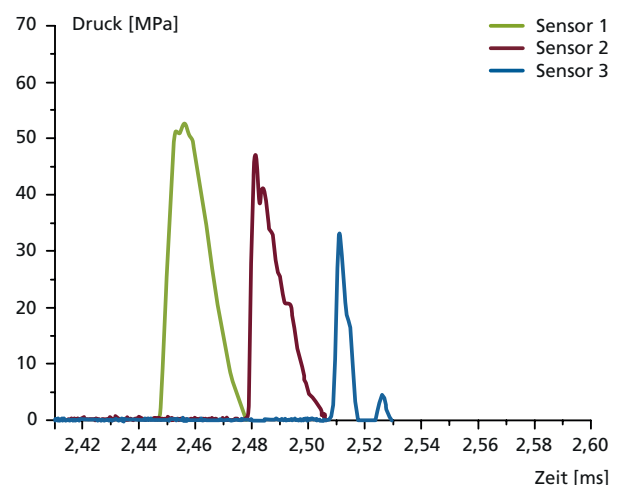
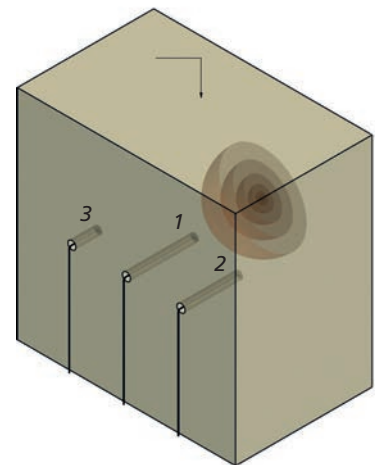
Beim Impakt wird eine Stoßwelle erzeugt, die sich hemisphärisch im Targetmaterial ausbreitet und allmählich in eine elastische Welle übergeht. Messtechnisch ist die durch den Impakt angeregte Druckamplitude nur sehr schwierig zu erfassen, da hierfür ein geeigneter Drucksensor ins Target eingebettet werden muss, der die Welle möglichst wenig stört. Darüber hinaus weisen geologische Materialien wie z. B. Sandstein inhomogene und anisotrope Eigenschaften auf, was die Messung zusätzlich erschwert. Aus diesem Grund wurde am EMI ein spezieller Drucksensor entwickelt, welcher in spröde und poröse Materialien wie z. B. Gesteine oder auch Beton eingebettet werden kann, und darüber hinaus für einen hohen Druckbereich verlässliche Ergebnisse liefert. Der Sensor besteht im Wesentlichen aus einem Kohle-Masse-Widerstand, der seinen Widerstandswert bei Belastung ändert. Abbildung 9 zeigt das Widerstandselement, welches in Harz eingegossen wird, um eine gleichmäßige Kraftübertragung zu gewährleisten und um punktuelle Belastung durch einzelne Körner des umgebenden Materials zu verhindern. Die Dichte des Harzes wird mit Zusätzen wie beispielsweise Quarzsand der Dichte des umgebenden Probenmaterials angepasst.

Der Sensor wurde für Impaktexperimente mit Sandsteinproben verwendet, um die Druckamplituden sowie das Abklingverhalten der durch den Einschlag erzeugten Welle innerhalb des Targets zu untersuchen. Weiterhin wurden Experimente zur Kalibrierung des Sensors durchgeführt.

Abbildung 10 zeigt die experimentelle Anordnung der Sensoren innerhalb der Versuchsprobe sowie Drucksignale, die an den drei Sensorpositionen mit unterschiedlichem



9 Schematischer Aufbau des Sensors (Gruppe Messtechnik und Sensorik).



10 Aufgenommenes Signal eines durch den Impakt erzeugten Druckpulses.

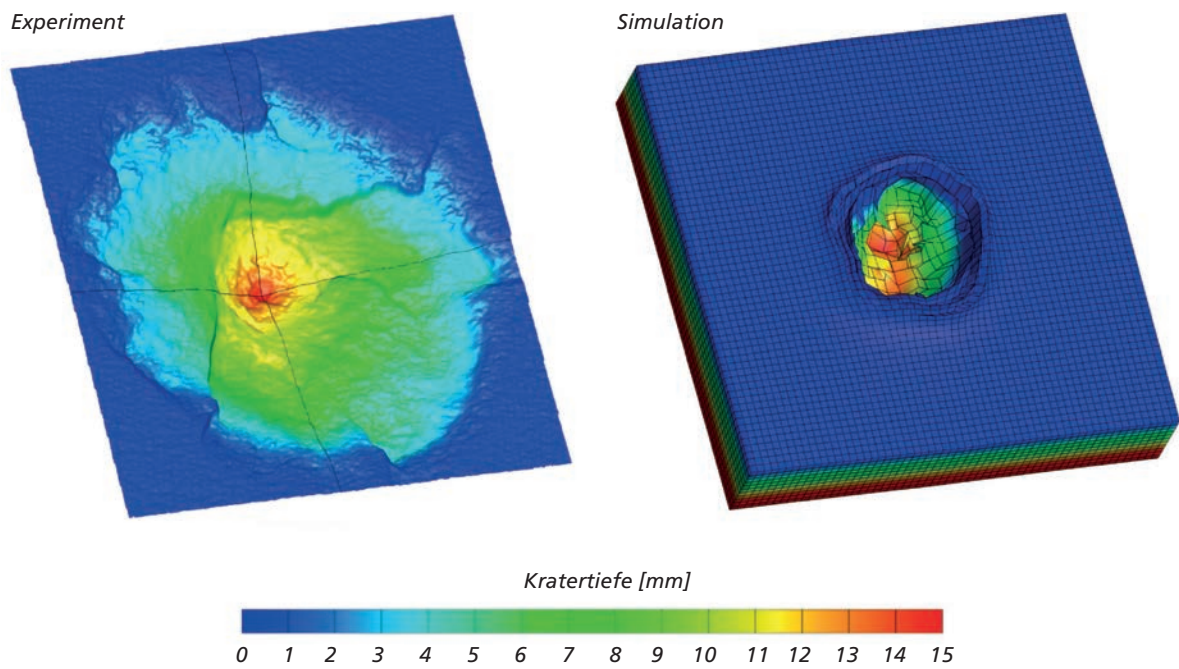
Abstand vom Impaktort aufgenommen wurden. Die Flanke der Stoßwelle ist deutlich ausgeprägt. Das Signal steigt steil an und erreicht innerhalb von wenigen Mikrosekunden sein Maximum. Das Abklingen der Amplitude während der Ausbreitung der Welle im Target ist gut ablesbar. Bei konstant gehaltenen Impaktparametern (Projektilmasse und -geschwindigkeit) sind die aufgezeichneten Signalverläufe gut reproduzierbar bezüglich der Anstiegszeit und der Maximalamplitude.

Zusätzlich zu den Impaktexperimenten werden auch numerische Simulationen des Impaktprozesses und der Kraterbildung durchgeführt. Abbildung 11 zeigt einen Vergleich der Tiefe zwischen einem experimentell erzeugten und einem numerisch berechneten Impaktkrater in Quarzit. Dabei wurde mithilfe eines Lichtscan-Verfahrens ein 3D-Modell des experimentellen Kraters erstellt, welches den Vergleich zwischen Experiment und Simulation erleichtert. Die Kratertiefe wird durch die Simulation sehr gut reproduziert.

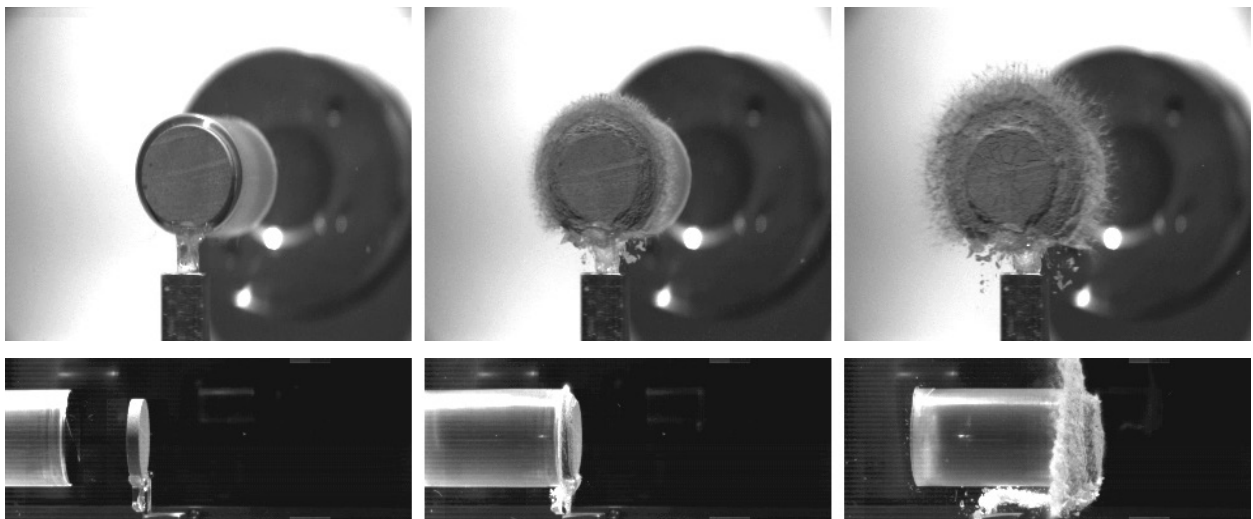
Beim Impaktexperiment wird ein großer Anteil des Kraterolumens durch Spallation, d. h. Versagen des Targetmaterials unter dynamischer Zugbeanspruchung, verursacht. Um nun das Kratervolumen sowie die Kratermorphologie präzise abbilden zu können, sind Materialmodelle der beteiligten Targetmaterialien erforderlich, die am EMI in aufwendigen statischen und dynamischen Materialtests erstellt werden.

Die Materialcharakterisierung erfolgt dabei über einen weiten Dehnratenbereich. Um beispielsweise sehr hohe Dehnraten zu erzielen, werden sogenannte Planar-Platten-Impakttests mit scheibenförmigen Projektilen und Targets durchgeführt. Abbildung 12 zeigt die Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Planar-Platten-Impakts aus zwei Perspektiven. Mithilfe eines Laserinterferometers kann die Geschwindigkeit der Rückseite des Targets berührungslos und mit sehr hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden.

Die Beschleunigeranlagen am EMI in Verbindung mit spezieller Hochgeschwindigkeitsdiagnostik, numerischen Simulationen und Materialcharakterisierungen über einen weiten Dehnratenbereich führen zu neuen wissenschaftlichen Einblicken in den hochdynamischen und komplexen Prozess der Impaktkraterbildung. Dabei werden die experimentellen und numerischen Methoden permanent weiterentwickelt und in der Grundlagenforschung eingesetzt. Darüber hinaus stehen sie für etwaige industrielle Anwendungen zur Verfügung.



11 Vergleich der Kraterniefe zwischen einem experimentell erzeugten und einem simulierten Impakt in Quarzit.



12 Planar-Platten-Impakt zur hochdynamischen Charakterisierung von Sandstein. Oben: Rückseite der Sandsteinprobe, unten: Seitenansicht.

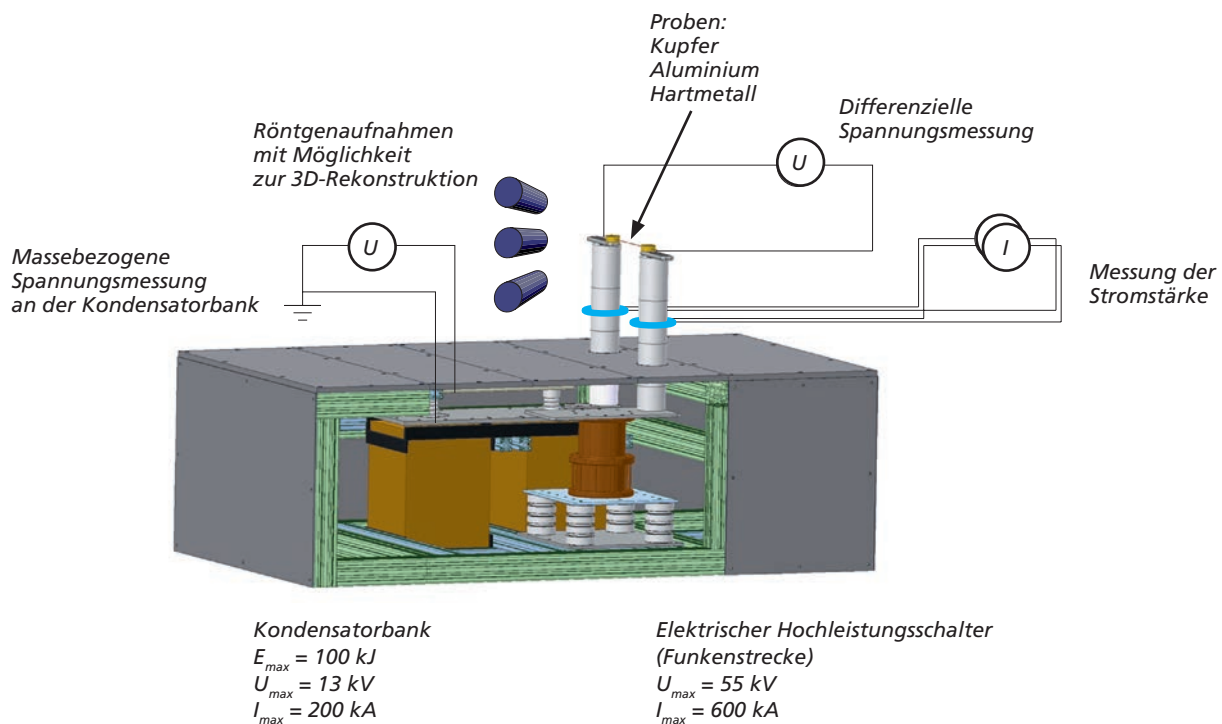
Strukturmechanische Antwort auf hohe elektrische Pulsstromlasten

Das Fraunhofer EMI untersucht das Verhalten von Materialien und Strukturen unter extremen dynamischen Lastbedingungen. Ein derartiger dynamischer Lasteintrag kann beispielsweise als Stoß oder Impakt direkt erfolgen. Einen solchen Lasteintrag stellt aber auch die pulsartige Einwirkung eines hohen elektrischen Stromflusses dar, wie beispielsweise bei einem Blitzschlag, der in indirekter Weise dazu führt, dass ein Material oder eine Struktur auch mechanischen Kräften ausgesetzt ist.

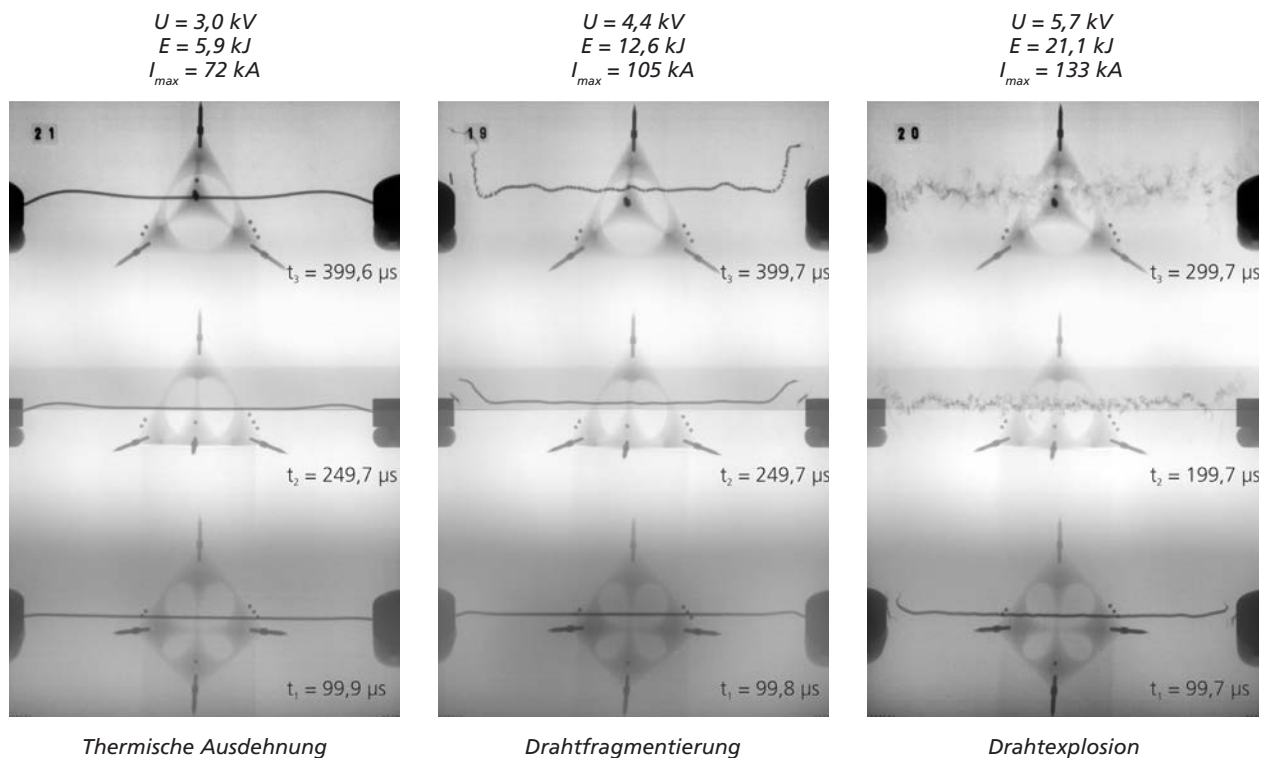
Im Rahmen einer wissenschaftlichen Ausarbeitung wurde das Verhalten von metallischen Strukturen unter der pulsartigen Zufuhr von Energie in Form von hohem elektrischem Strom hinsichtlich der resultierenden strukturmechanischen Materialantwort untersucht, im Modell abgebildet und simuliert.

Hierzu wurde ein Versuchsstand zur Untersuchung von langen zylindrischen Drahtproben aus Kupfer, Aluminium und einem Hartmetall aufgebaut. Der Versuchsstand ist so gestaltet, dass der Einsatz von Röntgenblitzdiagnostik möglich ist, um den Zustand der Drähte zu definierten Zeiten erfassen zu können. Ferner ist die Pulsstromquelle so dimensioniert, dass für die Proben mit einer Länge im Bereich von 300 Millimetern bei einem Durchmesser im Bereich weniger Millimeter insbesondere die mechanische Antwort der Drahtproben untersucht werden kann, bevor bei besonders hohen Lastströmen eine Drahtexplosion einsetzen kann.

Eine Skizze des Versuchsstands ist in Abbildung 16 abgebildet. Die Kondensatorbank kann mit Ladespannungen von bis zu 13 Kilovolt aufgeladen werden und stellt unter Berücksichtigung der Kapazität der Kondensatoren eine elektrische Energie von bis zu 100 Kilojoule bereit. Als elektrischer Schalter zur Auslösung des Strompulses wird eine Funkenstrecke eingesetzt. Es können sehr hohe Ströme bis zu einer Stromamplitude von 200 Kiloampere realisiert werden.



16 Schematische Skizze des Versuchsstandes für die Untersuchung der strukturmechanischen Antwort auf hohe elektrische Pulsstromlasten.



17 Dreifach belichtete Röntgenaufnahmen jeweils einer zylindrischen Kupferprobe (2,0 mm Durchmesser), die fest an den Elektroden eingespannt ist. Die beobachteten Phänomene reichen von der thermischen Ausdehnung über eine Drahtfragmentierung hin bis zu einer Drahtexplosion.

Die Röntgenblitzbilder in Abbildung 17 zeigen die strukturelle mechanische Antwort einer Kupferdrahtprobe auf verschiedene, hohe Pulslasten, bei der das Material des Drahtes vollständig desintegriert wird. Die Pulsstromlast kann beim gegebenen Probendurchmesser von einer thermischen Ausdehnung mit Auslenkung bei einer Maximalamplitude von 72 Kiloampere, über eine Drahtfragmentierung mit wellenartiger Modulation der Auslenkung der Drahtabschnitte bei 105 Kiloampere bis zu einer Drahtexplosion bei 133 Kiloampere reichen.

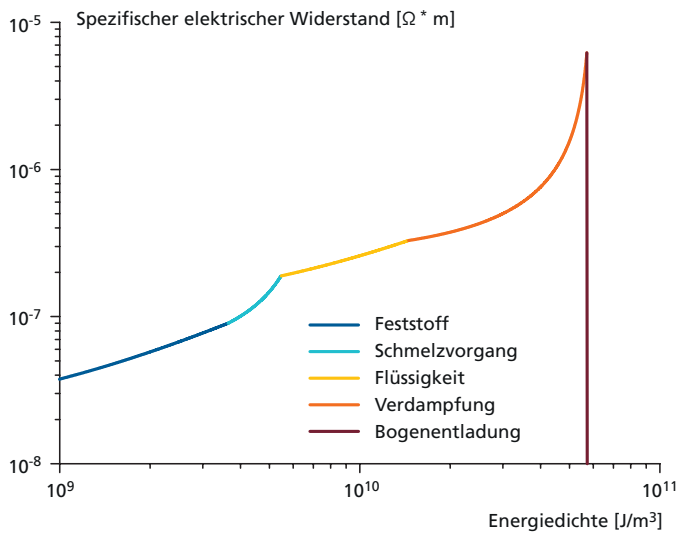
Es wurde ein multiphysikalisches Modell zur Simulation der strukturelle mechanischen Antwort wie dem dargestellten Biegen und Fragmentieren vor dem Einsetzen der Materialdesintegration bei der Drahtexplosion aufgestellt.

Von der elektrotechnischen Darstellung der Versuchsanordnung als gedämpftem Schwingkreis ausgehend werden die thermodynamischen Aspekte durch die Aufheizung des Materials infolge der großen elektrischen Ströme, die

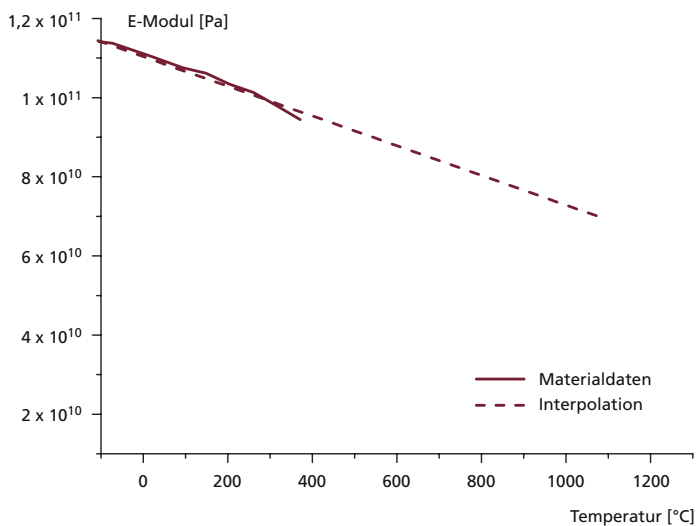
resultierenden elektromagnetisch bedingten Kräfte auf die Probe und die strukturelle mechanische Antwort des Materials abgebildet. Da hier ein dynamischer Vorgang beschrieben wird, sind diese multiphysikalischen Aspekte in geeigneter Weise zu koppeln, um Änderungen am Zustand des Materials wieder auf den Prozess rückwirken lassen zu können.

Für die Abbildung dieses Prozesses ist es weiter notwendig, charakterisierende Modelle über Materialabhängigkeiten wie z. B. des spezifischen elektrischen Widerstands von der inneren Energie, wie in Abbildung 18 (nächste Seite) gezeigt, oder die Abhängigkeit mechanischer Kenngrößen, etwa des Elastizitätsmoduls von der Temperatur, wie in Abbildung 19 (nächste Seite) dargestellt zu verwenden.

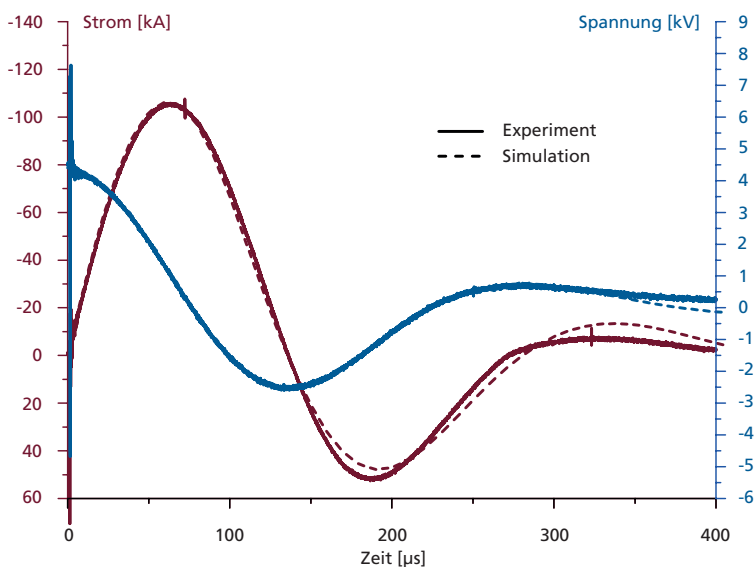
Das Modell gibt eine gute Übereinstimmung für den Strom- und Spannungsverlauf mit den im Experiment gemessenen Werten wieder, siehe Abbildung 20 (nächste Seite).



18 Spezifischer elektrischer Widerstand von Kupfer in Abhängigkeit der inneren Energie. Die verschiedenen physikalischen Aggregatzustände werden durch verschiedene Farben dargestellt.



19 Temperaturabhängiger Elastizitätsmodul von Kupfer. Es wird eine lineare Temperaturabhängigkeit bis zum Schmelzpunkt angenommen.



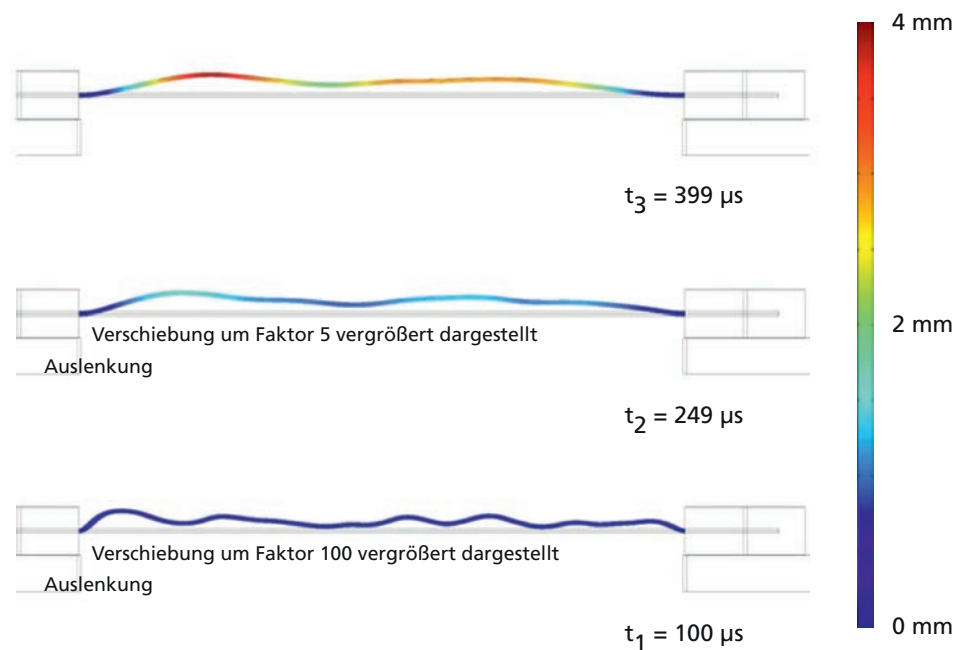
20 Gute Übereinstimmung der gemessenen Strom- und Spannungsverläufe mit der Modellbeschreibung.

Mit diesem Ansatz kann nun die ebenfalls zeitabhängige mechanische Strukturantwort mit dem Finite-Elemente-Simulationsmodell abgeleitet werden, siehe Abbildung 21. Für die Drahtproben bei dem betrachteten mittleren Lastfall bildet sich wie in den Experimenten eine wellenartige Modulation der Auslenkung aus. Für einen frühen Zeitpunkt bei 100 Mikrosekunden ist die Amplitude dieser Modulation allerdings noch sehr schwach ausgeprägt und aus diesem Grund in der Abbildung in der Auslenkungsstärke vergrößert wiedergegeben. In ihrem zeitlichen Verlauf nimmt die Auslenkungsstärke bis zum Zeitpunkt 400 Mikrosekunden deutlich zu, wobei die Anzahl der Modulationen abnimmt.

Während der Schwerpunkt vorangegangener wissenschaftlicher Ausarbeitungen auf spezifischen Aspekten der Drahtexplosionsphänomene lag, wurde bei dem hier vorge-

stellten Modellbildungsansatz die Ableitung des strukturellen Verhaltens in dem Mittelpunkt gerückt, mit dem Betrachtungen zu dynamischen elektrischen Lasten für Bauteile in einem weiten Strompulslastbereich durchgeführt werden können.

Diese Ergebnisse zur Wirkung von elektrischen Lasten wurden für Versuchsproben mit dünner Zylindergeometrie gewonnen. Die Kopplung im Modell bietet eine Grundlage für die Analyse von Effekten wie Blitzschlag auf Flugzeugstrukturen, die Auslegung von selbstauslösenden Trennschaltern sowie Konzepte für Multiphysics-Armor, wo im Rahmen einer Projektkooperation die Mehrfachtrefferfähigkeit eines Funktionsmusters zur Abwehr mehrerer Hohlladungsbedrohungen in sehr kurzer zeitlicher Folge erfolgreich nachgewiesen werden konnte.



21 Finite-Elemente-Simulation der Zeitentwicklung des mechanischen Strukturverhaltens einer Kupferdrahtprobe. Die Färbung der Probe markiert die berechnete Verschiebung des lokalen Drahtabschnitts aus ihrem Ursprung (von blau 0 Millimeter, über grün 2 Millimeter, bis rot 4 Millimeter). Die in der Abbildung dargestellte Verformungsstruktur ist stark vergrößert dargestellt.

Reaktionskinetische Modellierung des Verhaltens von Explosivstoffen bei intensiver Laserbestrahlung

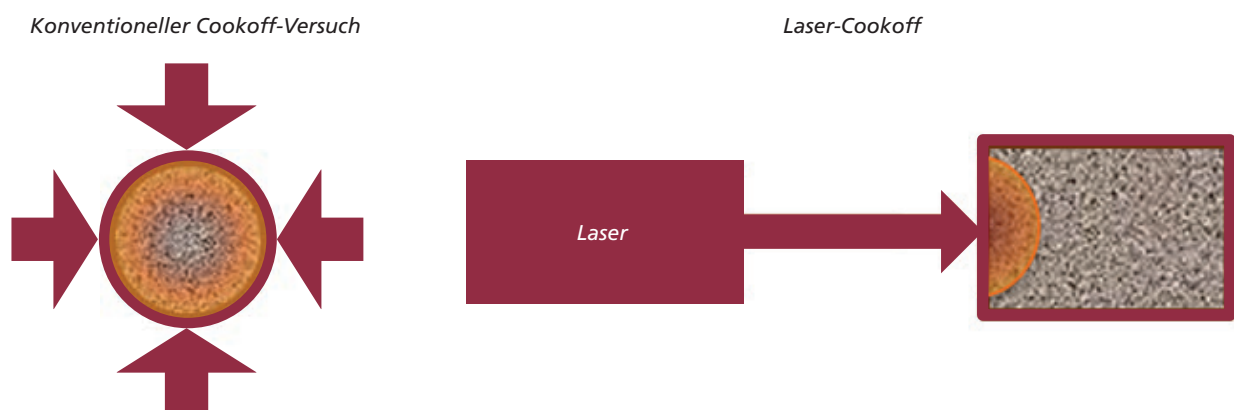
Gebündelte Laserstrahlung ermöglicht den gerichteten Transport hoher Energien auch über große Entfernungen und damit auch die Entwicklung neuartiger Anwendungen. Im Rahmen eines Sicherheitsforschungsprojekts wird am Fraunhofer EMI untersucht, ob es möglich ist, durch den Einsatz von Laserstrahlung Sprengladungen zu neutralisieren. Laserbasierte Verfahren werden teilweise bereits eingesetzt, um auf Sprengladungen in militärischen Szenarien mit großem Abstand einzuwirken und sie beispielsweise aus sicherem Abstand zur Auslösung zu bringen.

Für einen Einsatz unter zivilen Bedingungen wird von einer Technik zur Neutralisierung von Sprengladungen jedoch erwartet, dass das Risiko einer sehr schnell verlaufenden Umsetzung in Form einer Detonation möglichst gering ist. Um dieses Risiko beurteilen zu können, wird am Fraunhofer EMI untersucht, welche Modellierungsansätze das Verhalten von Explosivstoffen in der Simulation beschreiben können. Dabei besteht die besondere Herausforderung auch darin, dass geeignete Modelle eine große Bandbreite der chemischen Zusammensetzung von Explosivstoffen adressieren sollen. Ein Modellansatz sollte also hinreichend allgemein sein, jedoch gleichzeitig auch in der Lage, verschiedene Reaktionsformen von Explosivstoffen wie Abbrand, Deflagration, Detonation und die Übergänge zwischen diesen beschreiben zu können.

Allgemein ist die Erfassung des Verhaltens von Explosivstoffen bei thermischer Einwirkung von großer Relevanz

für die sichere Handhabung von Sprengkörpern und Explosivstoffladungen. Für die quantitative Beurteilung der Empfindlichkeit von Explosivstoffen gegenüber thermischen Belastungen wurden in der Vergangenheit verschiedene Testverfahren etabliert und in der Literatur beschrieben, bei denen die Erwärmung der Probe durch elektrische Wärmequellen oder durch Wärmestrahlung realisiert wird. Bei diesen sogenannten Cookoff-Tests besteht die Probe typischerweise aus einem Metallkörper, der mit Explosivstoffen gefüllt ist. Die Probe wird beim Test solange erwärmt, bis eine Umsetzung des Explosivstoffs stattfindet. Da neben der Temperatur auch der Druck im Innern des Probenkörpers einen wesentlichen Einfluss auf die Kinetik der chemischen Reaktion bei der Umsetzung hat, stellt die Art der Verdämmung des Probenkörpers eine wichtige Randbedingung für die eindeutige Interpretation und für die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse dar. Beispiele für derartige Cookoff-Tests mit starker Verdämmung sind das Scaled Thermal Explosion Experiment (STEX) und der Sandia Instrumented Thermal Ignition (SITI) Test.

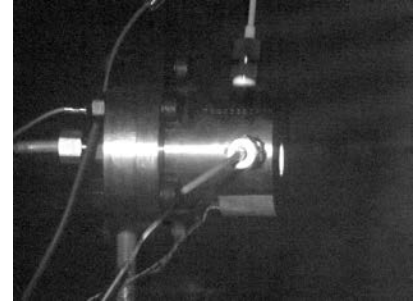
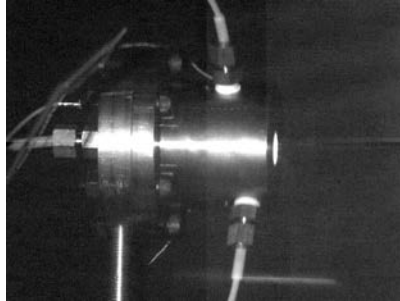
In den vergangenen Jahren wurden ähnliche Versuche durchgeführt, wobei explosivstoffhaltige Proben zur Wärmezufuhr mit intensiver Laserstrahlung beaufschlagt wurden. Die Laserstrahlung führt durch Absorption eines Teils der Laserenergie zunächst zu einer Erwärmung der Oberfläche des Metallmantels. Durch Wärmeleitung wird auch der Explosivstoff im Innern der Probe erwärmt. Die Temperatur- und Druckerhöhung führt schließlich zur Umsetzung des Explosivstoffes. Als Besonderheit bei der Lasereinwirkung muss berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zum oben beschriebenen, konventionellen Cookoff-Versuch die Erwärmung nicht über die gesamte Probenoberfläche,



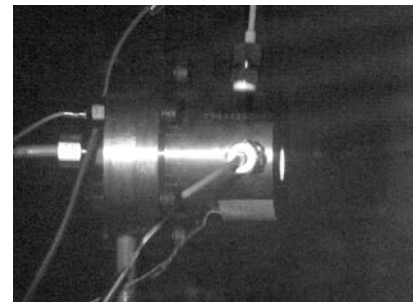
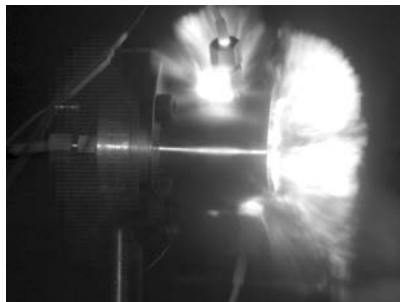
22 Vergleich zwischen konventionellem und Laser-Cookoff-Experiment.

Composition B
 $t_0 = 9,02 \text{ s}$

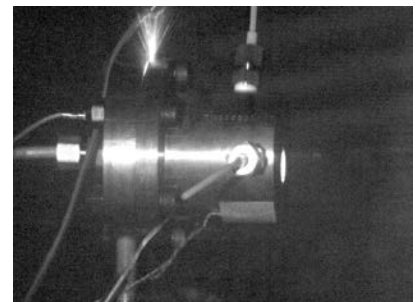
Seismoplast
 $t_0 = 6,94 \text{ s}$



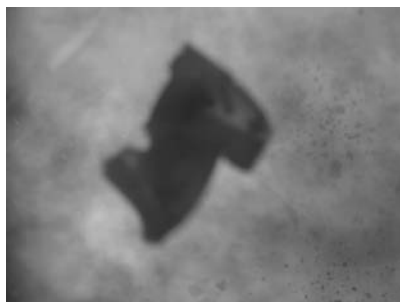
$t_0 + 233 \mu\text{s}$



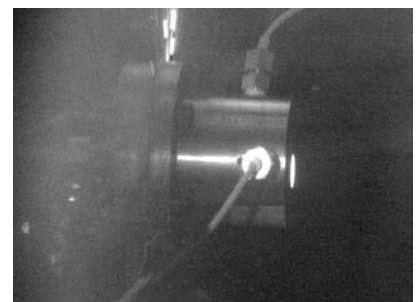
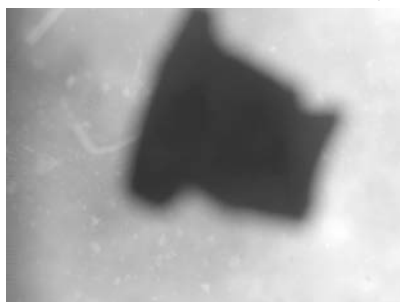
$t_0 + 567 \mu\text{s}$



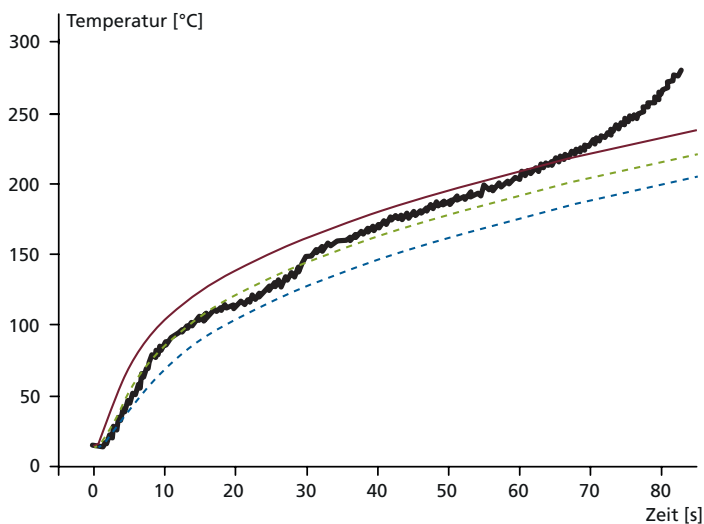
$t_0 + 3500 \mu\text{s}$



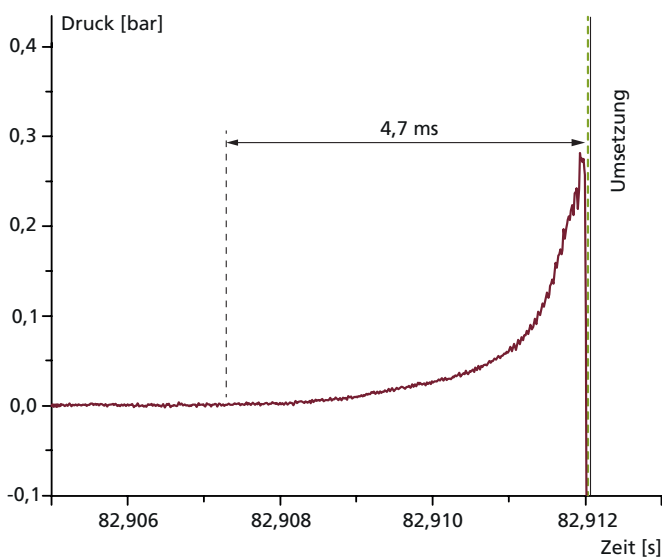
$t_0 + 6933 \mu\text{s}$



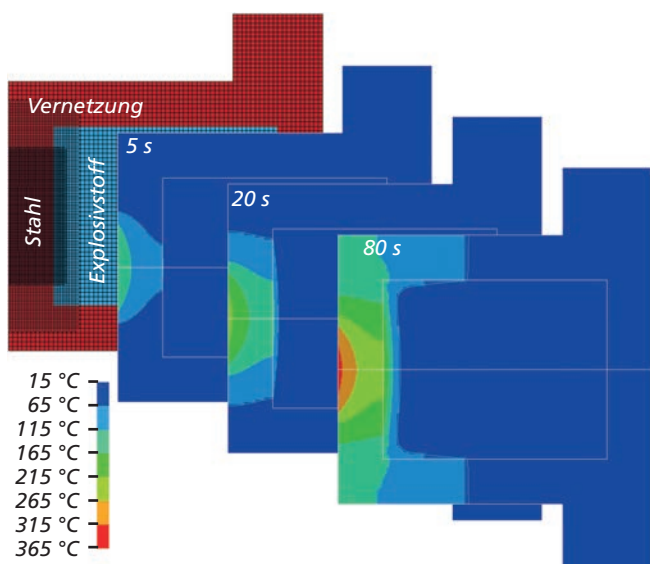
23 Vergleich der Reaktion verschiedener Explosivstoffe (links: Composition B, rechts: Seismoplast) beim Laser-Cookoff.



24 Vergleich von berechnetem (grün) und gemessenem Temperaturverlauf im Innern einer Composition-B-Cookoff-Probe bei Laserbestrahlung mit einer Leistung von 1 Kilowatt. Die rote und blaue Kurve markieren die obere und untere Grenze der Genauigkeit des simulierten Temperaturverlaufs.



25 Druckanstieg im Innern einer Composition-B-Probe beim Laser-Cookoff Versuch. Im Gegensatz zum Temperaturverlauf wird ein messbarer Druckanstieg erst wenige Millisekunden vor der Umsetzung beobachtet.



26 FEM-Simulation zur Berechnung der Erwärmung einer Cookoff-Probe Composition B bei einer Laserleistung von 1 Kilowatt für drei verschiedene Zeitpunkte (5 s, 20 s und 80 s).

sondern lokal erfolgt. Darüber hinaus ist die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs in der Regel um Größenordnungen höher als bei konventionellen Cookoff-Versuchen. Diese Unterschiede sind schematisch in Abbildung 22 (Seite 46) dargestellt.

Die Reaktion der Probe beim Laser-Cookoff hängt entscheidend vom untersuchten Explosivstoff ab. Dies wird in Abbildung 23 (Seite 47) deutlich, die eine Sequenz von Bildern eines Hochgeschwindigkeits-Videos zeigt, welches die Reaktion der Cookoff-Probe zum Zeitpunkt der Umsetzung (t_0) für jeweils zwei verschiedene Explosivstoffe (Composition B und Seismoplast) bei einer Laserleistung von 3 Kilowatt und ansonsten identischen Parametern zeigt. Die Fragmentierung des Metallmantels im Fall der Composition-B-Probe deutet auf eine deflagrative Umsetzung des Explosivstoffes hin, während die Schädigung im Fall von Seismoplast auf eine Abbrandreaktion hindeutet.

Zur quantitativen Untersuchung dieser Vorgänge wurden am Fraunhofer EMI die zeitlichen Druck- und Temperaturverläufe im Innern der Proben während der Laserbestrahlung gemessen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass das zeitliche Verhalten von Druck und Temperatur jeweils charakteristischen Verläufen folgt, die sich deutlich voneinander unterscheiden. Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen exemplarisch den gemessenen Verlauf von Temperatur und Druck im Innern einer Probe mit Composition-B-Füllung bei Bestrahlung mit einer Laserleistung von 1 Kilowatt. Der Temperaturanstieg beginnt vergleichsweise schnell nach einer thermischen Verzögerungszeit, die im Wesentlichen von der Geometrie und den thermischen Eigenschaften des Metallmantels abhängt und beträgt im Beispiel in Abbildung 24 wenige Sekunden, wobei der Zeitpunkt $t = 0$ das Einschalten des Lasers markiert. Danach erfolgt ein kontinuierlicher Temperaturanstieg, bis nach ca. 80 Sekunden eine Umsetzung des Explosivstoffes in der Probe stattfindet. Im Gegensatz dazu findet ein messbarer Druckanstieg im Innern der Probe erst kurz vor der Umsetzung statt. Im Fall des Versuchs mit Composition B wird ein messbarer Druckanstieg erst wenige Millisekunden vor der Umsetzung beobachtet. Um den Verlauf besser darstellen zu können, wird in Abbildung 25 nur der Zeitraum unmittelbar vor der Umsetzung dargestellt. Für Seismoplast wurde dagegen ein deutlich längerer Zeitraum für den Beginn des Druckanstiegs bis zur Umsetzung in der Größenordnung einer Sekunde beobachtet. Der langsa-

mere Druckanstieg beim Seismoplast korreliert mit den beobachteten Reaktionsverläufen in Abbildung 23. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die Zeitskala des Druckanstiegs eine wichtige Größe zur Vorhersage der erwarteten Reaktionsstärke darstellt.

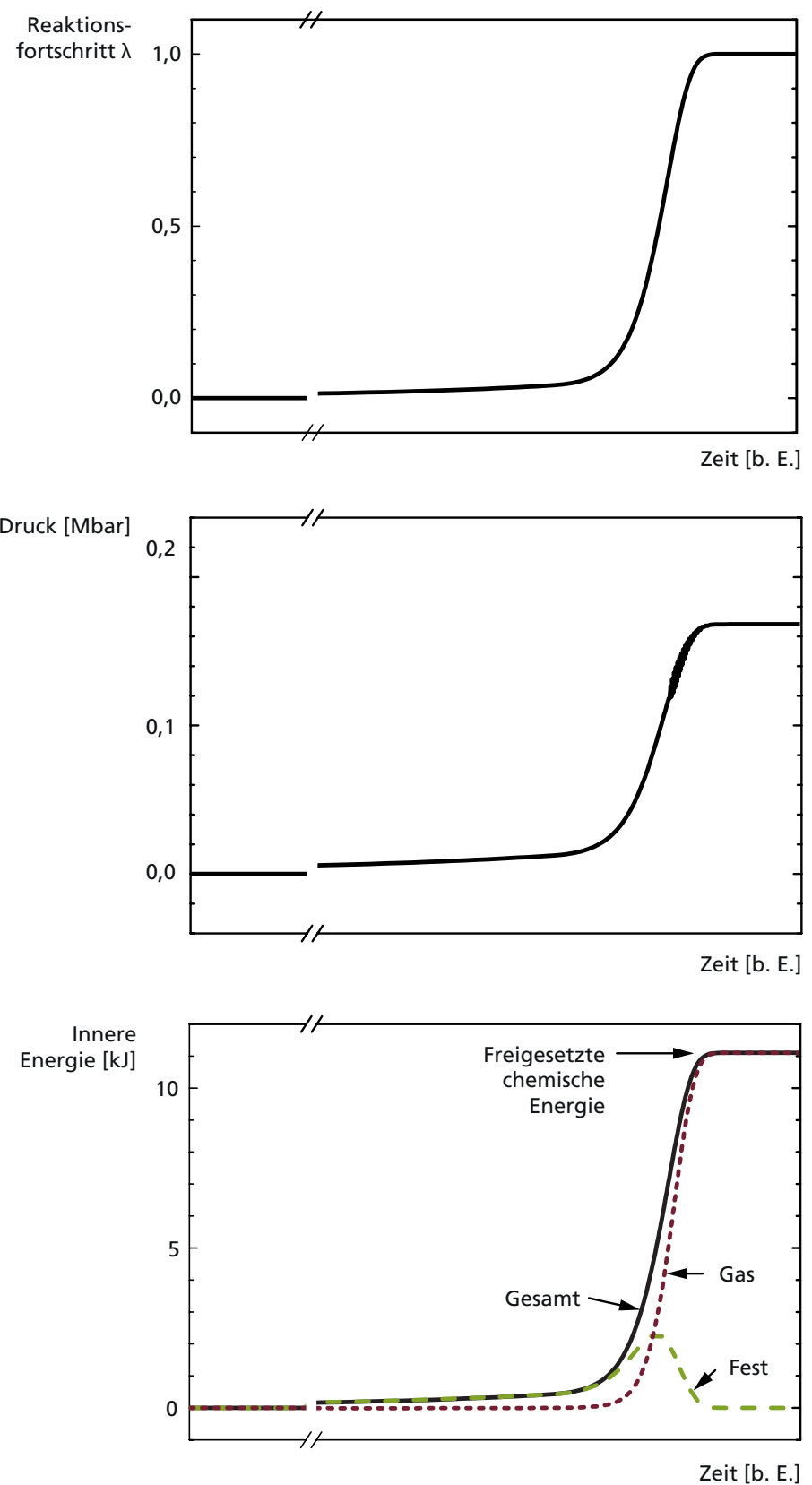
Um das Verhalten der Explosivstoffe unter Laserbestrahlung und insbesondere die Stärke der Umsetzung für Anwendungen in der Sicherheitsforschung im Detail verstehen zu können, werden derzeit am Fraunhofer EMI Simulationsmodelle entwickelt, welche die druck- und temperaturabhängigen Reaktionsgeschwindigkeiten der Explosivstoffe mit berücksichtigen. In einem ersten Schritt wurden FEM-Simulationen zur Untersuchung der Erwärmung der Probenkörper bei der Laserbestrahlung durchgeführt. Als Beispiel zeigt Abbildung 26 das Ergebnis einer FEM-Simulation, welche den zeitlichen Temperaturverlauf in der Probe mit Composition-B-Füllung bei Laserbestrahlung mit einer Leistung von 1 Kilowatt berechnet. Der dazugehörige zeitliche Temperaturverlauf an der Kontaktstelle zwischen Stahlmantel und Explosivstoff ist als grüne Kurve in Abbildung 24 gezeigt. Die rote und die blaue Kurve stellen die Unsicherheit bei der simulierten Temperatur dar und repräsentieren den Temperaturgradienten über einer Länge von 0,5 Millimeter, die dem Durchmesser des im Experiment für die Temperaturmessung verwendeten Thermoelements entspricht.

Um auch den Druckverlauf im Innern der Probe berechnen zu können, wird die Simulationsumgebung derzeit mit einem reaktionskinetischen Materialmodell erweitert, welches in der Lage ist, die Kinetik der Umsetzung eines Explosivstoffes unter Berücksichtigung von druck- und temperaturabhängigen Ratenkonstanten abzubilden. Das Modell basiert auf einer Mischungsregel, die jede Zelle in der Simulation in zwei Bereiche einteilt, welche jeweils die festen Edukte (den Explosivstoff) sowie die gasförmigen Reaktionsprodukte enthalten. Der Fortschritt der chemischen Reaktion wird durch eine dimensionslose Größe λ beschrieben, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Dabei bedeutet $\lambda = 0$, dass die Reaktion noch nicht eingesetzt hat und dass die Zelle ausschließlich die Edukte beinhaltet, während $\lambda = 1$ dem Zustand der vollständigen Umsetzung des Explosivstoffes entspricht, sodass die Zelle ausschließlich die gasförmigen Endprodukte enthält. Für die Implementierung des reaktionskinetischen Materialmodells in einer FEM-Simulation muss der Zusammenhang

zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen Druck p , Temperatur T , spezifisches Volumen v sowie innere Energie e in Form einer Zustandsgleichung beschrieben werden. Dazu wird in der Mischungsregel angenommen, dass Druck und Temperatur für die Edukte und die Reaktionsprodukte jeweils gleich sind. Unter dieser Annahme können die gesamte innere Energie und das gesamte spezifische Volumen in einer Zelle anteilig gemäß der Reaktionsfortschrittsvariablen λ berechnet werden.

Als Beispiel zeigt Abbildung 27 den berechneten Verlauf von Reaktionsfortschritt, Druck und innerer Energie im Innern eines Simulationsvolumens, welches aus einer einzelnen Zelle besteht. Darin wird deutlich, dass für einfache Geometrien bereits wichtige Aspekte, wie z. B. der schnelle Anstieg von Druck und innerer Energie zu Beginn der Umsetzung, mit dem Simulationsmodell abgebildet werden können.

Im nächsten Schritt soll am Fraunhofer EMI die Implementierung des Modells auch für beliebige Simulationsgeometrien erfolgen. Durch die allgemeine Formulierung mit druck- und temperaturabhängigen Reaktionsgeschwindigkeiten wurde die Möglichkeit einer Anpassung des Modells für verschiedene Arten von Explosivstoffen vorgesehen. Es wird erwartet, dass dieses Simulationsmodell neue Erkenntnisse über das Verhalten von Explosivstoffen bei thermischer Belastung durch intensive Laserstrahlung ermöglicht. Für Anwendungen in der Sicherheitsforschung kann das Simulationsmodell beispielsweise für eine Vorhersage der Reaktionsstärke sowie für die Optimierung der Laserparameter im Hinblick auf eine kontrollierte Prozessführung bei der Entschärfung von Sprengsätzen mit dem Laser genutzt werden. Die Ergebnisse stellen jedoch auch eine Grundlage dar, wie auch Prozesse mit höheren Laserleistungen und schnelleren Abläufen beschrieben werden können.



27 Berechnung des zeitlichen Verlaufs von Reaktionsfortschritt, Druck und innerer Energie bei der Umsetzung eines Explosivstoffs mit einem reaktionskinetischen Materialmodell.



EXPERIMENTELLE BALLISTIK

EXPERIMENTELLE BALLISTIK

Die Kombination aus hochinstrumentierten Experimenten mit numerischen Simulationen bildet die Basis für die Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Abteilung Experimentelle Ballistik.

Der am EMI entwickelte Hoch-g-Sensor wurde erfolgreich zu einem 3D-fähigen Bauelement weiterentwickelt. Damit steht dem EMI ein neues leistungsfähiges Messwerkzeug zur Verfügung. Der Sensor übertrifft in Bezug auf Eigenfrequenz und Sensitivität die US-Referenzsensoren deutlich und ist in seiner 3D-Konfiguration als monolithischer Hoch-g-Sensor konkurrenzlos am Markt.

Mit dem Ziel der Analyse des Gefährdungspotenzials moderner Energiespeicher im Versagensfall durch Crash oder Beschuss wurden die Untersuchungen an Lithium-Ionen-Akkus weitergeführt. Dies beinhaltete die Untersuchung der Versagensmechanismen sowie die Methodenentwicklung zur Charakterisierung der Systeme in Bezug auf die Anforderungen der Bundeswehr.

Ein weiterer Schwerpunkt der Abteilung lag in den Arbeiten an primärsprengstoffhaltigen Niedrig-Energie-Zündmitteln. Durch neue Anforderungen, wie z. B. die Miniaturisierung von Zündketten, die Verwendung ausschließlich REACH¹-konformer Chemikalien (blei- und chromat-freie Zündmittel), und unter Beibehaltung aller Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen sind diese Komponenten wieder in den Fokus der Forschung geraten. Durch gezielte Experimente mit hochwertiger Diagnostik und der parallel durchgeführten multiphysikalisch gekoppelten Simulation wurde ein vertieftes Verständnis der Funktionsweise der Zündmittel aufgebaut.



Dr. Manfred Salk

Abteilungsleiter Experimentelle Ballistik

Abteilungsleiter bis 31.12.2014

Telefon 0761 2714-120 | manfred.salk@emi.fraunhofer.de



Marek Dolak

Abteilungsleiter Experimentelle Ballistik

Abteilungsleiter seit 1.1.2015

Telefon 07628 9050-730 | marek.dolak@emi.fraunhofer.de

¹ REACH steht für **R**egistration, **E**valuation, **A**uthorisation and **R**estriction of **C**hemicals, Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.

EXPERIMENTELLE BALLISTIK

Charakterisierung und Modellbildung von spröden Materialien für den ballistischen Schutz

Der Schutz der Soldaten in den Einsatzgebieten der Bundeswehr hat von jeher die höchste Priorität. Dies betrifft sowohl den direkten Personenschutz als auch die Transportfahrzeuge für die Einsatzkräfte. Eine besonders aktuelle Bedrohung für Fahrzeuge stellen Anschläge mit Improvised Explosive Devices (IEDs) dar. Dabei sind unterschiedliche Bedrohungsmechanismen wirksam. Neben der reinen Blastwirkung sind es vor allem Projektile und Splitter, die auf das Fahrzeug einwirken. Bei simultanem Impakt von Fragmenten spielt die Problematik von Mehrfachtreffern und die Vorschwächung der Schutzstruktur eine große Rolle. Eine besondere Schwachstelle von Fahrzeugen stellen die Fensteröffnungen dar, wodurch die Auswahl geeigneter transparenter Materialien eine hohe Bedeutung gewinnt. Eine wichtige Forderung, die in diesem Zusammenhang immer wieder erhoben wird, ist die Gewichtsreduzierung von Schutzanordnungen bei möglichst unveränderter oder sogar erhöhter Schutzwirkung. Dies ist nur möglich durch die Verwendung von modernen Materialien mit geringer Dichte und hoher Festigkeit. Für diese Anwendung besonders geeignet sind Keramiken und Gläser speziell im Verbund mit anderen Materialien wie Polymeren und Faserverbundstoffen. Erst durch die Kombination unterschiedlicher Materialeigenschaften kann die gewünschte hohe Schutzwirkung erreicht werden. Keramiken können sowohl im Personenschutz, beispielsweise bei Schutzwesten, als auch im Fahrzeugschutz eingesetzt werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Schutz als integrale Aufgabe aufzufassen ist und gegen ein breites Spektrum aus verschiedenen Bedrohungen wirksam ausgelegt sein muss (polyvalenter Schutz). Zur Auslegung dieser Schutzanordnungen ist es notwendig, das hochdynamische Verhalten der einzelnen Materialien genau zu verstehen und ausreichend validierte Materialmodelle für eine simulative Analyse zur Verfügung zu stellen. Im Folgenden wird am Beispiel einer transparenten Panzerung dargestellt, wie dieses Ziel vom Aufbau geeigneter Anlagen zur Materialcharakterisierung bis zur numerischen Simulation der Schutzwirkung erreicht werden kann.

Auslegung ballistischer Schutzanordnung im Experiment

Für die Untersuchung der Vorgänge in transparenten Schutzanordnungen werden Glaslamine bezüglich Abmessungen und Dicke so ausgelegt, dass beim Beschuss einerseits ähnliche Bedingungen wie in real eingesetzten Schutzscheiben herrschen, und andererseits für die Schutzwirkung relevante Größen wie die Schädigung und Verformung der einzelnen Glasschichten während der Projektileindringung gemessen werden können. Abbildung 1 zeigt ein beschossenes Glaslaminat (Schussrichtung von links nach rechts), das aus vier Glasschichten und einer Polycarbonatplatte an der Rückseite besteht. Im Hintergrund ist eine Hochgeschwindigkeitskamera mit telezentrischem Objektiv zu erkennen, mit der die Schädigung der einzelnen Schichten bei seitlichen Abmessungen des Laminats von 500 Millimeter x 500 Millimeter während der Wechselwirkung mit dem Projektil beobachtet wurde.

Neben den Visualisierungsverfahren wurde eine optische Methode zur Messung der Biegung der einzelnen Glasschichten während der Projektileindringung entwickelt, die auf der Photonic Doppler Velocimetry (PDV) basiert. Aufgrund der hohen Zahl der Parameter wie z. B. der Anzahl, Dicke und Art der Glas- und Klebeschichten wäre eine Optimierung auf rein experimenteller Basis zu aufwendig.

Dynamisches Materialverhalten von spröden Schutzwerkstoffen

Eine effizientere Vorgehensweise wird durch die Kombination der experimentellen Untersuchungen mit numerischen Simulationen erreicht. Auf der einen Seite bilden die Versuchsergebnisse eine Basis zur Validierung und Weiterentwicklung des Simulationsmodells, auf der anderen Seite ermöglichen die Simulationen eine Visualisierung von experimentell nicht zugänglichen Messgrößen und tragen zu einem besseren Verständnis der ablaufenden, relevanten Prozesse bei. Zusätzlich eröffnet ein validiertes Simulationsmodell die Möglichkeit, kosten- und zeitsparend den Einfluss verschiedenster Parameter, wie z. B. Dicke und Anzahl der Glaslaminat-Schichten, zu bewerten.

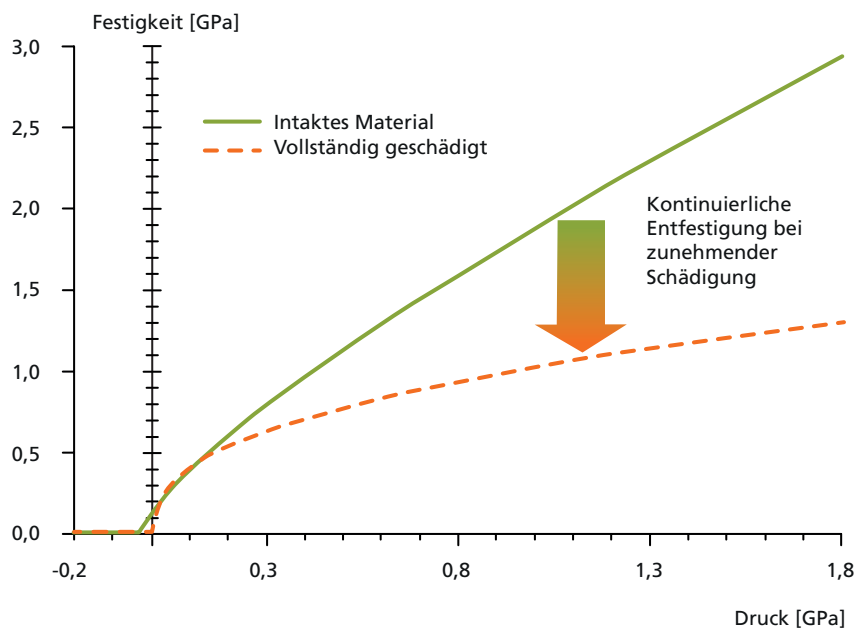
Die korrekte Vorhersage der im Glas ablaufenden Prozesse ist entscheidend für ein realistisches Simulationsergebnis. Deshalb müssen charakteristische Eigenschaften wie die hohe Festigkeit unter Druck, das spröde Verhalten und die Rissbildung vom Simulationsmodell wiedergegeben werden können. Es existieren bereits mehrere Modellansätze, wie z. B. JH1, JH2 (Johnson-Holmquist) und JHB (Johnson-Holmquist-Beissel), die die genannten Aspekte des Materialverhaltens berücksichtigen. Dies gelingt mithilfe einer polynomischen Zustandsgleichung sowie zwei analytischen Funktionen zur Beschreibung der druckabhängigen Festigkeiten von intaktem und geschädigtem Material bis zu Drücken im GPa-Bereich. Dabei erfolgt die Quantifizierung der Schädigung durch einen Parameter D , der für jeden einzelnen Zeitschritt der Simulation berechnet und inkrementiert wird. Bei vollständig intakten Elementen ist $D = 0$, wohingegen komplett geschädigtes Material durch den maximalen Wert von $D = 1$ gekennzeichnet wird. Noch nicht vollständig geschädigten Elementen ($0 < D < 1$) wird eine reduzierte Festigkeit gegenüber intaktem Material zugewiesen, welche sich durch eine Interpolation aus den Festigkeitskurven von $D = 0$ und $D = 1$ ergibt (siehe Abbildung 2, nächste Seite).



1 Schutzwirkung von Glaslaminaten beim Projektilimpakt.

Materialcharakterisierung im hochdynamischen Lastbereich

Die Komplexität von Penetrationsvorgängen mit Glaslaminat-Zielen macht eine direkte Kalibrierung sämtlicher Modellparameter unmöglich. Eine ausgezeichnete Methode, einzelne Materialeigenschaften im hochdynamischen Lastbereich zu bestimmen, bietet allerdings der Planar-Platten-Impakt (siehe Abbildungen 3a und 3b auf der nächsten Seite). Durch den planaren Beschuss einer Probenplatte mit Projektilplatten aus Glas oder zuvor charakterisierten Materialien können im Glas definierte einachsige Belastungszustände erzeugt werden. Eine zeitlich sehr hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessung der Stoßwellen im Probenmaterial mittels PDV ermöglicht anschließend, Rückschlüsse auf einzelne Modellparameter zu ziehen, wie beispielsweise den Fließpunkt unter einachsiger Dehnung, das sogenannte Hugoniot-Elastic-Limit (HEL).

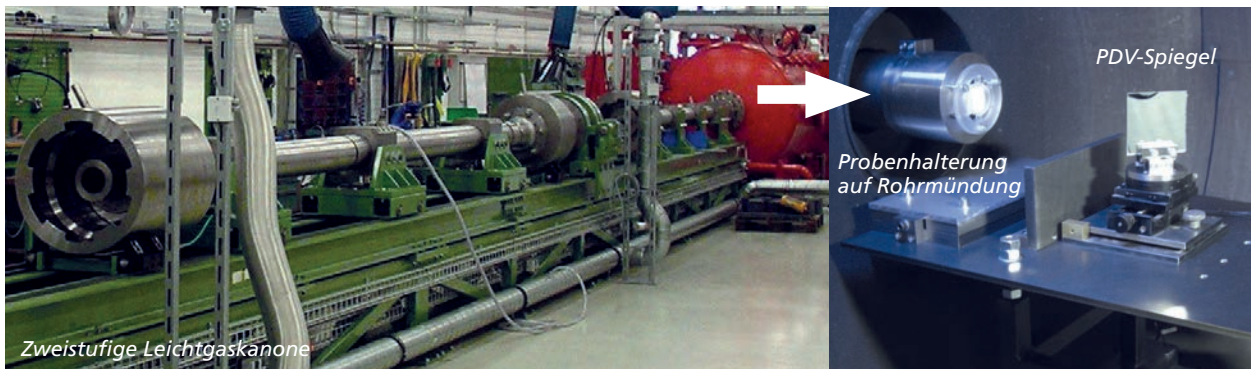


2 Charakteristisches Festigkeitsverhalten von spröden Materialien unter hohen Drücken: Im JH2-Modell erhöht sich die Von-Mises-Vergleichsspannung mit ansteigendem Druck. Mit zunehmender Schädigung verliert das Material kontinuierlich an Festigkeit. Vollständig geschädigtes Material besitzt keine Zugfestigkeit mehr.

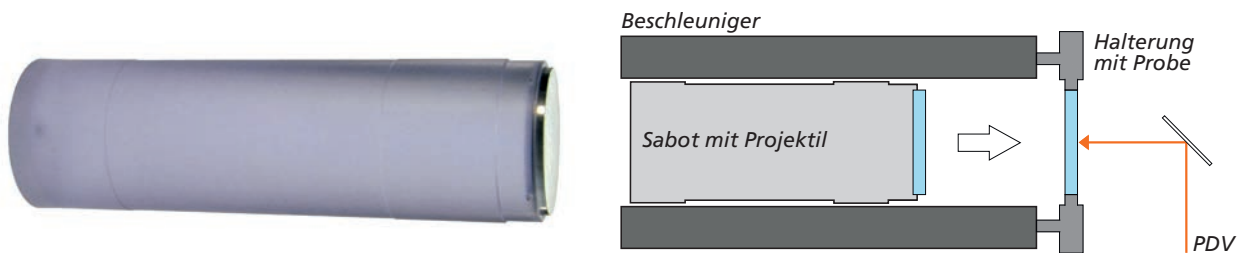
Abbildung 4 zeigt charakteristische PDV-Geschwindigkeitssignale auf der Rückseite einer Glasprobe bei einem realen, bzw. simulierten Planar-Platten-Impakt.

Simulation einer Glaslaminat-Schutzanordnung

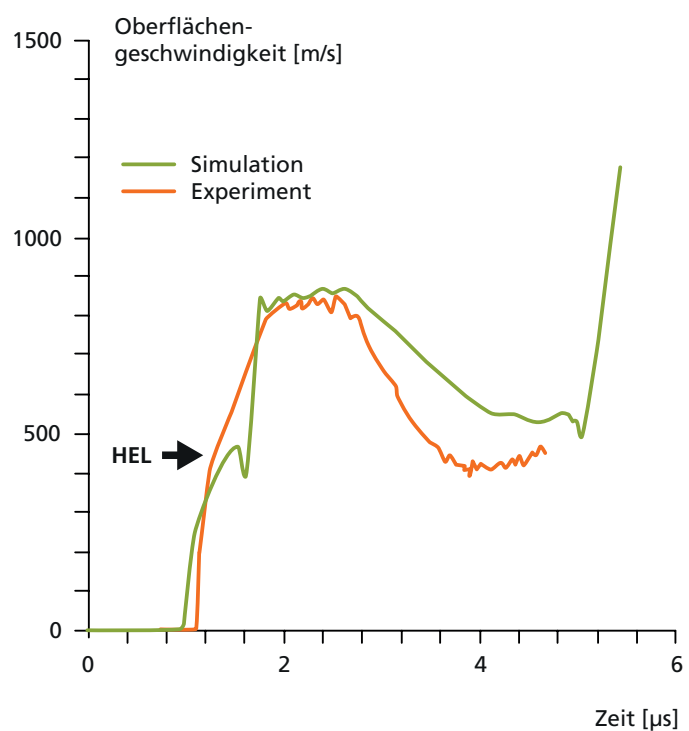
Als Beispiel für die Simulation einer Verbund-Schutzanordnung bestehend aus Glas und Polycarbonat ist in Abbildung 5 das Ergebnis einer axialsymmetrischen Simulation dargestellt. In diesem Fall dringt ein 7,62-mm-AP-Projektil mit einer Auftreffgeschwindigkeit von 805 Metern pro Sekunde in ein Glaslaminat-Target, bestehend aus vier Glasschichten und einer Polycarbonatschicht, ein. Die Schädigung im Glas wird durch den Konturplot des Parameters D visualisiert. Während das in schwarz dargestellte Wolframcarbid-Projektil in das Target eindringt, breiten sich, ausgehend von der Symmetrieachse, Schädigungsfronten radial zum Targetrand hin aus. Dabei setzt in der ersten Laminatschicht die Schädigung auf der Vorderseite der Platte ein, wohingegen in den anderen drei Glasschichten die Schädigungsfront sich entgegen der Schussrichtung bewegt. Auch im Experiment kann ein ähnliches Verhalten beobachtet werden, allerdings setzt dort die Schädigung ungefähr 8 bis 19 Mikrosekunden später ein. Nichtsdestotrotz ergibt ein Vergleich der simulierten Projektilposition mit dem Einsetzen der Schädigung im Experiment eine sehr starke Korrelation.



3a Planar-Platten-Impakthanlage zur Materialcharakterisierung im hochdynamischen Bereich.



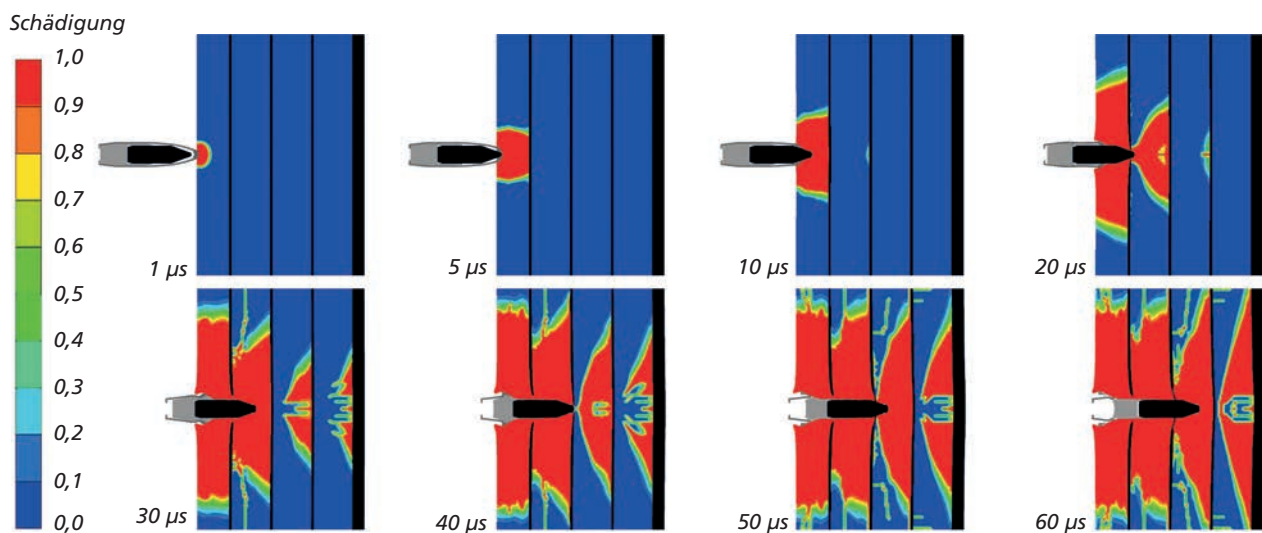
3b Sabot mit Projektilplatte (links) sowie die schematische Darstellung eines Planar-Platten-Impakt-Versuchs (rechts).



4 Charakteristisches PDV-Geschwindigkeitssignal bei einem Planar-Platten-Impakt mit zwei Glasproben.

Fazit

Am Beispiel einer transparenten Schutzanordnung wurde aufgezeigt, welche Schritte für eine Charakterisierung von spröden Materialien für den ballistischen Schutz notwendig sind. Die Kenntnis der Materialeigenschaften unter hohen dynamischen Belastungen ist Voraussetzung für eine prognosefähige Simulation zur Unterstützung der Auslegung von ballistischem Schutz. Ein Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse hat gezeigt, dass insbesondere für die Vorhersage der Schädigung der Materialien verbesserte Modelle erforderlich sind. Dies gilt in gleichem Maße auch für den nicht transparenten Schutz mit Keramiken wie Aluminiumoxid, Siliziumcarbid und Borcarbid.



5 Simulierte Glasschädigung beim Penetrationsvorgang eines AP-Projektils in ein Glaslaminat-Target; vollständig geschädigtes Glas ($D = 1$) ist in den Konturplots rot dargestellt. Nach ungefähr 60 Mikrosekunden sind praktisch alle Glaselemente im Bereich der Schussachse zerstört.

Entwicklung eines hochschockfesten monolithischen 3D-Beschleunigungssensors

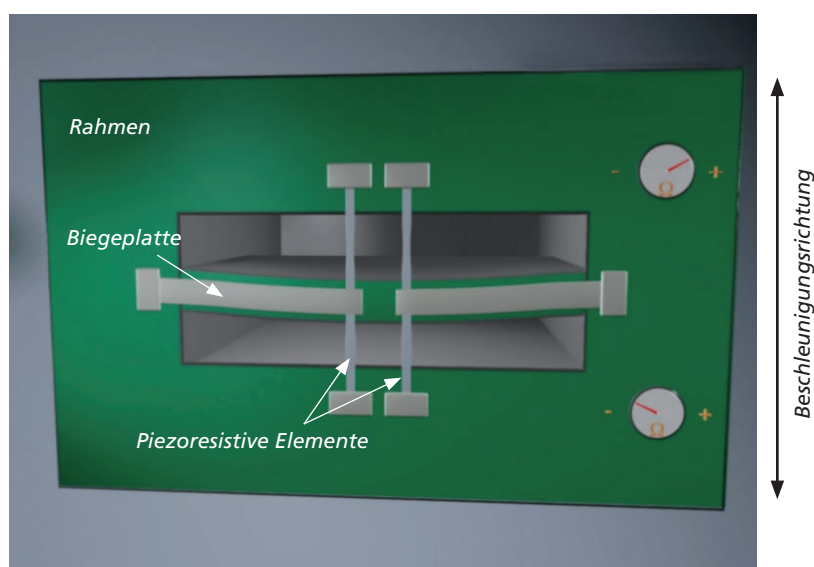
In den vergangenen Jahren wurde am EMI die Entwicklung eines hochschockfesten Beschleunigungssensors vorangetrieben, der für verschiedene Messaufgaben in der kurzzeitdynamischen Forschung geeignet ist. Dies umfasst unter anderem die hochdynamische Materialcharakterisierung, die Untersuchung von Blast- und Impaktereignissen sowie die Entwicklung hochschockfester Zünderkomponenten. Die dabei auftretenden Beschleunigungen von über 100 000 g können von dem neuen Sensor zuverlässig gemessen werden.

Für die genannten Untersuchungen ist es in der Regel ausreichend, wenn der Sensor in der Lage ist, die Beschleunigung in eine Raumrichtung zu messen (»1D-Sensor«). Dies liegt vor allem daran, dass unter Laborbedingungen die Krafteinleitung auf den Prüfling definiert erfolgt und somit die Beschleunigungsrichtung bekannt ist. In Freifeldversuchen, komplexen Testaufbauten und vor allem in der Anwendung kann die Bewegung des Prüflings jedoch nicht immer vorhergesagt werden. Hier ist es wichtig, die Beschleunigung in allen drei Raumrichtungen zu erfassen. Eine Möglichkeit ist es, drei 1D-Sensoren jeweils senkrecht zueinander auf einem Adapterblock zu montieren und

diesen mit dem Prüfling zu verbinden. Diese Methode benötigt jedoch relativ viel Platz und Gewicht und ist verhältnismäßig teuer. Technisch eleganter ist die monolithische Integration der drei Messrichtungen auf einem Sensorchip, was allerdings mit einem entsprechenden Entwicklungsaufwand einhergeht. Am EMI wurde die zweite Lösungsvariante gewählt und basierend auf dem existierenden 1D-Sensor eine 3D-Version entworfen. Beide Sensoren werden im Folgenden vorgestellt.

1D-Sensor

Neben optischen Verfahren werden zur Beschleunigungsmessung im Wesentlichen Sensoren auf MEMS-Basis (Mikroelektromechanische Systeme) eingesetzt. Der entwickelte 1D-Sensor ist ein MEMS, das sich den piezoresistiven Effekt zur Beschleunigungsmessung zu Nutze macht. Abbildung 6 zeigt schematisch die Geometrie des Sensors. Die funktionsgebenden Komponenten sind die Biegeplatte und die (piezoresistiven) Widerstände, die beide aus demselben Silizium-Einkristall herausgearbeitet werden und somit besonders stabil verbunden sind. Wirkt eine Beschleunigung, so wird die Platte aus ihrer Ruhelage ausgelenkt, wobei die Durchbiegung in der Mitte der vorderen Kante am stärksten ausgeprägt ist. An dieser Stelle sind die piezoresistiven Widerstände angebracht und überspannen freitragend die beiden, die Platte definierenden Gräben.



6 Schematischer Aufbau des Sensors. Die Widerstände sind an der Stelle der größten Auslenkung der Platte angebracht, um maximale Sensitivität zu erreichen.

Das Messsignal entsteht dadurch, dass bei der Auslenkung der Platte die piezoresistiven Elemente gestreckt bzw. gestaucht werden und sie somit ihren Widerstand messbar ändern. Sie sind elektrisch zu einer Wheatstone'schen Vollbrücke verschaltet, um die Bewegung der Platte hochgenau aufzeichnen zu können.

Die Ausdehnung der Biegeplatte liegt in der Größenordnung von wenigen hundert Mikrometern und kann auf den gewünschten Messbereich angepasst werden. Die piezoresistiven Elemente sind die filigransten Strukturen des Sensors und haben einen Durchmesser von wenigen Mikrometern. Die Außenmaße des Sensorelements liegen in der Größenordnung von wenigen Millimetern. Abbildung 7 zeigt eine Aufnahme des Siliziumchips unter einem Lichtmikroskop. Zu erkennen sind die Aluminiumkontakte, die die elektrische Schnittstelle zur Außenwelt darstellen, sowie die Gräben, die die Biegeplatte definieren. Die Sensorchips werden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer EMFT gefertigt.

Damit das Siliziumelement als Sensor verwendet werden kann, wird es mit einem Mehrlagen-Keramikverfahren (LTCC) gehäust. Das so gefertigte Keramikpackage, welches zusammen mit dem Fraunhofer IKTS entwickelt wurde, erfüllt die Anforderungen an mechanische Robustheit und erlaubt verschiedene Kontaktierungslösungen, z. B. die Nutzung des Sensors als SMD-Bauteil (Surface Mounted Device). Abbildung 8 zeigt das Gehäuse aufgelötet auf eine Testplatine. Es besitzt eine Höhe von 2 Millimetern bei einer Grundfläche von 3 x 6 Quadratmillimetern.

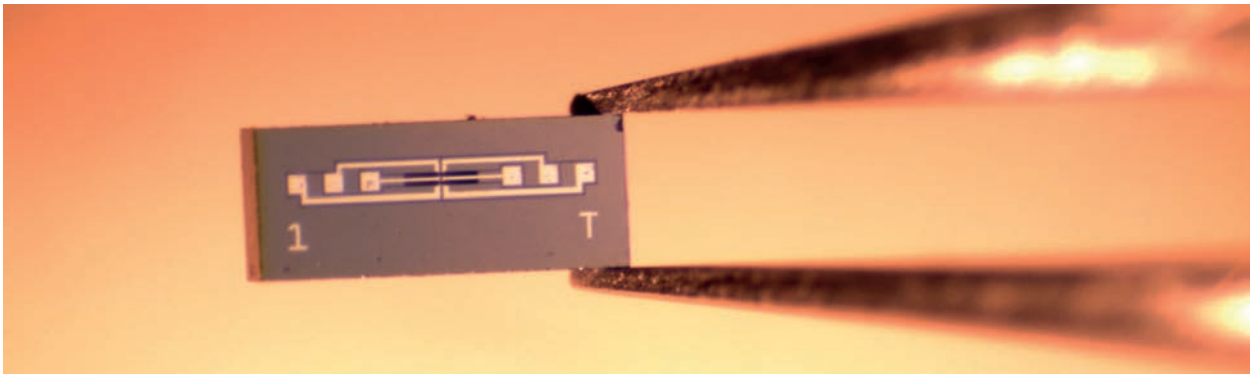
Durch die spezielle Geometrie des Siliziumchips kann im Innern des Packages kein Standardaufbau angewendet werden. Die Lösung bietet hier ein innovatives Direktschreibverfahren für Mikro-Leiterbahnen. Abbildung 9 zeigt das Innere des Gehäuses aus Abbildung 8 in Vergrößerung. Der Chip ist auf die blaue Trägerkeramik geklebt und seine elektrischen Kontakte zeigen nach vorne. Dadurch ist eine 90°-Umkontaktierung auf die elektrischen Anschlüsse der Keramik notwendig, die mit dem neuen Direktschreibverfahren umgesetzt wird. Damit ist der EMI-Sensor das weltweit erste aufrecht stehende MEMS, das mit gedruckten Leiterbahnen kontaktiert ist.

Eigenschaften 1D-Sensor

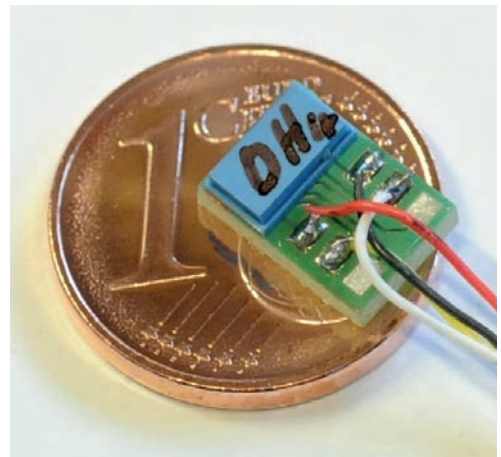
Die wichtigsten Eigenschaften des 1D-Sensors wurden charakterisiert. Zentral sind dabei die Werte, die für Sensitivität und Eigenfrequenz erreicht werden, da diese entscheidend für die Messqualität des Sensors bei kurzzeitdynamischen Vorgängen sind. In Tabelle 1 werden die Eigenschaften mit zwei piezoresistiven Sensoren, die im Schock-Test-Bereich derzeit als Referenzen angesehen werden, verglichen. Das EMI-Design zeichnet sich dabei in Hinsicht auf Sensitivität und Eigenfrequenz durch höhere Werte aus und ist damit den Referenzen in zwei zentralen Merkmalen überlegen. Zudem kann der EMI-Sensor aufgrund seiner Geometrie relativ einfach zu einem 2D- bzw. 3D-Konzept erweitert werden.

	Referenz A	Referenz B	Fraunhofer EMI
Sensitivität	0,09 $\mu\text{V/V/g}$	0,21 $\mu\text{V/V/g}$	0,50 $\mu\text{V/V/g}$
Resonanzfrequenz	1,34 MHz	164 kHz	1,50 MHz
Einfache 2D-/3D-Integration?	Nein	Nein	Ja

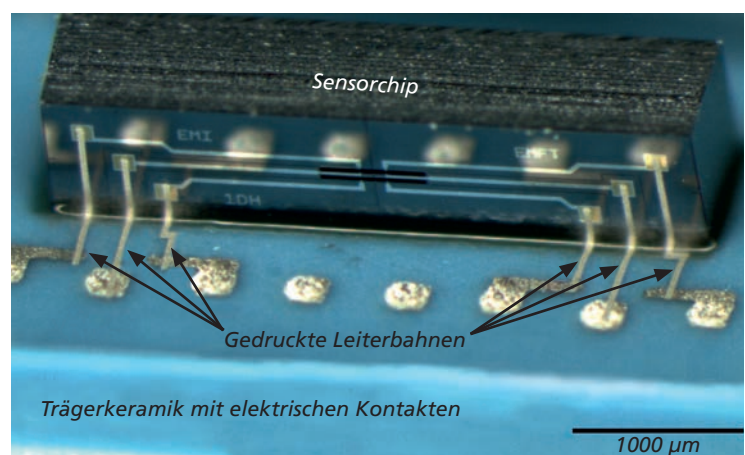
Tabelle 1 Vergleich der Eigenschaften des EMI-1D-Sensors mit Referenzsensoren.



7 Foto des Sensorchips unter einem Lichtmikroskop. Die hellen Flächen sind aluminiumbeschichtet und dienen der Kontaktierung. Die schmalen dunklen Bereiche in der Mitte des Chips sind die Gräben, welche die Biegeplatte definieren. Die piezoresistiven Brücken sind aufgrund ihrer geringen Größe nicht zu erkennen.



8 Foto des Keramikpackages. Es ist SMD-lötfähig und hat eine flache und damit mechanisch stabile Bauform.



9 Der mit einem Direktschreibverfahren kontaktierte Sensorchip. Zu beachten ist, dass die Leiterbahnen einen 90°-Winkel durchlaufen, um von der Vorderseite des Chips auf die Trägerkeramik zu gelangen (Bild: Fraunhofer IKTS).

3D-Sensor

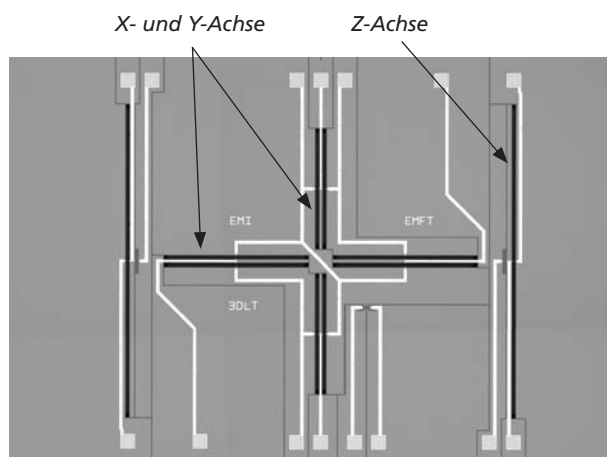
Mit dem EMI-Design ist es möglich, eine monolithische Integration mehrerer Messrichtungen (2D und 3D) auf einem Chip zu realisieren und somit kostengünstig die Messmöglichkeiten des Sensors zu vergrößern. Abbildung 10 zeigt den neuen 3D-Siliziumchip. In der zentralen Region sind die Fühlelemente von zwei 1D-Sensoren senkrecht zueinander angeordnet und elektrisch verschaltet. Sie messen Beschleunigungen in der Bildebene (X- und Y-Richtung). Links und rechts befinden sich Elemente, die für die Bewegung senkrecht zur Bildebene (Z-Richtung) verantwortlich sind. Auch für diesen Sensor wurde ein Mehrlagen-Keramikgehäuse entwickelt, welches in Abbildung 11 zu sehen ist.

Experimentelle Charakterisierung der Sensoren

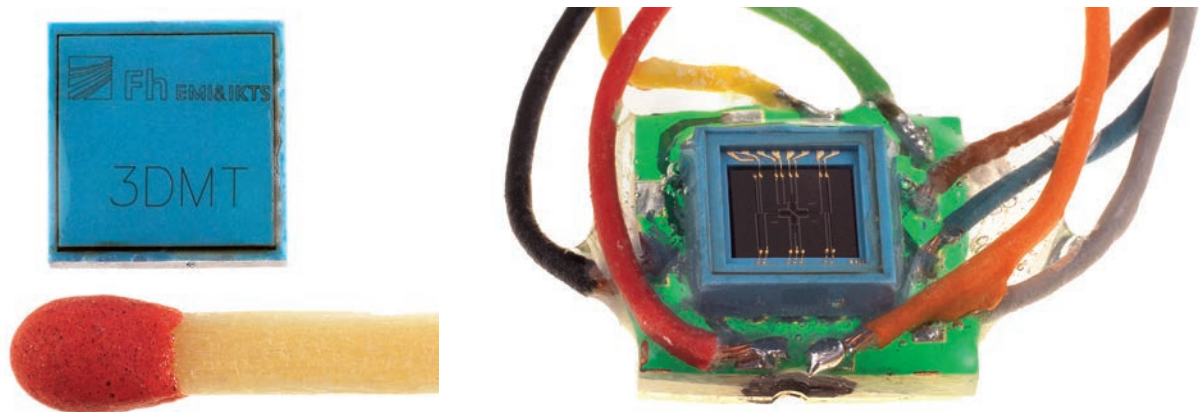
Die experimentelle Charakterisierung und Kalibrierung der Sensoren stellt eine besondere Herausforderung dar. Das einzige System, das für diese Zwecke ausreichend reproduzierbare und definierte Hoch-g-Belastungen im Labormaßstab produzieren kann, ist der Hopkinson-Stab. Er ist das Standardverfahren zum Testen von 1D-Schocksensoren und wurde dementsprechend zur Charakterisierung der 1D-Variante eingesetzt.

Bei dieser Testmethode wird der Sensor auf dem Ende eines langen, homogenen Stabes befestigt (siehe Abbildung 12), in den eine mechanische Welle eingekoppelt wird. Die Welle durchläuft den Stab – in unserem Fall bestehend aus Titan – bis zum Sensor und beschleunigt diesen in unter 30 Mikrosekunden auf eine Geschwindigkeit von einigen Metern pro Sekunde. Dabei treten Beschleunigungen von bis zu 100 000 g auf. Die Testpulse lassen sich mit hoher Reproduzierbarkeit erzeugen. Abbildung 13 zeigt eine Messung, bei der eine Beschleunigungsamplitude von über 100 000 g in positiver wie negativer Messrichtung erreicht wird. Das Messsignal des Sensors wird dabei mit einem optischen Referenzsystem, einem sogenannten Laser-Vibrometer (vgl. Abbildung 12), verglichen, welches berührungslos die vorliegende Beschleunigung mit hoher Genauigkeit bestimmt. Die beiden Messkurven stimmten sehr gut überein und belegen die hohe Signaltreue des EMI-Sensors. Nach der initialen Beschleunigung (positiver und negativer Peak), unterscheiden sich die Signale, da das System etwas anders nachschwingt als der Sensor.

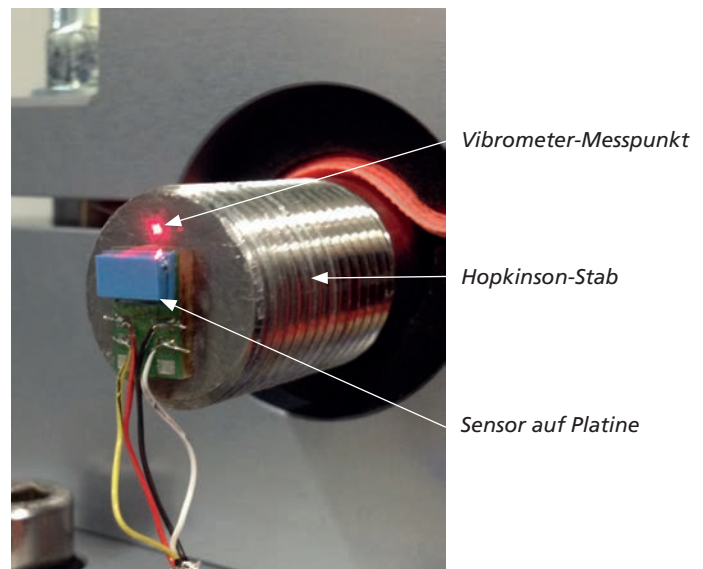
Für die 3D-Sensoren kann die Kalibrierung im Prinzip am gleichen System durchgeführt werden. Das Konzept besteht schlicht darin, den Sensor einmal in jeder Achse zu belasten. Falls möglich, misst man zusätzlich die Beschleunigung in Querrichtung und erhält die Querempfindlichkeit der Sensorachsen als weiteren Messwert. In der Praxis stellt sich dieser Ansatz allerdings als durchaus schwierig dar. Dadurch, dass der Sensor in einem SMD-Gehäuse vorliegt, muss er auf eine Testplatine aufgelötet werden, welche nicht einfach auf ihren Seitenflächen am Hopkinson-Stab befestigt werden kann. Zur Charakterisierung des 3D-Sensors wurde deshalb ein Adapter konstruiert, auf dem der Sensor für eine Belastung in alle drei Raumrichtungen fixiert werden kann. Abbildung 14 (nächste Seite) zeigt den Aufbau.



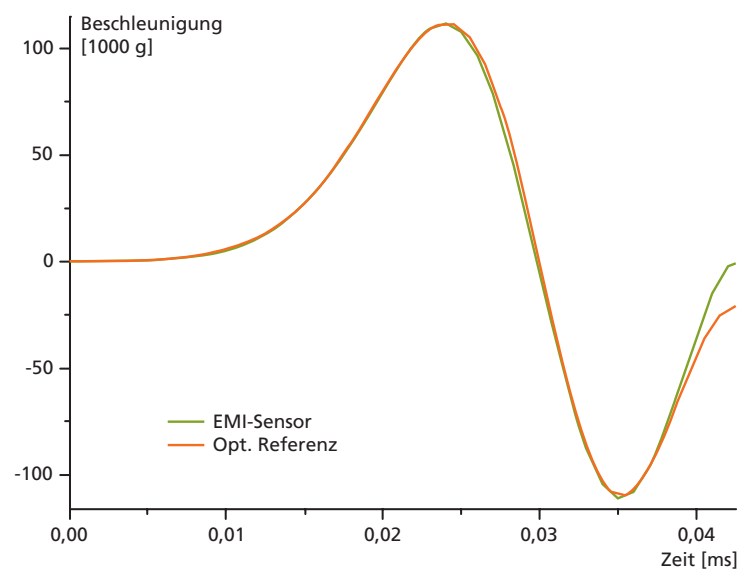
10 Siliziumchip des 3D-Beschleunigungssensors. In der zentralen Region sind die Grundelemente von zwei 1D-Sensoren senkrecht zueinander angeordnet und erlauben so die Messung in X- und Y-Richtung. Außen befinden sich Strukturen für die Messung der Z-Beschleunigung.



11 3D-Sensor im Keramikgehäuse (links). Rechts ist der Sensor mit offenem Gehäuse festgelötet auf einer Testplatine zu sehen.



12 1D-Sensor auf einem Hopkinson-Stab. Das hier gezeigte Ende des Stabs führt eine ruckartige Bewegung aus, die vom Sensor als kurze Beschleunigung wahrgenommen wird. Ein Laser-Vibrometer wird zur Referenzmessung genutzt.



13 Beschleunigungsmessung des EMI-Sensors und der Referenz auf dem Hopkinson-Stab. Die Kurven stimmen sehr gut überein und bestätigen den Messbereich des Sensors mit über 100 000 g in positiver und negativer Richtung.

Die Nutzung eines Adapters hat allerdings den Nachteil, dass der Belastungspuls des Stabs nicht mehr homogen ist. Die den Stab durchlaufende mechanische Welle wird durch den Adapter gestört und nicht mehr ideal reflektiert. Dadurch wird die wirkende Beschleunigung verzerrt und verliert an Reproduzierbarkeit. Zudem treten verstärkt zusätzliche Querbeschleunigungen am Stab auf, die in der 1D-Konfiguration nicht relevant sind. Abbildung 15 zeigt je eine Messung pro Achse für den 3D-Sensor. Dabei ist die Messung der Z-Achse in der normalen Konfiguration erfolgt (vgl. Abbildung 14), und für die X- und Y-Achse wurde der Sensor an der Adapterseite befestigt. Als Referenzmessung wurde in der zweiten Konfiguration ein 1D-Sensor auf die Stirnseite des Stabs geklebt.

Trotz des problematischen Verhaltens des Adapters konnten erste Werte für die Sensitivitäten der Achsen des 3D-Sensors bestimmt werden. Diese sind in Tabelle 2 aufgelistet und als erste Anhaltspunkte zu verstehen. Die Werte liegen im Bereich des Design-Ziels von $0,5 \mu\text{V/V/g}$.

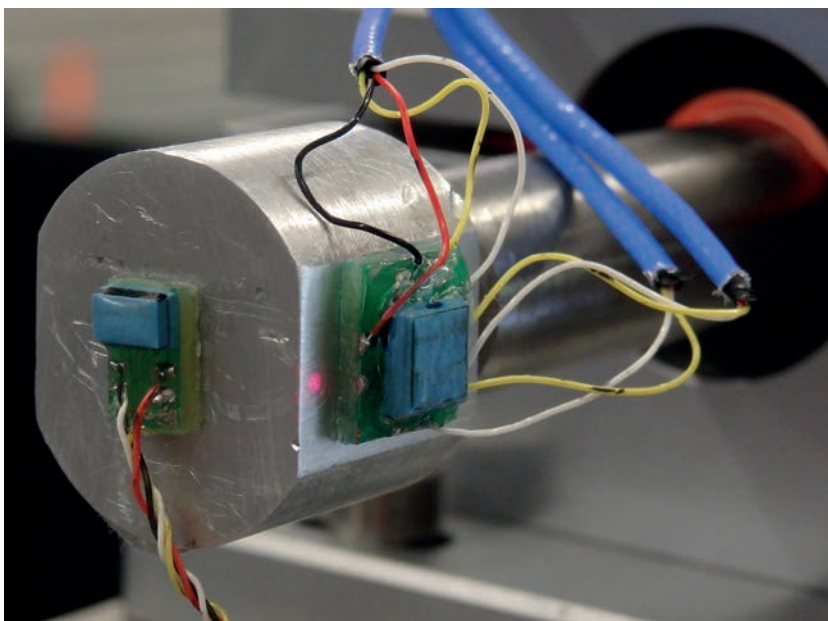
Zusammenfassung

Mit dem bereits existierenden Hoch-g-Sensor und dessen erfolgreicher Weiterentwicklung zu einem 3D-fähigen Bauelement steht der deutschen und europäischen Industrie sowie den Forschungseinrichtungen ein neues, leistungsfähiges Messwerkzeug zur Verfügung. Der Sensor übertrifft in Bezug auf Eigenfrequenz und Sensitivität die US-Referenzsensoren deutlich und hat in seiner 3D-Konfiguration als monolithischer Hoch-g-Sensor kein Pendant am Markt.

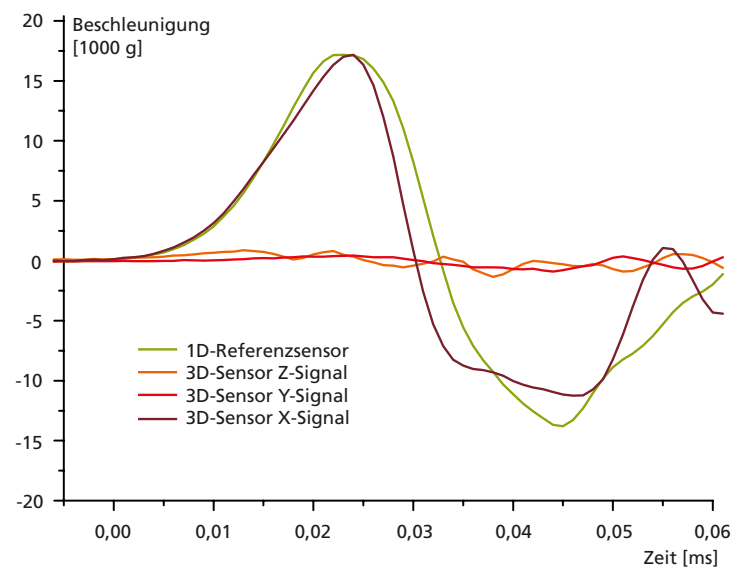
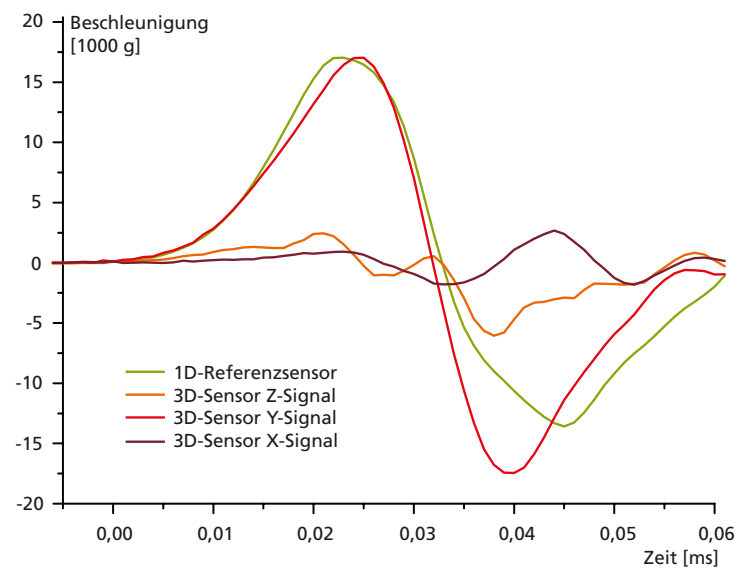
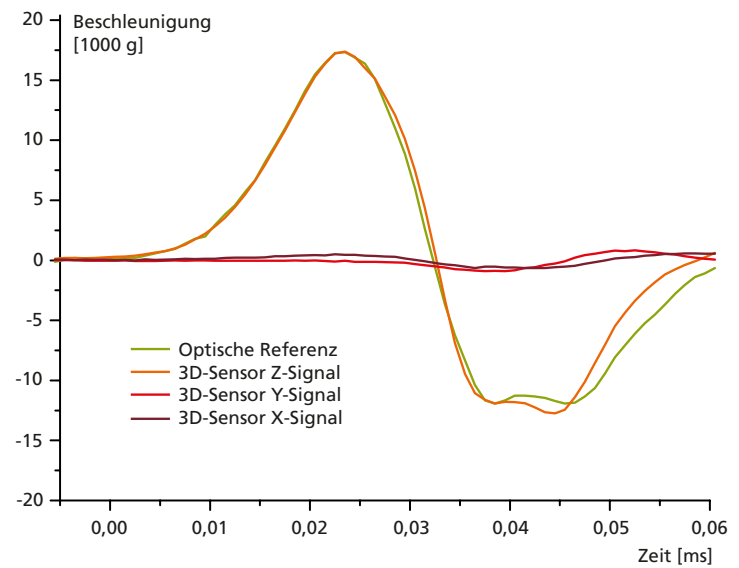
Eine besondere Herausforderung ist die exakte quantitative Bestimmung der Eigenschaften des 3D-Designs, da hierfür noch keine idealen Testaufbauten existieren. Wichtig ist dabei neben der Sensitivitätsbestimmung die Analyse der Querempfindlichkeiten der drei Achsen zueinander.

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
Sensitivität	$0,5 \mu\text{V/V/g}$	$0,3 \mu\text{V/V/g}$	$0,6 \mu\text{V/V/g}$

Tabelle 2 Erste Sensitivitätswerte des 3D-Sensors.



14 Hopkinson-Stab mit Adapter für 3D-Sensoren. Ein 1D-Sensor ist auf der Stirnseite des Stabs (also in normaler Konfiguration zur Messung der ‚Z-Achse‘) und ein 3D-Sensor auf der Seite des Adapters aufgebracht. So kann letzterer in ‚X-Richtung‘, bzw. um 90° gedreht in ‚Y-Richtung‘, belastet werden.



15 Messungen am Hopkinson-Stab mit jeweils einer der Achsen des 3D-Sensors ausgerichtet in Hauptbelastungsrichtung. Die Signale sind für eine erste Sensitivitätsbestimmung ausreichend.

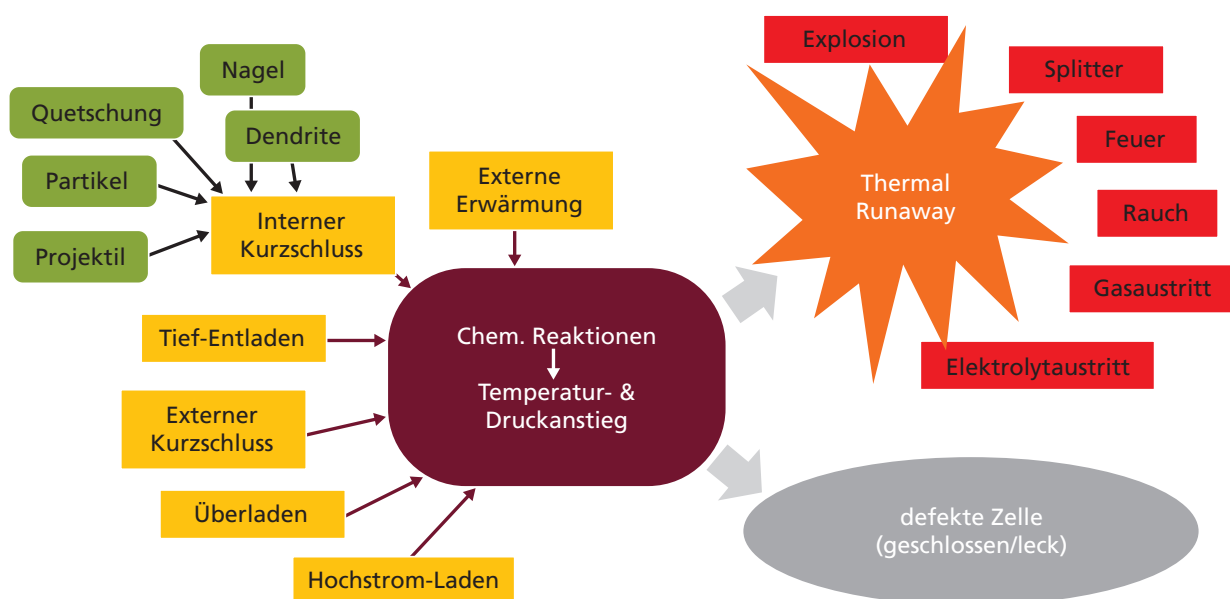
Sicherheit elektrischer Energiespeicher im Versagensfall

Die rasante Entwicklung neuer elektrischer Energiespeicher im zivilen Bereich bietet für die Bundeswehr neue Möglichkeiten, bei gleicher Energieversorgung Gewicht und Platz zu sparen, bzw. neue Funktionalitäten anzustreben. Daher finden elektrische Energiespeicher auf allen Plattformen, von am Körper getragenen Batteriepacks bis hin zu Traktionsbatterien in Fahrzeugen zunehmend Verbreitung. Allerdings zieht die steigende Energiedichte der Speicher ein entsprechend höheres Gefährdungspotenzial nach sich, was im wehrtechnischen Bereich besonders zum Tragen kommt, da die hierfür spezifischen Gefahren, verursacht insbesondere durch Beschuss oder erhöhte mechanische Belastung (Crash), meist nicht durch zivile Testprozeduren abgedeckt werden. Unfälle mit den Speichern oder Treffer der Speicher im Ernstfall können unkontrollierte Energiefreisetzung und damit Abbrand, giftige Gasentwicklung oder im schlimmsten Fall sogar die Explosion des gesamten Energiespeichers nach sich ziehen. Je nach Lage und Größe der Speicher sowie Umgebung und Position der Soldaten ergeben sich hieraus erhebliche Gefährdungen. Daher ist eine Analyse sowohl der bislang unbekannten Versagensmechanismen als auch der Bedingungen/Belastungen, die zu bestimmten Reaktionen führen, von großer Bedeutung.

Beides ist für ein Verständnis des Gefährdungspotenzials und die Erarbeitung effektiver Schutzmaßnahmen notwendig.

Abbildung 16 zeigt schematisch mögliche Reaktionsverläufe, die zu einer unkontrollierten Energiefreisetzung (Thermal Runaway) führen können. Verschiedenste äußere Anlässe, die von falscher Bedienung beim Laden (Überladen) über Unfälle (mechanische Verformung) bis hin zum Beschuss reichen, können im Innern einer Li-Ionen-Zelle exotherme chemische Reaktionen anregen und so einen Temperatur- und Druckanstieg innerhalb der Zelle hervorrufen. Dies wiederum kann weitere Zersetzungsprozesse innerhalb der Zelle anstoßen und schließlich zum sogenannten Thermal Runaway führen. Die Gefährlichkeit eines solchen Vorgangs wird aus der Tatsache ersichtlich, dass die durch die chemischen Umsetzungen maximal freiwerdende Energie typischerweise eine Größenordnung größer ist als die technisch nutzbare elektro-chemische Energie einer Zelle.

Am Fraunhofer EMI werden aktuell unterschiedliche Untersuchungen an Li-Ionen-Akkus durchgeführt, um das Gefährdungspotenzial und die Reaktionsmechanismen dieser Energiespeicher im Versagensfall (Crash, Beschuss)



16 Ablaufschema des Zellversagens. Unterschiedlichste äußere oder innere Ereignisse (gelb) können im Innern der Zelle chemische Reaktionen anregen, die einen Temperatur- und Druckanstieg nach sich ziehen. Bei hinreichend großer Temperaturzunahme resultiert hieraus ein Thermal Runaway.

zu analysieren. Gleichzeitig werden Methoden zur Charakterisierung der Systeme in Bezug auf die speziellen Anforderungen der Bundeswehr entwickelt.

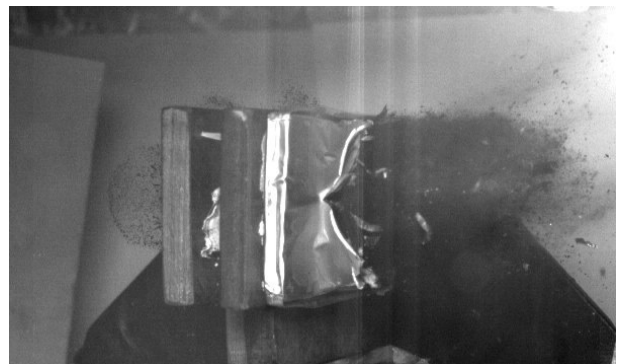
In einer Versuchsserie zur Untersuchung von Li-Ionen-Pouchzellen wurden geladene und entladene Zellen in unterschiedlichen Konfigurationen beschossen. Der Vorgang wurde mit High-Speed-Kameras aufgezeichnet, sowie Spannung und Zelltemperatur gemessen. Abbildung 17 zeigt beispielhaft zwei High-Speed-Aufnahmen. Links ist der Durchschuss einer frei aufgehängten vollständig geladenen Li-Ionen-Zelle in Pouchzellenbauweise zu sehen. Rechts der Schuss auf eine Zelle, an deren Rückseite eine Stahlplatte angeordnet war. Die Projektile waren DM111-Geschosse, die mit einer Geschwindigkeit von ca. 850 Metern pro Sekunde im Ziel auftrafen.

Die frei hängende Zelle wird vom Projektil durchschlagen, wobei es zum Austritt von Zellmaterial kommt (Abbildung 17, links). Abbildung 18 (nächste Seite) zeigt den dazugehörigen Spannungsverlauf der Zelle während des Durchschusses. Beim Durchschlagen der Zelle bricht die Spannung zwar kurzzeitig ein, sie steigt danach jedoch sofort wieder auf Normalniveau an. Dies zeigt, dass es nicht zu einem dauerhaften Kurzschluss der Zelle durch die mechanischen Verformungen gekommen ist. Die Zelle bleibt nach dem Durchschuss geladen und ist im Prinzip weiter funktionsfähig, wenn auch mit verminderter Kapazität. Da kein dauerhafter Kurzschluss mit nachfolgender Entladung erzeugt wird, kommt es auch nicht zu chemischen Nachfolgereaktionen. Es kam weder zu einer Temperaturerhöhung noch zu Rauchbildung oder Brand.

Eine Gefährdung entsteht ausschließlich durch die freigesetzten gesundheitsschädlichen Substanzen.

Nur in ganz wenigen Fällen hat sich die Zelle nach dem Beschuss entladen. Auch in diesen Fällen traten jedoch keine merklichen Temperaturerhöhungen oder nachfolgende Reaktionen auf. Dieses Resultat gilt jedoch nur für die bislang ausschließlich untersuchten Pouchzellen, die über kein festes Gehäuse verfügen. Sowohl andere Zelltypen als auch die Einhausung von Pouchzellen in einer realen Anwendung können Änderungen im Gefährdungspotenzial nach sich ziehen. Deshalb werden die Untersuchungen im nächsten Jahr fortgesetzt.

Eine weitere Untersuchungsreihe beinhaltet Grundlagenuntersuchungen zu den Reaktionsmechanismen nach einem internen Kurzschluss. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT wurden dabei miniaturisierte Zellen röntgentechnisch auf ihr Kurzschlussverhalten hin untersucht und mechanisch exakt vermessen. Die vom ICT speziell entwickelten Laborzellen enthielten jeweils nur eine Lage von Anode, Kathode und Separator. Auf diese Weise konnten am ICT Zellen mit einer Breite von nur 3 Millimetern realisiert und dem EMI für Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden. Die geringen Dimensionen der Zellen erlauben nicht nur eine sehr hohe räumliche Auflösung bei einer röntgentechnischen Analyse, auch numerisch kann eine solche Zelle detailliert nachgebildet werden, was bei kommerziellen Zellen aufgrund der hohen Anzahl an Schichten nicht möglich ist. Daher eignet sich eine solche Zelle ideal zur Validierung eines numerischen Modells.

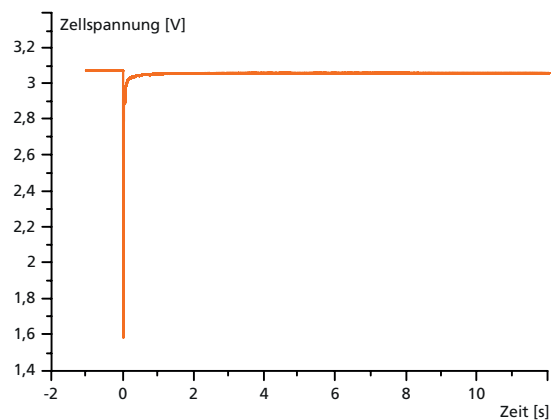


17 High-Speed-Aufnahmen vom Beschuss geladener Pouchzellen, links ohne Backing und rechts mit Stahlbacking.

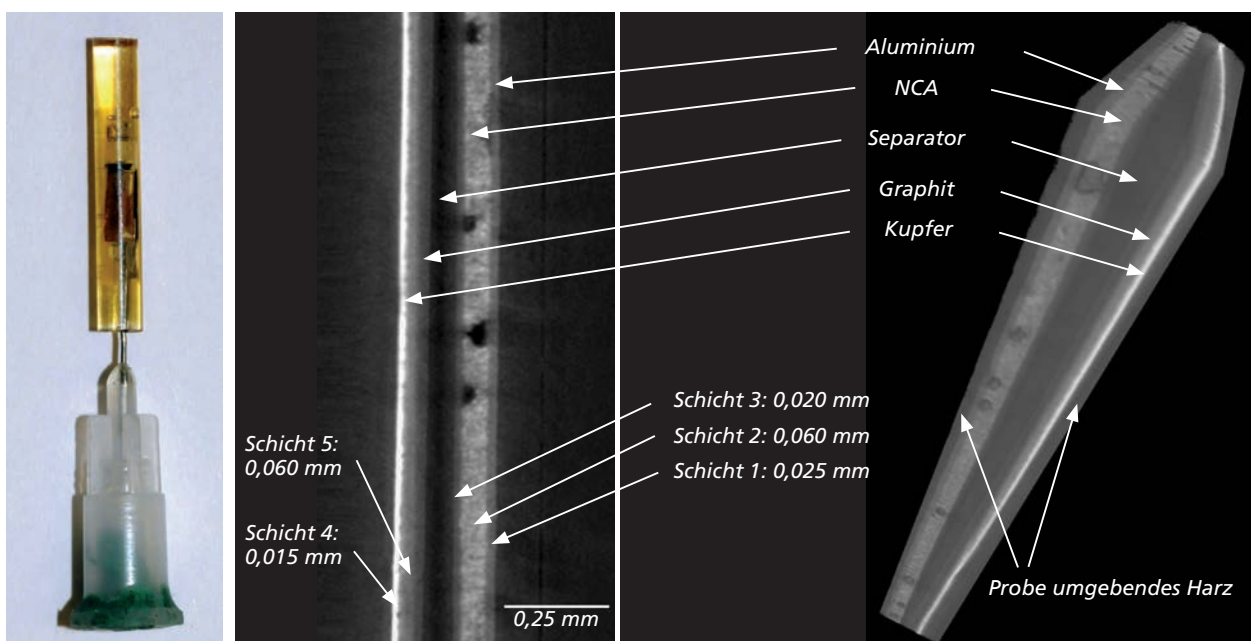
Abbildung 19 zeigt links eine Fotografie, in der Mitte ein CT-Schnittbild und rechts ein angeschnittenes 3D-Bild einer miniaturisierten Laborzelle. Es konnten Voxelgrößen von ca. 2 Mikrometern realisiert werden; sämtliche die Zelle konstituierende Schichten sind auf den CT-Bildern erkennbar. Entsprechend sollten zellinterne Kurzschlüsse mit Durchmessern < 10 Mikrometer nachweisbar und vermessenbar sein.

Für die Nutzung dieser Technik zur Analyse zellinterner Kurzschlüsse sind noch Verbesserungen bei der Zellproduktion notwendig, da die Zellen derzeit weder hinreichend homogen und plan noch elektrochemisch funktionsfähig sind. Am rechts in Abbildung 19 dargestellten 3D-Bild ist deutlich die Verkrümmung der Kupferschicht über die Dicke der Zelle erkennbar.

Es ist geplant, in einem nächsten Schritt ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT verbesserte Laborzellen mit eingebrachtem internen Kurzschluss zu untersuchen, röntgentechnisch und elektrisch (Übergangswiderstand, Kurzschlussstrom) zu vermessen und numerisch nachzubilden. Ein solches Modell zum Thermal Runaway sollte detaillierte Aussagen zur Gefährdung von Li-Ionen-Speichern in unterschiedlichen Szenarien ermöglichen.



18 Durchschuss einer geladenen Li-Ionen-Zelle ohne Backing. Es wurden ausschließlich mechanische Beschädigungen beobachtet. Zu chemischen Reaktionen kam es nicht.



19 Links: Fotografie einer Minizelle; Mitte: CT-Schnittbild; Rechts: (angeschnittenes) 3D-Bild.

**SICHERHEITS-
TECHNOLOGIE UND
BAULICHER SCHUTZ**

SICHERHEITSTECHNOLOGIE UND BAULICHER SCHUTZ

Die Entwicklungen und Ereignisse des zurückliegenden Jahres haben bedauerlicherweise aufgezeigt, wie schnell sich die Sicherheitslage und die gefühlte Sicherheit ändern können. Sowohl die weltpolitischen Veränderungen als auch der Anstieg der Naturereignisse, die dem Klimawandel zugeschrieben werden, belegen, dass es für den Erhalt und den Ausbau der privaten und öffentlichen Sicherheit unumgänglich ist, sich frühzeitig mit zunächst nicht vorstellbaren Bedrohungslagen und Gefährdungspotenzialen zu beschäftigen.

Die Abteilung Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz hat im zurückliegenden Jahr hierzu einen Beitrag geleistet, indem sie Konsequenzen von nicht planmäßigen, außergewöhnlichen Ereignissen, die auf technische Systeme oder gebaute Infrastrukturen einwirken, untersucht hat.

Die Betrachtungsebenen sind dabei multi-skaliert und reichen von miniaturisierten elektronischen Systemen über die Betrachtung multitechnischer Gesamtsysteme bis hin zur Analyse von Bauwerken und sogar ganzen städtischen Bereichen. Die Analysen betrachten dabei nicht nur die direkten primären Konsequenzen eines Ereignisses, sondern berücksichtigen auch die sich aus den Primärkonsequenzen ergebenden weiteren Auswirkungen, welche sich kaskadenartig fortsetzen können.

Gemeinsame Basis der Untersuchungen für verschiedene Systeme und Konsequenzebenen ist die quantitative Risikoanalyse. Hier wird, ausgehend von einer Bedrohungs- und Gefährdungsanalyse (engl. hazard and threat analysis HTA) über eine Konsequenzanalyse (engl. consequence analysis CA), das Risiko und die Verwundbarkeit (risk and vulnerability assessment RVA) eines Systems oder Bauwerks gegenüber der Bedrohung und Gefährdung bestimmt und beurteilt. Liegt dies über dem akzeptablen Grenzwert, muss es mit Gegenmaßnahmen auf ein akzeptables Maß gemindert werden. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 1 (nächste Seite) durch das nicht akzeptable Schädigungsbild der Stahlbetonplatte rechts, welches durch Verwendung eines duktilen Betons bei gleicher Belastung auf ein hinnehmbares Maß (links) reduziert werden kann.



Dr.-Ing. Alexander Stolz

Abteilungsleiter Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz

Telefon 07628 9050-646 | alexander.stolz@emi.fraunhofer.de

Dadurch ermöglicht es die quantitative Risikoanalyse auch, die Nachhaltigkeit der Systeme und Bauten zu erhöhen, da bei Lebenszyklusbetrachtungen der Einfluss der außergewöhnlichen Ereignisse erfassbar und bewertbar wird, und die Steigerung der Robustheit der Systeme durch längere Nutzungszeiten ökologische und ökonomische Ressourcen schont. Ebenso kann die Resilienz, also das Vermögen, sich nach einem Zwischenfall wieder auf den Status quo und darüber hinaus zu erholen, besser erfasst und durch die Kenntnis der Verwundbarkeit erhöht werden.

In diesem Kontext werden nun im Folgenden verschiedene Forschungsergebnisse des letzten Jahres vorgestellt, die wichtige Erkenntnisse zu den verschiedenen Phasen der Risikoanalyse angewandt auf sehr unterschiedliche Systeme liefern.

Gezeigt wird, wie durch quantitative Risikoplanalysen die maßgebenden Belastungsszenarien außerhalb der Normung für große multifunktionale Gebäudekomplexe definiert werden können. Im Anschluss daran werden neue Methoden aufgezeigt, mit denen es möglich ist, die Sicherheit und Passagierzufriedenheit an Flughäfen durch optimierte Designs von Sicherheitssystemen weiter zu verbessern und an die zukünftigen Anforderungen anzupassen. Zudem werden Lösungen aufgezeigt, die mit Hilfe der entwickelten Entscheidungsunterstützungssoftware IDAS im Rahmen städtischer Sicherheitsanalysen erreicht werden können. Im Bereich des physikalischen baulichen Schutzes wird die Herleitung einer Auslegungsmethode für duktile Wandelemente aus einem Hochleistungswerkstoff näher erläutert, der verwendet werden kann, wenn andere Schutzmaßnahmen nicht eingesetzt werden können.



1 Ablaufzyklus im Risikomanagement gegenüber außergewöhnlichen Ereignissen.

SICHERHEITSTECHNOLOGIE UND BAULICHER SCHUTZ

Belastungsszenarien für multifunktionale Großbauwerke

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, für multifunktional genutzte, repräsentative Gebäudekomplexe in urbaner Umgebung Planungsgrundlagen bereitzustellen, sodass diese nicht nur den üblichen Bemessungssituationen genügen, sondern auch eine hinreichende Robustheit bei relevanten extremen Belastungsereignissen aufweisen. Derartige Belastungsszenarien sind in einschlägigen Normen der Lastannahmen nicht oder nur unzureichend quantifiziert, was eine Betrachtung über eine quantitative Risikoanalyse erfordert.

Wesentlich dafür ist eine realitätsnahe Bewertung der Bauwerksbelastungen, die einerseits zu einer zielsicheren Dimensionierung von lastabtragenden Strukturbauteilen und andererseits zu einer ausreichenden Dimensionierung technischer Ausrüstungselemente des Bauwerks für das Erreichen der erforderlichen Betriebssicherheit führt. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes ELASSTIC »Enhanced Large Scale Architecture with Safety and Security Technologies and Special Information« werden die Methoden erarbeitet, die es ermöglichen, eine solche Risikoanalyse für große, multifunktionale Gebäude durchzuführen.

Ein Weg, der in der quantitativen Risikoanalyse beschritten wird, um extreme Belastungsereignisse zu ermitteln, ist die Auswertung von Ereignissen der Vergangenheit. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung können darauf aufbauend dann auch qualitative Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Belastungsereignisse abgeleitet werden.

Für terroristische Ereignisse ist am Fraunhofer EMI die Terror Event Database (TED) entwickelt worden, die herangezogen wird, um relevante Belastungen infolge von menschlich verursachten Ereignissen auszuwerten. Daneben ist es aber ebenso erforderlich, bei Bauwerksplanungen und Strukturbewertungen extreme Einwirkungen weiterer Quellen, wie z. B. Folgen von natürlichen Ereignissen und Unfällen zu berücksichtigen.

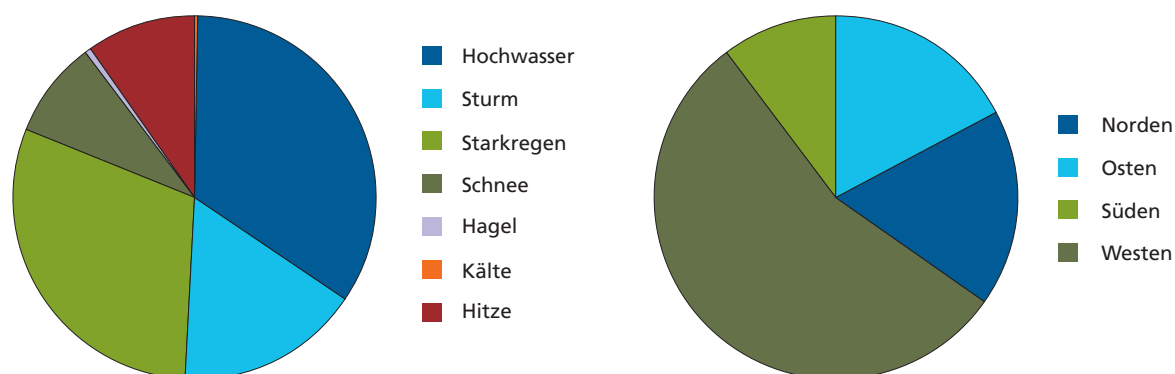
Daher wurden im Forschungsprojekt »ELASSTIC« auch erstmals umfassend extreme Naturereignisse wie extreme Windlasten und extremer Niederschlag mit Überflutung sowie ausgeprägte Perioden von Hitze oder Kälte betrachtet. Dazu wurde eine kumulierte Datenbank natürlicher/witterungsbedingter Ereignisse erstellt, die Ereignisse in Europa seit den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts erfasst.



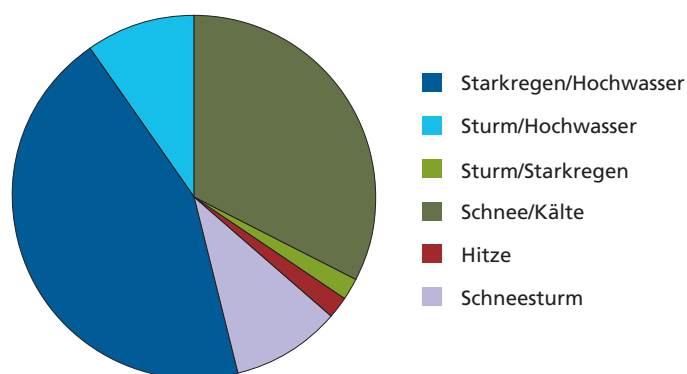
2 Große städtische
Infrastruktur.

Kategorie	Ereignisse mit Strukturschädigung	Ereignisse ohne Strukturschädigung
Naturereignisse	Starkwind Starkregen Schneefall, Eis, Hagel Flut Erdbebewegungen	Hitzewelle Kältewelle
Unfälle	Explosion Impakt Feuer	Rauch Luftverschmutzung Wasserverschmutzung Hitze
Sabotage und Terrorismus	Explosion Impakt Feuer	CBR-Angriff Cyber-Kriminalität

Tabelle 1 Mögliche extreme Belastungsereignisse auf einen multifunktionalen Gebäudekomplex in Europa.



3 Extreme Wetterereignisse in Europa; links: Arten der Extremereignisse, rechts: betroffene Regionen.



4 Kombinierte extreme Wetterereignisse in Europa.

Ein deutlicher Einfluss auf die Entwicklung extremer Witterungsereignisse wird dem Klimawandel zugeschrieben. Daher zielte die Analyse derartiger Ereignisse auch darauf ab, die zukünftige Entwicklung von Niederschlag, Wind und Temperatur mit Hilfe von Prognosemodellen mit in die Betrachtung einzubeziehen.

Die benannten relevanten Ereignisse (Tabelle 1) müssen nicht zwingend einen schädigenden Einfluss auf die bauliche Struktur haben, sondern sie werden auch berücksichtigt, wenn sie einen direkten Einfluss auf die Nutzer des Bauwerks haben. Beispielsweise ist es erforderlich, bei ausgeprägten Temperaturereignissen die Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung nach diesen Anforderungen auszulegen.

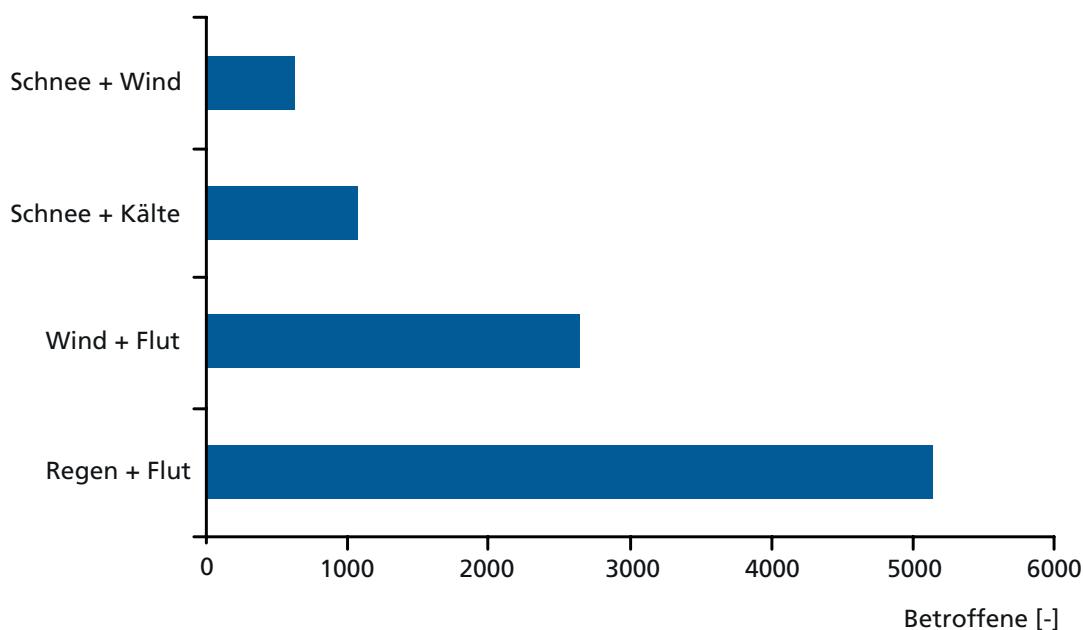
Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Auswertung der Datenbank für Naturereignisse. Abbildung 3 links zeigt die statistische Auswertung von Extremwetterereignissen in Europa. Die rechte Abbildung verdeutlicht das regionale Auftreten von Extremwetterereignissen. Es ist erkennbar, dass in der Vergangenheit Hochwasserereignisse, Starkregen und Starkwind die dominierenden Ereignisse waren.

Aufgrund der geographischen Lage fanden die meisten Ereignisse in Westeuropa statt, wobei hier Starkwind und Starkregen, der im gebirgigen Gelände zu Überflutungen führte, dominant waren.

Es zeigte sich weiterhin, dass Extremwetterereignisse meist als kombinierte Ereignisse auftreten. Beispielsweise kann Starkregen zu Überflutungen führen, und in Küstenregionen ist oftmals mit Starkwind und Hochwasser und einer daraus entstehenden Sturmflut zu rechnen. Abbildung 4 stellt eine Übersicht weitverbreiteter Ereignisse dar. Es wird sichtbar, dass Hochwasser infolge von Starkregen den größten Anteil an kombinierten Ereignissen einnimmt, was im Hinblick auf die bauliche Struktur besondere Schutzmaßnahmen erfordert.

Die Zahlen der Betroffenen, die für die Berechnung des individuellen Risikos eine fundamentale Bedeutung hat, sind für die wichtigsten kombinierten Extremwetterereignisse in Abbildung 5 zusammengefasst.

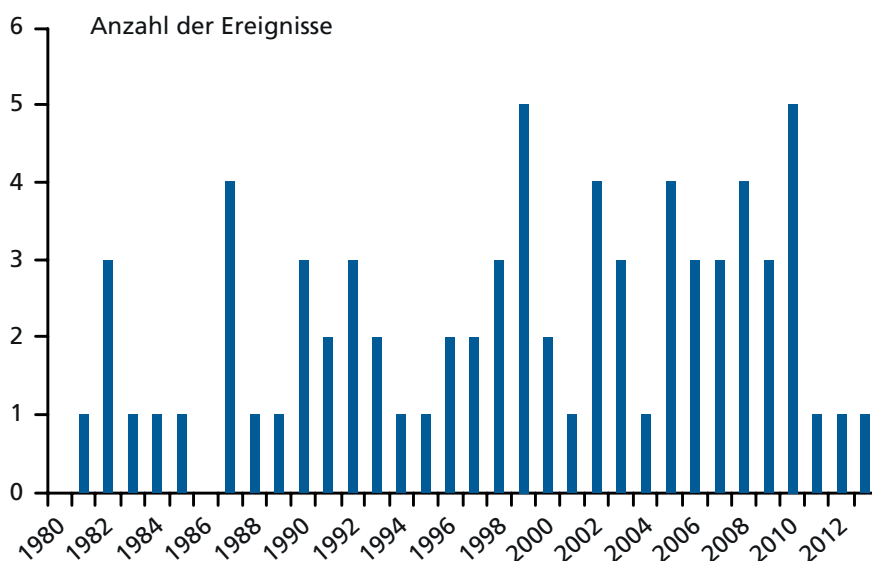
Somit ermöglicht die durchgeführte Analyse das individuelle Risiko Betroffener eines kombinierten Wetterereignisses in Europa nach Regionen aufgegliedert zu quantifizieren (Abbildung 6 und 7, nächste Seite). Das größte Risiko besteht für Menschen in Osteuropa darin, in ein Ereignis mit Starkwind und starkem Schneefall (East_Wi_Sn) verwickelt zu sein. In West- und Südeuropa hingegen treten dominant Überflutungsereignisse infolge von Starkwind (West_Fl_Wi) in Küstenregionen und Starkregen (South_Fl_Ra) mit Sturzfluten auf.



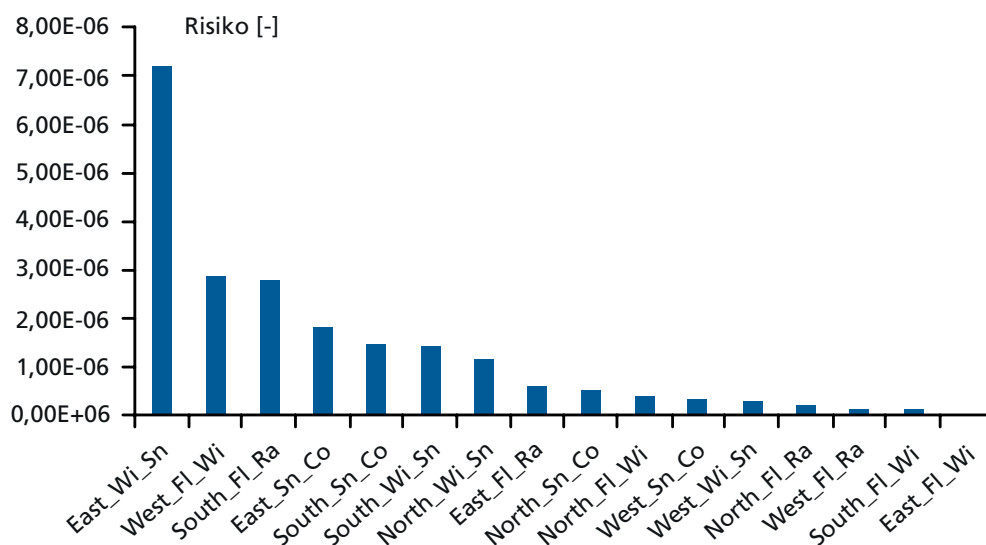
5 Anzahl der Betroffenen bei kombinierten Wetterereignissen in Europa.

Die zeitliche Wiederkehr von Extremereignissen lässt auf einen qualitativen Trend schließen, der es ermöglicht, unter Zuhilfenahme von Klimamodellen die zukünftigen Wetterentwicklungen abzuschätzen und somit eine Prognose für die Zukunft zu erarbeiten. Beispielhaft ist das Auftreten von extremen Wetterereignissen in Abbildung 6 für Europa zusammengefasst. Darin ist ein ansteigender Trend an extremen Wetterereignissen seit den 80er Jahren erkennbar.

Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen liefert hier die Risikoanalyse wichtige Informationen für den Planungsprozess solcher multifunktionaler Gebäudekomplexe, die eine Integration von baulichen Maßnahmen zur Reduzierung schädigender Einflüsse dieser Ereignisse frühzeitig ermöglichen.



6 Zeitliche Verteilung extremer Wetterereignisse in Europa von 1980 bis 2013.



7 Risikovergleich für Extremwetterereignisse in Europa zur Ermittlung relevanter Belastungsereignisse.

Auf der horizontalen Achse sind alle relevanten Belastungsszenarien (hier als kombinierte Ereignisse) aufgetragen. Die Kennung setzt sich wie folgt zusammen: Region in Europa_Naturereignis1_Naturereignis2 (Beispiel: East_Wi_Sn: Osteuropa_Wind_Schnee: kombiniertes Ereignis in Osteuropa aus Wind und Schnee). Die weiteren Abkürzungen bedeuten: Wi = Wind; Fl = Flut; Ra = Regen; Co = Kälte.

Neue Konzepte zur Flughafensicherheit und Passagierzufriedenheit

Die zivile Luftfahrt steht immer wieder vor neuen Herausforderungen um die Sicherheit und den Schutz von Flugzeugen und Passagieren zu gewährleisten. Seit den späten 60er Jahren führten Behörden und Flughäfen Sicherheitsüberprüfungen von Passagieren als Reaktion auf zahlreiche Zwischenfälle vor dem Betreten eines Flugzeugs verpflichtend ein. Nach den Anschlägen vom 11. September 2001 wurden die Sicherheitsvorkehrungen mehrfach verschärft. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass seitdem immer wieder Versuche unternommen wurden und werden, neue gefährliche Substanzen oder Objekte mit an Bord von Flugzeugen zu schmuggeln. Doch das erhöhte Sicherheitsniveau bringt infolge der Intensivierung und zunehmenden Komplexität der Sicherheitskontrollen auch Nachteile für verschiedene Interessensgruppen mit sich:

Flughäfen müssen mehr Platz für Sicherheitsschleusen zur Verfügung stellen, Passagiere länger in der Schlange vor Sicherheitskontrollen stehen. Das führt zu mehr verpassten Flügen, Unzufriedenheit bei den Passagieren, Umsatzeinbußen bei Unternehmen am Flughafen und nicht zuletzt höheren Kosten für die öffentliche Hand, die die Sicherheit an Flughäfen mitfinanzieren muss.

Das Fraunhofer EMI entwickelt eine Software zur Auswertung und Simulation von Sicherheitsschleusen auf Systemlevel. Diese umfangreiche Evaluationsplattform (SEP) soll automatisiert Analysen ausführen, die durch einen intelligenten Mix auszuwertender Leistungsindikatoren die Bedürfnisse aller Interessensträger berücksichtigt und so letztlich Wege aufzeigt, die zu einer ausgewogenen Balance zwischen Sicherheit und unvermeidbare Nachteile führen.

Statt optimierte und akkreditierte Komponenten einzeln zu betrachten, untersucht das EMI die Wirkungsweise des Systems Sicherheitsschleuse dabei in seiner Gesamtheit. Dieser bisher nicht eingesetzte Ansatz ermöglicht neue Optimierungsverfahren, die kombinatorische und statistische Effekte berücksichtigen können. Die SEP wertet bei der Analyse und Bewertung alle relevanten Leistungsbereiche entsprechend den Interessensträgern aus: Sicherheit, Passagierzufriedenheit sowie Betriebsablauf und Kosten. Bei gleichzeitiger Wahrung der Sicherheit ist es so besser

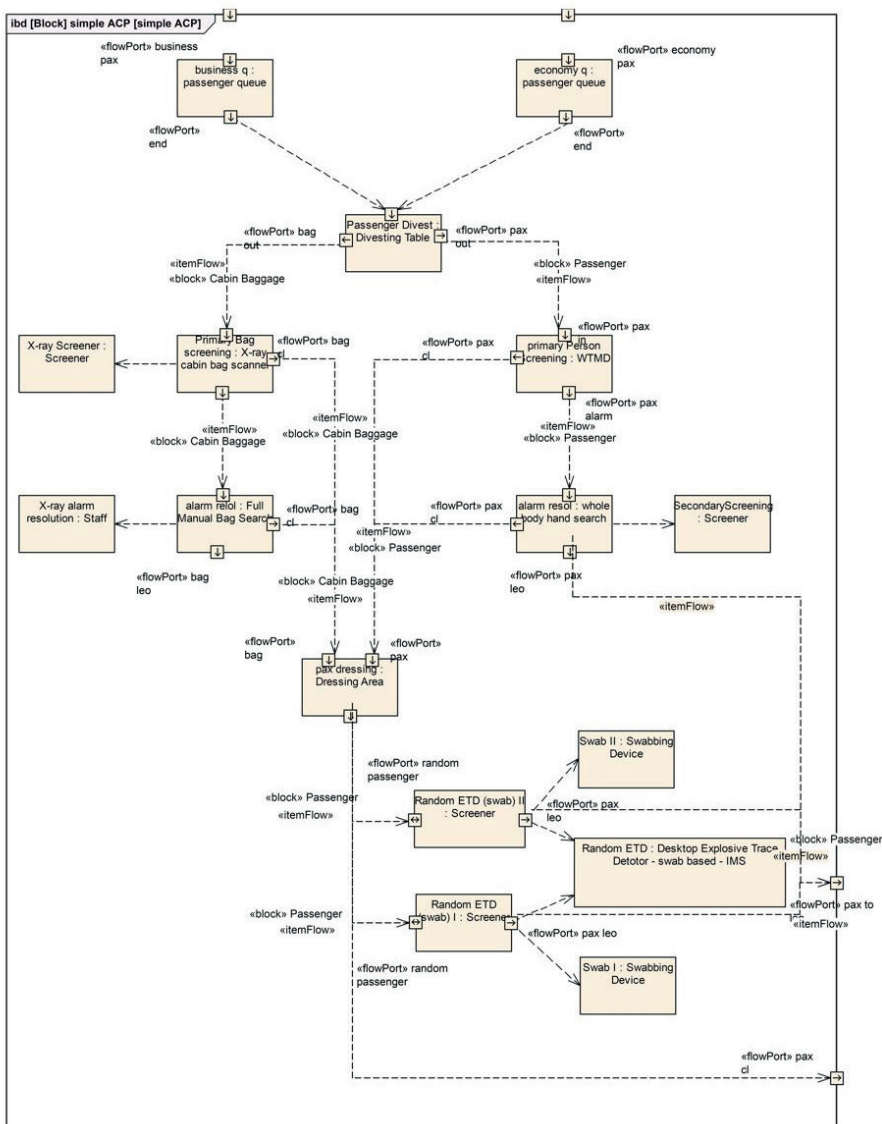
möglich, auf die Interessen der Akteure am Flughafen einzugehen, d. h. bessere Anpassungen an individuelle Flughafensituationen, mehr Dynamik in der Innovation bei Komponentenentwicklung sowie ethische Vertretbarkeit und soziale Auswirkungen der Fluggastkontrollen.

Das EMI kann auf Erfahrungen und Kontakte aus erfolgreich abgeschlossenen Projekten zurückgreifen, wie das EU-Projekt COPRA, das BMBF-Projekt FluSs, sowie das EU-Projekt XP-DITE, in dessen Rahmen die aktuelle Forschung vorangetrieben wird. Hieraus ging ein umfassender Katalog hervor, der die Anforderungen an Sicherheitsschleusen sowohl für aktuelle Rahmenbedingung als auch für zukünftige neue Sicherheitskonzepte beschreibt. In Interviews und Workshops wurden Interessensgruppen befragt und in die Projekte mit eingebunden. Daraus wurden Leistungsindikatoren abgeleitet, um das System Flughafensicherheitsschleuse in den Bereichen Sicherheit, Betriebsablauf und Kosten, Passagierzufriedenheit sowie Ethik und Gesellschaft im Umfeld der Flughafensicherheit zu bewerten.

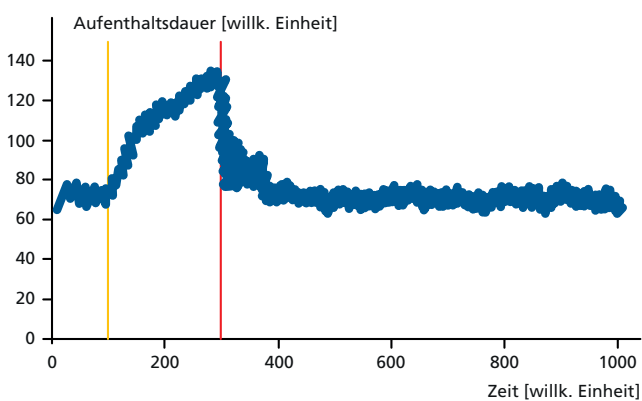
Aus den gewonnenen Informationen konnten Konzepte und die möglichen architektonischen und funktionalen Realisierungen verschiedener Sicherheitsschleusen entwickelt werden, denn der Fokus von den in der SEP eingesetzten Evaluationsmethoden und -verfahren liegt auf der Anwendung für aktuelle und realistisch zu erwartende zukünftige Konzepte für Sicherheitsschleusen.

Somit konnten in Zusammenarbeit mit den Experten aus dem Flughafenbereich entworfene Sicherheitskonzepte mit der semiformalen Modellierungssprache SysML modelliert werden. Die so abstrahierten Ergebnisse dienen als Grundlage für die Toolentwicklung. Die Modelle stellen mit grafischen Elementen, wie abstrakten Blöcken und deren Verbindungen, sowohl die Architektur als auch die Funktion der Sicherheitsschleusen nach (siehe Abbildung 8, nächste Seite).

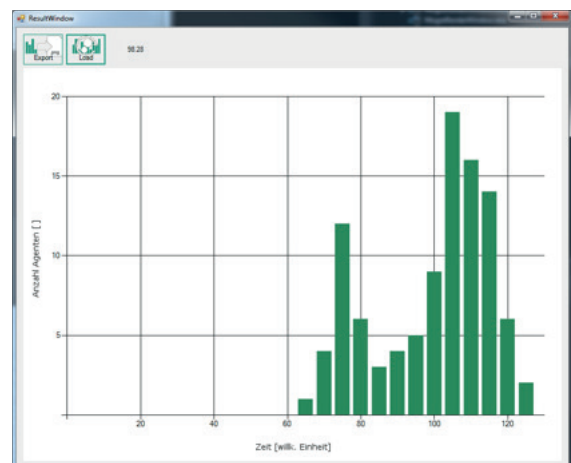
Im Zusammenspiel mit einem kommerziellen Designtool für Sicherheitsschleusen erlaubt die SEP nach Projektabschluss umfängliche Auswertungen und Optimierungen einer Sicherheitsschleuse während der Designphase noch vor dem tatsächlichen Aufbau. Schon der Entwurf einer Sicherheitsschleuse kann dadurch mit dem Fraunhofer-Software-Modul ausgewertet werden. Anhand der oben genannten Leistungsindikatoren kann das Design dann



8 Semiformales Modell einer beispielhaften heutigen Sicherheitsschleuse.



9 Zeitliche Entwicklung der Aufenthaltsdauer von Agenten im Testmodell.



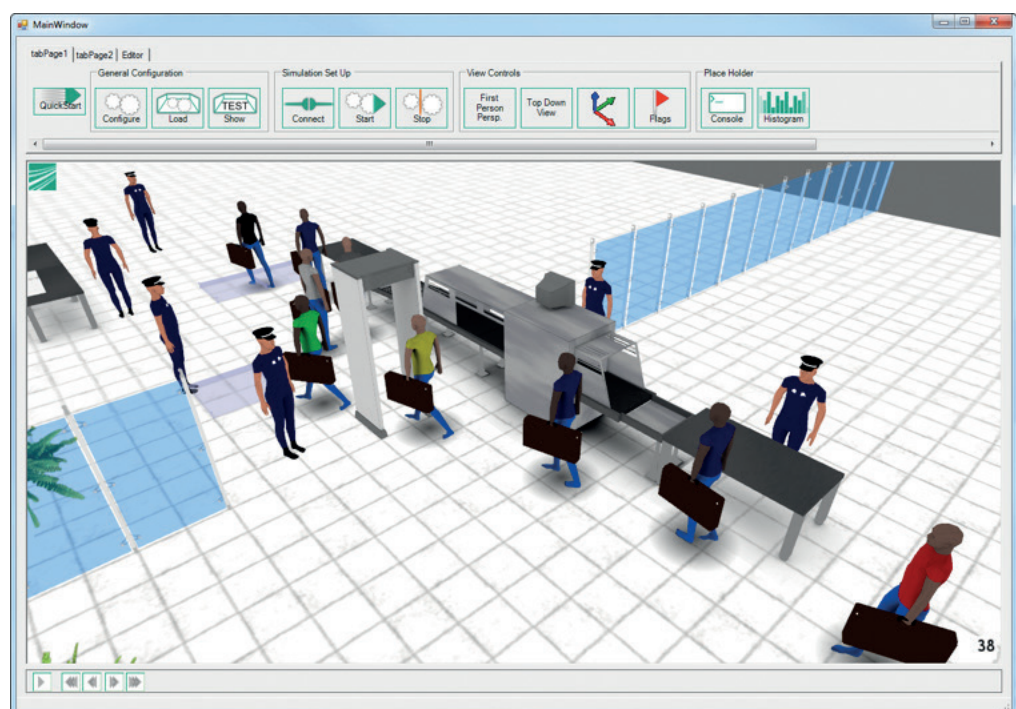
10 Aufenthaltsdauerstatistik von Agenten im Testmodell.

iterativ verbessert und erneut ausgewertet werden, bis ein für den jeweiligen Flughafen idealer Mix an Leistungsindikatorwerten erreicht wird (Beispiele Abbildung 9 und 10).

Die SEP ist somit flexibel für verschiedene Konfigurationen von Sicherheitsschleusen (Anzahl und Anordnung der einzelnen Komponenten) und Herangehensweisen der Systemanalyse ausgelegt. Wesentliche Vorteile in der Auswertung ergeben sich durch die Verwendung von analytischen Methoden auf der einen Seite sowie einer Monte-Carlo-Simulation auf der anderen. Die analytische Methode hat den Vorteil, schnell und transparent zu arbeiten. Bei einer Monte-Carlo-Simulation können Vorgänge in einer Sicherheitskontrolle mit mehr Modelldetails berücksichtigt werden. Die Simulation arbeitet mit autonom agierenden Agenten, die sowohl auf die Umgebung in der Sicherheitsschleuse als auch auf andere Agenten reagieren. Anwendungsmöglichkeiten für diese erweiterte Auswertemethodik sind beispielsweise die Kapazität und die Sicherheit der Schleuse. Die Simulation ist zur Analyse einzelner Bereiche, Vorgänge oder Probleme in der Sicherheitsschleuse geeignet, während analytische Ergebnisse sehr schnell zur Verfügung stehen, was eine rasche Optimierung des Designs ermöglicht.

Eine eigens entwickelte, eigenständige Eingabeschnittstelle erlaubt zudem den Import eines Flughafendesigns, welches damit in einer 3D-Darstellung und Animation betrachtet werden kann. Dies geschieht mit Hilfe der dreidimensionalen Repräsentation der Sicherheitsschleuse, in der die Passagiere, Geräte und Sicherheitskräfte entsprechend der Simulation in 3D dargestellt und animiert werden (siehe Abbildung 11). Die Ergebnisse der Simulation und Auswertung können dann mittels weiterer Funktionen des Animationsprogramms im Detail analysiert und visualisiert werden.

Zusammenfassend wird ein Tool entwickelt, das dabei helfen kann, Sicherheitsschleusen an Flughäfen in Zukunft im Systemkontext besser zu verstehen und damit effizienter zu planen. Die am Fraunhofer EMI entwickelten Softwaretools werden computergestützte Auswertemethoden zur Planung, Optimierung und Leistungsbewertung von Sicherheitsschleusen zur Verfügung stellen, die zusammen mit der Visualisierung der Simulation der Berechnungsergebnisse tiefergehende Analysen und Auswertungen der Funktion eines Checkpoints ermöglichen; und das perspektivisch nicht nur im Flughafenumfeld.



11 Beispielhafte Darstellung einer Sicherheitsschleuse mit Agenten im EMI-Visualisierungs-Tool.

Entscheidungshilfe für mehr Sicherheit in Städten

Damit wir uns in einer Stadt wohl fühlen, brauchen wir ein bestimmtes, individuelles Gefühl der Sicherheit. Unterschiedliche Maßnahmen (z. B. Einsatz von Sozialarbeitern, Ausbildungsprogramme) können die Sicherheit von Bürgern einer Stadt kurz- und langfristig beeinflussen. Dabei gilt es, eine vernünftige Balance unterschiedlicher Maßnahmen zu finden. Denn sowohl ein zu hohes als auch ein zu geringes Maß verschiedener Maßnahmen kann zu einer geringeren Sicherheit bzw. einem geringeren Sicherheitsgefühl der Einwohner führen. In diesem Umfeld sind oft komplexe Entscheidungen zu treffen, die viele Menschen direkt und indirekt betreffen können.

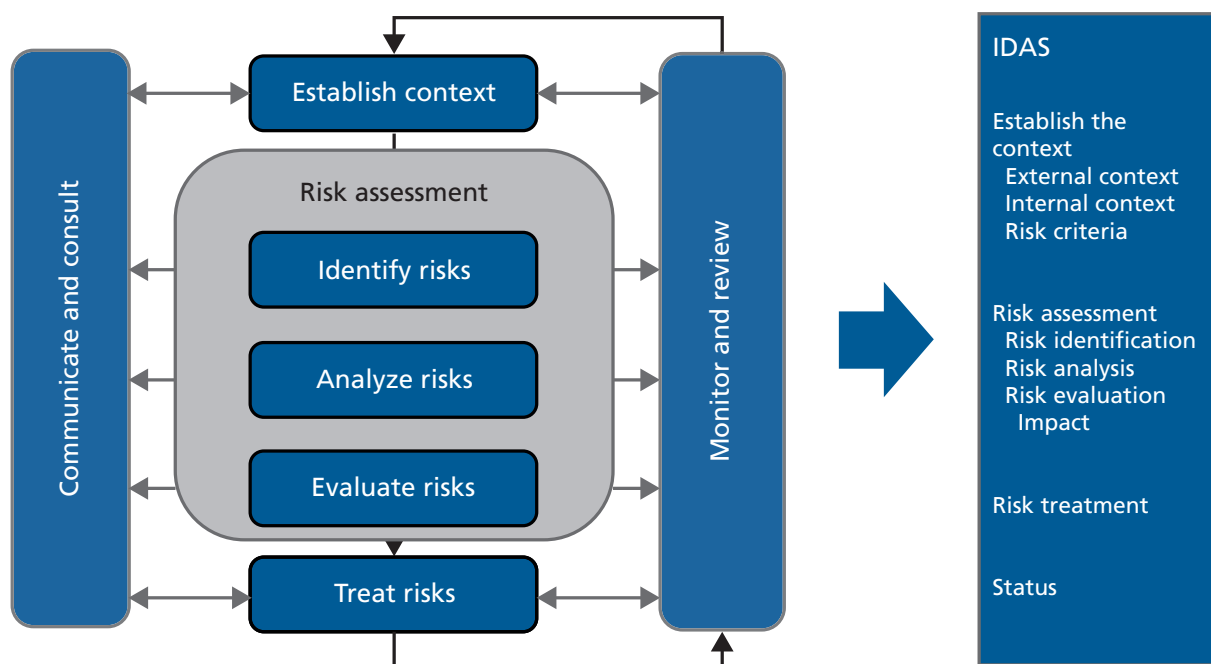
Am Fraunhofer EMI wurde die webbasierte Softwareapplikation IDAS (Issues and Decisions: Analysis and Support) entwickelt, die Entscheider dabei unterstützt, typische Fragestellungen zur Sicherheit im urbanen Raum zu berücksichtigen und zu beantworten. Bereits bei Erstellung der Software wurde viel Wert darauf gelegt, ein breites Anwendungsgebiet zu adressieren. Die Anwendung fußt deshalb auf einem etablierten Prozess, dem Risikomanagementprozess der internationalen Norm ISO 31000:2009.

Auch der zugrundeliegende Prozess kann jederzeit ausgetauscht werden, um flexibel auf die Anforderungen anderer Themenfelder eingehen zu können.

Bei der Auswahl von Maßnahmen zur Erreichung von sicherheitsbezogenen Zielen in urbanen Räumen müssen viele Fragestellungen berücksichtigt werden, wie zum Beispiel: Wer ist von derzeitigen Sicherheitsproblemen wo betroffen? Welche Rahmenbedingungen sind zu berücksichtigen? Wer könnte von umzusetzenden Maßnahmen (negativ/positiv) noch betroffen sein? An welchen Stellen sind die meist knapp bemessenen Ressourcen zur Lösung von Sicherheitsfragen zuerst einzusetzen?

Die am Fraunhofer EMI entwickelte Web-Applikation IDAS ist ein Tool zur Unterstützung im Risikomanagement und kann in jedem Umfeld eingesetzt werden, das Risikobetrachtungen erfordert, da sie den generischen Ansatz der ISO 31000 umsetzt.

Am Beispiel der urbanen Sicherheit wird nachfolgend geschildert, welche Funktionen einem Nutzer durch die Anwendung zur Verfügung gestellt werden, wobei ein wichtiges Element des Risikomanagements die Einbeziehung von involvierten oder betroffenen internen und externen Interessensträgern (Stakeholder) ist.



12 Repräsentation des Risikomanagement-Prozesses in der Software IDAS.

Beispielsweise könnten Polizeibeamte interne Interessensträger sein, wenn es um die Frage der Vermeidung von Taschendiebstählen bei Veranstaltungen mit hohem Besucheraufkommen wie zum Beispiel Weihnachtsmärkte oder Volksfeste geht, da diese aktiv an der Fragestellung beteiligt wären; in diesem Fall wären die Besucher eines Marktes externe Interessenträger.

IDAS unterstützt den Anwender in allen Phasen des Risikomanagementprozesses. In der ersten Phase des Risikomanagementprozesses werden dabei die relevanten Aspekte des Kontextes erfasst, in dem das Risikomanagement betrieben wird. Im Wesentlichen können hierbei Indikatoren in Form von Datenblättern bzw. Zeitreihen erfasst und analysiert werden.

Bezogen auf das Beispiel wären eindimensionale Größen die tägliche Anzahl der Besucher auf einem Markt oder die Anzahl bei der Polizei registrierter Taschendiebstähle auf dem Markt.

Basierend auf etablierten Zeitreihenanalysemethoden können somit Warnungen ausgegeben werden, die den Nutzer darauf hinweisen, dass zuvor von ihm definierte Schwellwerte zu bestimmten Zeitpunkten voraussichtlich über- oder unterschritten werden.

So kann eine Warnung ausgegeben werden, wenn die prognostizierte Zahl der Taschendiebstähle aufgrund beobachteter Entwicklung dieses Indikators vergangener Zeiten (Stunden, Tage, Monate, Jahre) über einen Schwellwert steigt.

Im Bereich der Kontextdefinition werden dann die Risiken bzw. Chancen definiert. Dazu werden neben den Auftretenswahrscheinlichkeiten auch die Konsequenzen auf einer Impaktskala erfasst. Diese Impaktskala erlaubt den qualitativen Vergleich der verschiedenen Kontexte. Als weiterer wesentlicher Baustein sind abschließend noch die zu erreichenden Ziele in der Phase der Kontextdefinition zu bestimmen.

Mit der Identifikation der Stakeholder, der Bestimmung von Impaktskalen und Nennung der zu erreichenden Ziele sind die vorbereitenden Schritte zur Risikoanalyse abgeschlossen.

IDAS führt den Anwender im nächsten Schritt zur Risikoidentifikation, in der jedem genannten Ziel Risiken zugeordnet werden können. Für den urbanen Kontext schlägt IDAS bereits definierte Risiken vor, die aus vergangener Anwendung der Software bekannt sind. Der Nutzer kann darüber hinaus Risiken selbst anlegen.

Mit den zuvor definierten Konsequenzskalen und Wahrscheinlichkeiten können die identifizierten Risiken im anschließenden Schritt analysiert werden, d. h. die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit und die erwartete Konsequenz zugewiesen werden. Kontrollmechanismen in IDAS gewährleisten hier ein gewisses Maß an Vollständigkeit, was einen deutlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Herangehensweisen darstellt.

Die identifizierten und geschätzten Risiken werden anschließend evaluiert, indem sie in eine Risikomatrix eingeordnet werden. Hier ist erkennbar, ob Risiken für die Maßstäbe des Nutzers akzeptabel sind oder nicht.

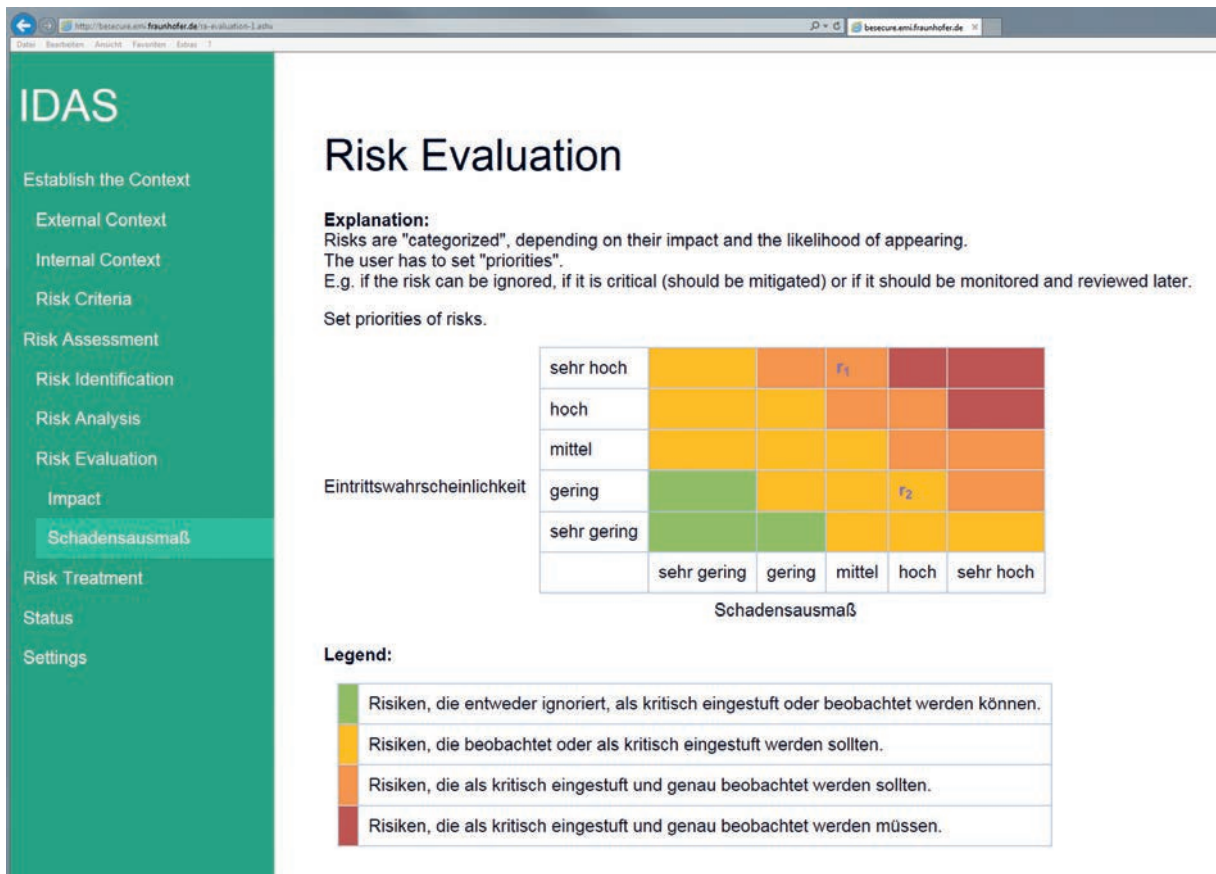
Abbildung 13, nächste Seite, zeigt in der implementierten Softwareanwendung den Schritt der Risikoevaluation. Die darin abgebildete Risikomatrix enthält zwei Risiken (abgekürzt: r_1 und r_2), die zuvor definiert und geschätzt wurden. Anhand der Position in der Risikomatrix und der Farbkodierung ist ersichtlich, ob ein Risiko weiterer Maßnahmen bedarf. Die Notwendigkeit, Maßnahmen einzuleiten, steigt von links nach rechts bzw. von unten nach oben, was zusätzlich durch die farbliche Kodierung von grün über gelb und orange nach rot verdeutlicht wird.

Im letzten Schritt des Prozesses wird die Behandlung von Risiken angegangen. Jedem Risiko kann eine Maßnahme zugewiesen werden, welche das Risiko mindert, entweder in dem die Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert wird oder indem die Konsequenzen minimiert werden. Wenn jedem Risiko, das einer risikomindernden Maßnahme bedarf, eine solche zugewiesen wurde, ist der Risikomanagementprozess einmal durchlaufen.

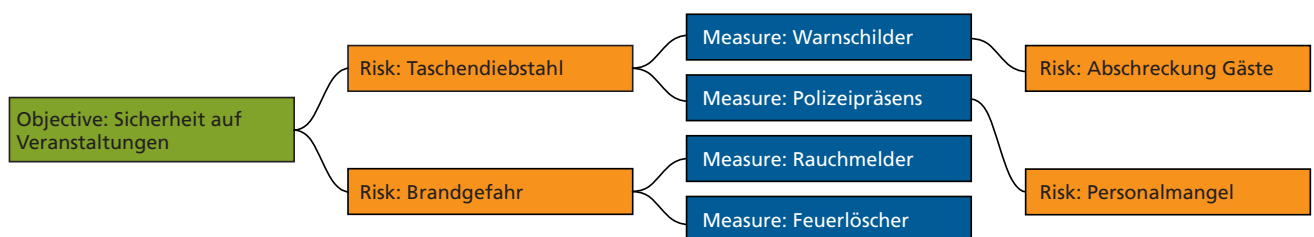
IDAS stellt in einem Graph die Zusammenhänge der Ziele, Risiken und Maßnahmen dar. Maßnahmen werden hinsichtlich ihrer Wirkung und Wirkungsdauer ebenfalls beurteilt. Da Maßnahmen selbst wieder Sekundärrisiken hervorrufen können, erlaubt IDAS das Zuweisen von Sekundärrisiken.

Abbildung 14 zeigt einen Risikoidentifikationsgraphen für verschiedene Ziele im Kontext der urbanen Sicherheit für das oben eingeführte Beispiel »Sicherheit auf Veranstaltungen«, mit assoziierten Risiken, Maßnahmen und Sekundärrisiken.

In der iterativ zu durchlaufenden Anwendung können abschließend Zeitpunkte gesetzt werden, zu denen Risiken erneut betrachtet werden sollten, um sie ggf. neu zu bewerten oder weitere Maßnahmen zu identifizieren.



13 Risikomatrix mit eingeordneten Risiken.



14 Risikoidentifikationsgraph.

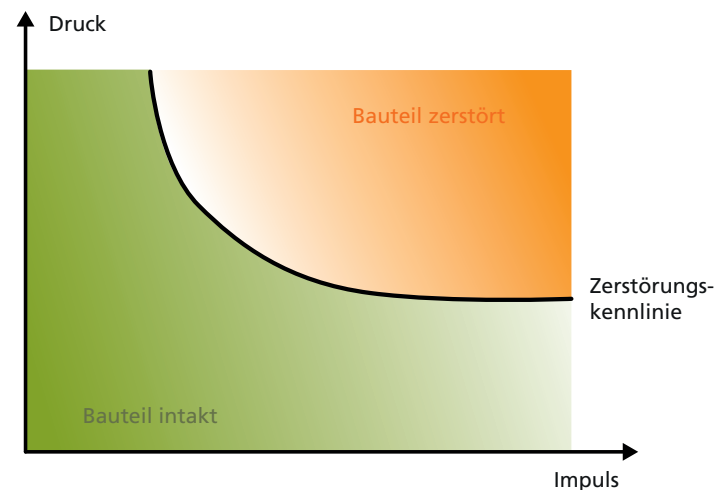
Bemessung eines Hochleistungswerkstoffs für den Extremfall

Zeigt sich im Rahmen einer Risikoanalyse, dass die Schädigungen einer baulichen Struktur das akzeptable Maß überschreiten und zudem nicht durch einfache Erhöhung der Materialstärken kompensiert werden können, sind innovative Hochleistungswerkstoffe ein probates und effizientes Mittel. Um diese Werkstoffe für Bauteile in Gebäuden sicher und wirtschaftlich einsetzen zu können, ist es erforderlich, ihr Tragvermögen auch für die betrachteten extremen Einwirkungen zu kennen. Für den Werkstoff DUCON™ war dessen großes Schutzpotenzial in den letzten Jahren immer wieder durch Versuchsserien belegt worden. Woran es noch mangelte, war eine durchgängige mathematische Beschreibung des Widerstandes gegenüber Fernfeldexplosionsszenarien, bei denen die Platten je nach Abstand zum Explosionsort und nach Art der Explosionsquelle mit sehr unterschiedlichen Belastungsparametern beansprucht werden können. Hierfür wurde nun eine mathematische Beschreibung entwickelt, die es ermöglicht, den Werkstoff gezielt zu bemessen.

Die maßgebenden Parameter, die die Signifikanz der Belastung bei einer Fernfelddetonation beschreiben, sind der Spitzenüberdruck der Druckwelle und der dazugehörige positive Impuls, der das Integral über den zeitlichen veränderlichen Spitzendruckanteil wiedergibt. Um nun die Tragfähigkeitsgrenzen der DUCON™-Wandelemente für alle möglichen Kombinationen aus diesen beiden Werten wiedergeben zu können, muss eine Grenzlinie im Spitzendruck-Impuls-Raum definiert werden, die noch tragbare Zustände von den Zuständen, die zur Bauteilerstörung führen, abgrenzt. Dies kann durch eine sogenannte Zerstörungskennlinie in einem zweidimensionalen Druck- und Impulsdiagramm erfolgen (Abbildung 15).

Zur Bestimmung dieser Zerstörungskennlinie ist es wichtig, das Materialverhalten des duktilen Betons besser zu verstehen, um seine Tragfähigkeit und Verformungsfreudigkeit unter der dynamischen Belastung auch mathematisch vorhersagen zu können. Hierzu wurden verschiedene Versuchsserien durchgeführt, um genau diese Parameter bestimmen zu können. Dabei wurde der Werkstoff zunächst statischen Biegezugversuchen unterzogen (Abbildung 16). Durch diese Versuche konnten die statischen Grenzlasten und die plastischen, also irreversiblen Verformungen

und die daraus folgende Duktilität der verschiedenen DUCON™-Konfigurationen ermittelt werden. Untersucht wurde dabei der Einfluss der Bauteildicke und des Mikrobewehrungsgrades auf diese Parameter. Die Analyse des Last-Verformungsdiagramms zeigt, dass die DUCON™-Platten mindestens die 6-fache elastische Verformung (Abbildung 17, nächste Seite) als plastische Verformung erdulden, bevor sie gänzlich versagen. Die ermittelten Biegezugfestigkeiten liegen je nach Konfiguration im Bereich von 30 Megapascal bis über 40 Megapascal.



15 Zerstörungskennlinie und Interpretation.



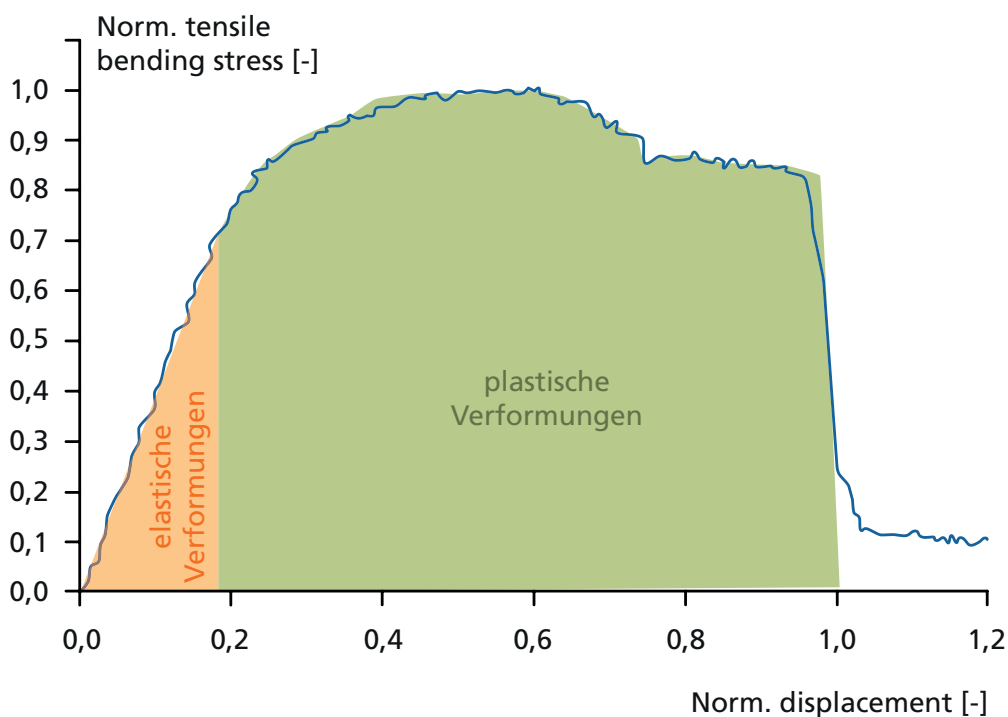
16 DUCON™-Element im statischen Biegezugversuch.

Aufbauend auf diesen statischen Versuchen wurde dann eine mit Hilfe des EMI-Stoßrohres »BlastStar« das dynamische Tragverhalten der Wandelemente in mehreren Versuchsreihen untersucht (Abbildung 18). Mit Hilfe des EMI-BlastStar ist es möglich, verschiedene Bereiche im Druck-Impuls-Raum zu testen. So können zum Beispiel Belastungen getestet werden, die Explosionen von Sprengstoffen entsprechen, aber eben auch Belastungen, wie sie durch die Explosion von Gasgemischen zum Beispiel in der Petrochemie entstehen können. Durch die stetige Erweiterung des Versuchsspektrums des Stoßrohres können somit sowohl hohe, kurzzeitige Spitzendrücke bis 250 Kilopascal getestet werden, andererseits aber auch geringe Überdruck-Ordinaten mit langen Einwirkungsauern nahe einer Sekunde realisiert werden.

Auch unter den dynamischen Lastbedingungen zeigt der duktile Beton ein hohes Tragvermögen in Zusammenhang mit einem hohen Duktilitätsgrad.

Aufbauend auf der Auswertung der statischen und dynamischen Versuche konnte dann eine mathematische Beziehung zwischen dem Materialwiderstand der duktilen Betonelemente und der auf sie wirkenden Belastung in Form einer Zerstörungskennlinie hergeleitet werden. Diese konnte dann in eine dimensionslose Form überführt werden, die es erlaubt, den Widerstand der Elemente für beliebige Abmessungen zu bestimmen. Eingangsparameter sind dabei einfach handhabbare ingenieurtechnische Größen, die keiner weiteren Untersuchung mehr bedürfen.

Somit liegt jetzt ein Verfahren vor, welches es ermöglicht, den Widerstand der duktilen Wandelemente mit beliebigen Abmessungen in Sekunden gegenüber einer beliebigen Explosionsbelastung zu beurteilen.



17 Last-Verformungskurve des DUCON™-Elements im Biegezugversuch.



18 Bildabfolge eines Stoßrohrversuches an einen DUCONTM-Element zu den Zeitpunkten (von links nach rechts, von oben nach unten) $t = 0 \text{ ms}$, 10 ms , 20 ms , 30 ms , 40 ms , 50 ms .



MIKROSTRUKTUR- DYNAMIK

MIKROSTRUKTURDYNAMIK

Die Entwicklung neuartiger prognosefähiger Methoden zur numerischen Beschreibung verschiedener Werkstoffklassen unter Crash- und Impaktbelastung ist ein zentrales Thema in der Abteilung Mikrostrukturdynamik.

Das durch die Fraunhofer-Gesellschaft geförderte Attract-Programm IMAGINE (**I**nnovative **M**ateri**A**l desi**G**n for **I**mpacted compou**N**d structur**E**s) ermöglichte im Jahre 2009 die Gründung einer Arbeitsgruppe, die sich mit der Beschreibung von Faserverbundwerkstoffen auseinandersetzt. Der erste Beitrag beschreibt einen innovativen Multiskalenansatz zur Simulation von Faserverbundwerkstoffen unter Impaktbelastung, der im Rahmen des 2014 abgeschlossenen Attract-Projekts IMAGINE entwickelt worden ist.

Der zweite Beitrag aus der Abteilung Mikrostrukturdynamik befasst sich mit einer geschlossenen Prozesskette, welche die Simulation der Eigenschaften granularer Materialien (wie z. B. Sand) ausgehend von computertomographischen Aufnahmen ermöglicht. Der Beitrag beschreibt die Korrektur der computertomographischen Bilder sowie die darauf basierte automatisierte Gewinnung komplexer Rechengitter.

In der Luftfahrt sind Vögel eine stete Bedrohung für startende und landende Luftfahrzeuge. Die Simulation des gefährlichen Vogelschlags auf Cockpitscheiben gestaltet sich aufgrund von numerischen Instabilitäten recht schwierig. Die Gruppe Composite Design hat sich dieser Problematik angenommen und verbesserte numerische Verfahren entwickelt, welche eine realistische Prognose des Schadensausmaßes ermöglichen. Dies wird im abschließenden Beitrag dargestellt.



Dr. Michael May

Abteilungsleiter Mikrostrukturdynamik

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

MIKROSTRUKTURDYNAMIK

Multiskalensimulation von Verbundwerkstoffen

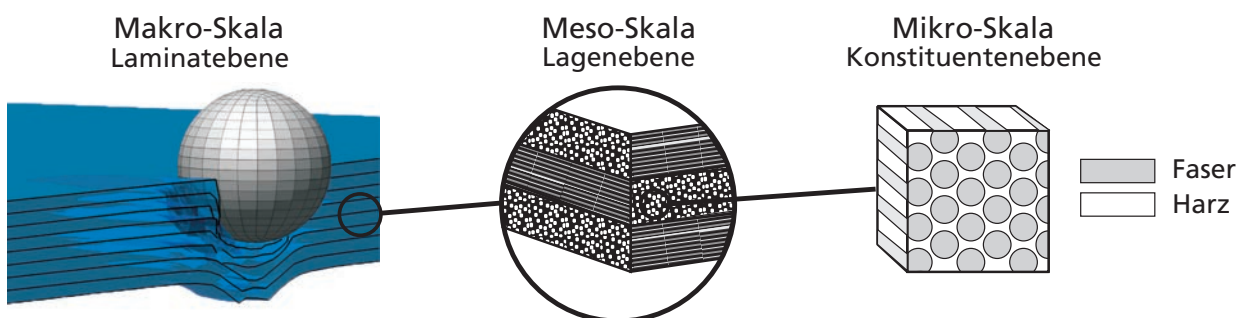
Zahlreiche Hochtechnologieanwendungen verlangen zunehmend den Einsatz von beanspruchungsgerechten Werkstoffen, bei denen in besonderem Maße die Steifigkeits-, Festigkeits- und Crasheigenschaften bestmöglich an das Beanspruchungsprofil angepasst werden. Hier bietet der Einsatz von faserverstärkten Verbundwerkstoffen mit ihrer großen konstruktiven Flexibilität entscheidende Vorteile zur Anpassung der Werkstoffstruktur an komplexe Belastungen und Bauteilkonturen. Für die Anwendung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen in sicherheitsrelevanten crash- bzw. impaktbelasteten Strukturbauteilen fehlen derzeit jedoch verlässliche und gleichzeitig ingenieurmäßig handhabbare Berechnungsmethoden. Die Entwicklung zuverlässiger Auslegungsstrategien und Berechnungsmodelle unter Berücksichtigung der hochdynamischen Belastung ist demzufolge unabdingbar für einen breiten industriellen Einsatz der Faserverbundwerkstoffe.

Derartige Berechnungsmethoden müssen die für Faserverbundwerkstoffe typische heterogene Struktur auf mehreren Größenskalen angemessen berücksichtigen. Infolge dieser mehrfachen Heterogenität ist eine prognosefähige homogenisierte makroskopische Verbundmodellierung über das Erstversagen hinaus derzeit schwer möglich, da diese die auf den unterschiedlichen Größenskalen stattfindenden nichtlinearen Prozesse, deren Evolution und gegenseitige Interaktion bei hochdynamischen Beanspruchungszuständen nicht exakt erfassen kann. Doch gerade die in den feineren Betrachtungsskalen stattfindenden Prozesse bilden die Ursache für makroskopische Strukturauswirkungen.

Faserverstärkte Strukturbauteile werden in der Ingenieur Anwendung derzeit nahezu ausschließlich auf der Makroskala modelliert, bei der die heterogenen Eigenschaften des Verbundes homogenisiert werden, da aufgrund des enormen Berechnungsaufwands eine rein mikromechanische Modellierung nicht möglich ist und auch in naher Zukunft nicht möglich sein wird. Jedoch erlaubt erst die Berücksichtigung feinerer Betrachtungsskalen und der dort stattfindenden Prozesse eine Verbundmodellierung auf einer physikalisch fundierten Basis. Derzeit wird daher das Verbundverhalten bei derartigen Problemstellungen in relevanten Bereichen lokal mit höherer Auflösung modelliert.

Multiskalenansätze erlauben die Simulation des Verhaltens von Verbundwerkstoffen auf einer makroskopischen Skala unter Einbeziehung meso- oder mikromechanischer Prozesse (siehe Abbildung 1). Die Berücksichtigung der Prozesse auf den kleinen Skalen ist besonders wichtig, wenn große Deformationen im Harzsystem auftreten, wie es zum Beispiel in der Nähe eines Impaktortes der Fall ist. Im Rahmen des Attract-Programms »IMAGINE« wurde eine numerisch sehr effiziente Methodik entwickelt, welche basierend auf mikromechanischen Kennwerten der Fasern und des Harzsystems prognosefähige Impaktsimulationen ermöglicht.

Dabei wird ein analytischer Lösungsansatz, die sogenannte generalisierte Methode der Zellen, verwendet, um homogenisierte makroskopische Kenngrößen abzuleiten. Dieser analytische Ansatz erspart die rechenintensive parallele Ausführung verschiedener Finite-Elemente-Simulationen, wie sie von einigen anderen Forschergruppen verfolgt wird. Der analytische Lösungsansatz erfordert jedoch die an-



1 Größenskalen beim Impakt auf Verbundwerkstoffe.

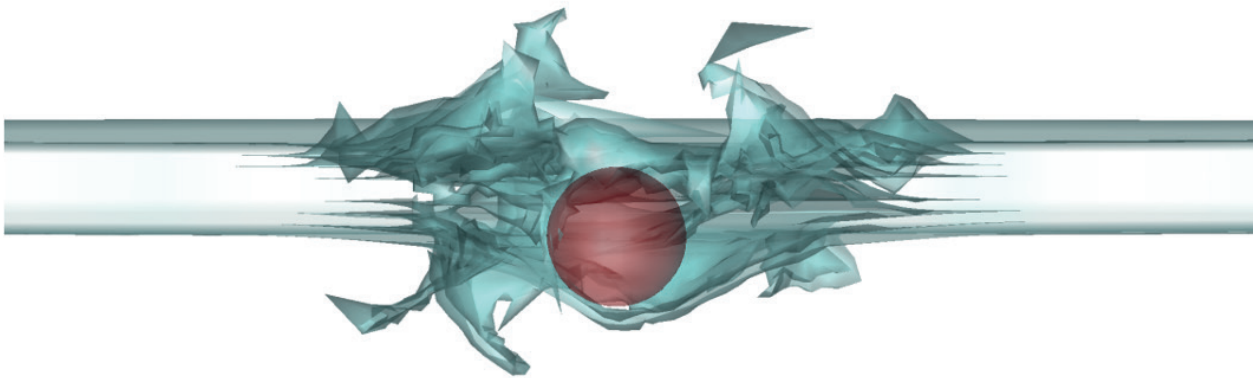
spruchsvolle Transformation großer Matrizen, was ebenfalls zu Lasten der numerischen Effizienz geht. Dieses Problem wurde dadurch gelöst, dass ein Algorithmus implementiert wurde, der automatisch erkennt, ob sich das finite Element im Einflussbereich des Impakts befindet. Der numerisch aufwendige Multiskalenansatz wird nur aktiviert, wenn sich das Element im Einflussbereich des Impakts befindet und Nichtlinearitäten auftreten. Ansonsten wird unter Berücksichtigung der Mischungsregel ein sehr simpler und numerisch effizienter linear-elastischer Ansatz verwendet.

Die Verwendung dieses Ansatzes führte zu einer Reduktion der Rechenzeiten um 70 Prozent, ohne dabei die Güte der Simulation negativ zu beeinflussen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Simulation einer Stahlkugel, die mit einer Geschwindigkeit von 200 Metern pro Sekunde auf eine Verbundwerkstoffplatte trifft und von dieser gestoppt wird.

Somit wurde ein wichtiger Schritt getan, um Multiskalensimulationen von Verbundwerkstoffen für den industriellen Anwender nutzbar zu machen.

Weitere Details können folgender Publikation entnommen werden:

Michael May, Matthias Nossek, Nik Petrinic, Stefan Hiermaier, Klaus Thoma; Adaptive multi-scale modeling of high velocity impact on composite panels; Composites Part A 58, pp.56-64, (2014).



2 Simulation des Impakts einer Stahlkugel auf eine CFK-Platte bei einer Geschwindigkeit von 200 Metern pro Sekunde. Die Kugel wird sowohl in der Simulation als auch im Experiment gestoppt.

Strukturerstellung für die numerische Simulation auf der Mesoskala

Die Charakterisierung von Materialien unter dynamischen mechanischen Belastungen, die Modellierung ihres Verhaltens bis hin zum Versagen sowie die darauf basierende Entwicklung prognosefähiger Modelle für die numerische Simulation auf unterschiedlichen Größenskalen gehören zu den Kernkompetenzen des EMI.

Die Modellierung des Materials und der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten für die Wechselwirkungen kann grundsätzlich auf verschiedenen Ebenen der Abstraktion erfolgen. Oft hängt es von der konkreten Fragestellung oder Anwendung ab, auf welcher Ebene die Betrachtung sinnvollerweise stattfinden soll. Beispielsweise kann das Verhalten heterogener Materialien, die einen mehrphasigen Aufbau haben – z. B. Sandstein (Quarkörner und Poren) oder kunststoffgebundene energetische Materialien (Kristalle und Kunststoffmatrix) –, auf einer Abstraktionsebene beschrieben werden, die diese innere Struktur nicht explizit berücksichtigt (Makroskala). Um jedoch die Abhängigkeit des Materialverhaltens von dieser inneren Struktur (besser) zu verstehen, oder Modelle für ihre Beschreibung auf der o. g. Ebene ableiten zu können, kann auf einer detaillierteren Beschreibungsebene die heterogene Struktur explizit berücksichtigt (Mesoskala) und ihr Einfluss auf das Materialverhalten systematisch untersucht werden. Darauf basierend können verbesserte Materialmodelle für die Makroskala abgeleitet und Materialien durch gezielte Änderung ihrer inneren, heterogenen Struktur hinsichtlich gewünschter Materialeigenschaften optimiert werden.

Für numerische Simulationen auf Basis der Kontinuumsmechanik sind hierbei zum einen repräsentative und realitätsnahe geometrische Modelle notwendig, die den heterogenen Aufbau des Materials wiedergeben; zum anderen sind aber auch geeignete Materialmodelle für die einzelnen Konstituenten sowie Modelle für das Verhalten an den Materialgrenzen notwendig.

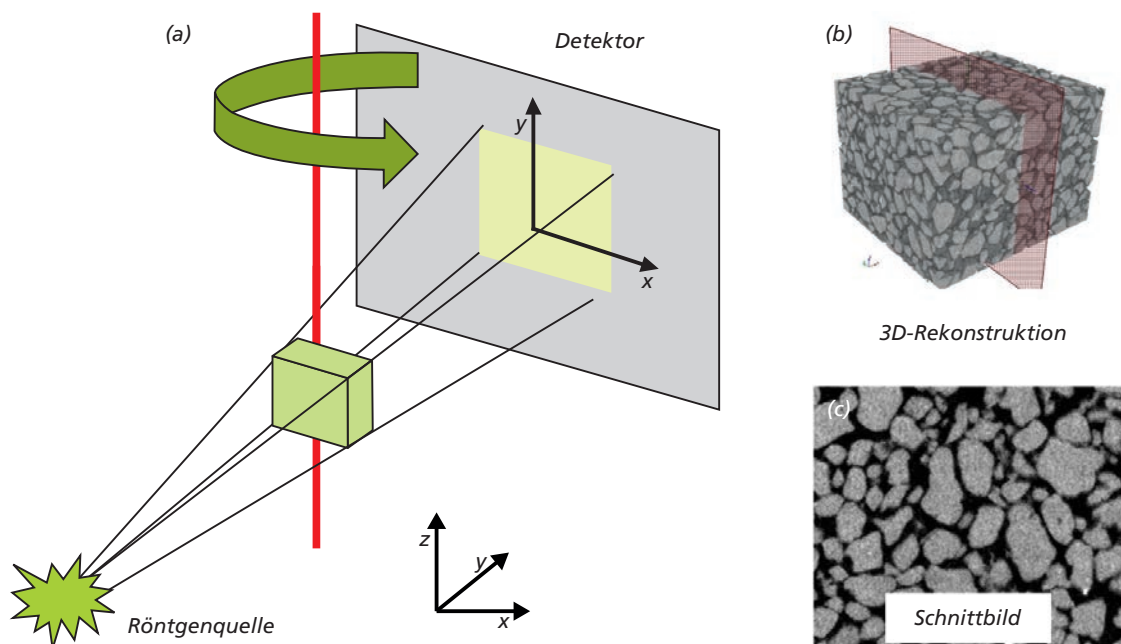
Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Beschreibung zweier am EMI entwickelter Methoden zur Erstellung repräsentativer geometrischer Modelle, auf deren Basis Finite-Elemente-Modelle für die numerische Simulation erstellt werden. Die Methoden basieren auf zwei unterschiedlichen Ansätzen. Der erste Ansatz nutzt 3D-Strukturinformationen

realer Materialproben, die mittels bildgebender Verfahren wie Röntgen-Computertomografie (im Weiteren kurz mit CT bezeichnet) gewonnen werden. Der zweite Ansatz verwendet statistische Informationen zum Strukturaufbau, z. B. Größenverteilung und Gesamtdichte von energetischem Material, um darauf basierend geometrische Modelle algorithmisch zu erzeugen. Die beiden Methoden werden im Folgenden vorgestellt.

Strukturerstellung auf Basis von CT-Daten

Während die Computertomographie ursprünglich vorwiegend im medizinischen Bereich eingesetzt wurde, wird sie heute auch zunehmend zur zerstörungsfreien Untersuchung von Materialien verwendet. Das Funktionsprinzip ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die zu untersuchende Probe wird von Röntgenstrahlung durchleuchtet und die durch das Material in Folge dichteabhängiger Strahlungsabsorption abgeschwächte Strahlung hinter der Probe mit einem Detektor vermessen. Auf diese Weise erhält man ein zweidimensionales »Röntgenshattenbild« der Probe. Durch eine Vielzahl solcher Messungen bei unterschiedlichen Winkeln, hier realisiert durch eine schrittweise Drehung der Probe, kann aus den so gemessenen 2D-Projektionen auf eine räumliche Dichteverteilung in der Probe zurückgerechnet werden (gefilterte Rückprojektion). Das Ergebnis kann beispielsweise als dreidimensionales Grauwertbild (Abbildung 3 (b)) oder als beliebig orientiertes 2D-Schnittbild (Abbildung 3 (c)) dargestellt werden.

Auf der Grundlage dieser räumlichen Grauwertverteilung – mathematisch durch eine skalare Funktion der räumlichen Koordinaten beschreibbar – sollen nun geometrische Strukturen erkannt werden. Dies ist im Allgemeinen kompliziert und sowohl von der Datenqualität als auch vom untersuchten Material abhängig, da die zu identifizierenden Strukturen oft nur schwer im allgemeinen Rauschen erkennbar sind. Daher wird zunächst in einem ersten Schritt mittels eines Glättungsfilters das Rauschen reduziert. Dabei wird jeder (Daten-)Punkt durch einen (gewichteten) Mittelwert seiner Umgebung ersetzt. Die Stärke der Glättung muss so justiert werden, dass sie möglichst viel Rauschen beseitigt ohne die zu suchenden Strukturen unkenntlich zu machen. In einem zweiten Schritt wird dann mit geeigneten Filtern die Materialstruktur hervorgehoben. Dazu werden im Wesentlichen die erste und die zweite Ableitung der Grauwertverteilung verwendet. Die erste Ableitung (Gradient des Skalarfeldes) gibt die Richtung der stärksten Grau-



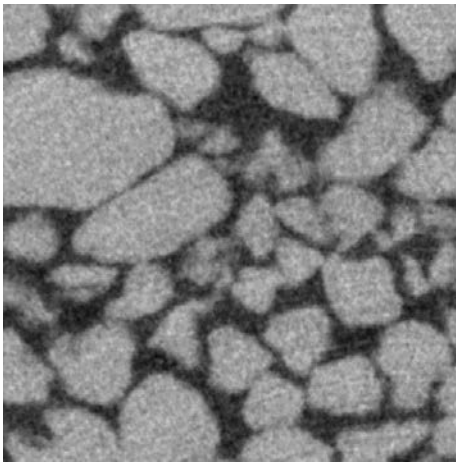
3 Prinzip der Röntgen-Computertomografie: (a) Aufnahme einer Vielzahl von Röntgenprojektionen unter verschiedenen Betrachtungswinkeln durch Rotation der Probe; Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse als 3D-Rekonstruktion (b) oder (virtuellem) 2D-Schnittbild (c).

wertänderung an und wird zur Randerkennung genutzt; die zweite Ableitung (Hesse-Matrix), die das Krümmungsverhalten beschreibt, ermöglicht das Erkennen weiterer Strukturen.

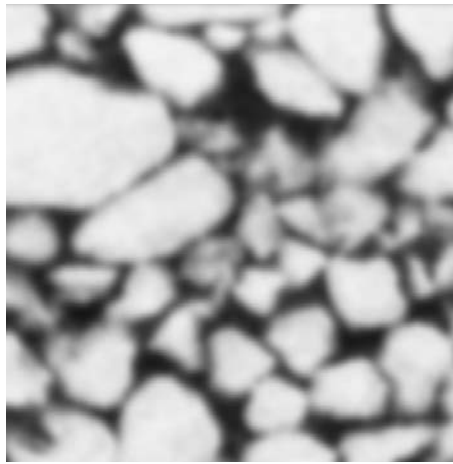
Die einzelnen Schritte werden beispielhaft in Abbildung 4 (nächste Seite) anhand der Analyse von geschüttetem Sand veranschaulicht. Hier sollen die einzelnen Sandkörner sowie die Berührungsflächen zwischen ihnen identifiziert werden. In Abbildung 4 (a) ist ein Ausschnitt aus einem typischen 2D-Schnitt einer CT-Aufnahme dargestellt, in Abbildung 4 (b) die zugehörige geglättete Version (Schritt 1), bei der eine deutliche Reduktion des Rauschens bei gleichzeitiger Erhaltung der wesentlichen Strukturen erreicht wurde. Als nächstes wird eine Reihe von Filtern angewandt (Schritt 2): Die Außengrenze von Körnern neben »leerem« Raum (Luft) wird über den Betrag der ersten Ableitung identifiziert. Ein hoher Wert zeigt den Übergang von Hell nach Dunkel an, was jedoch zur Erkennung von Kontaktflächen aneinander grenzender Körner nicht ausreicht, da in diesem Fall die erste Ableitung nahe null ist. Hier muss zusätzlich die zweite Ableitung betrachtet werden – im Dreidimensionalen eine 3×3 -Matrix –, welche die Helligkeitskrümmung in verschiedenen Raumrichtungen

beschreibt. Im dem etwas dunkleren Bereich zwischen zwei helleren Körnern muss diese Matrix genau einen deutlich positiven Eigenwert besitzen. Der zugehörige Eigenvektor gibt die Richtung der stärksten Helligkeitskrümmung und damit die Normalenrichtung der Kontaktfläche an. Auf diese Weise werden einzelne Körner identifiziert und voneinander abgegrenzt. Das Ergebnis ist eine Zuordnung einzelner Bildpunkte (Voxel) zu einzelnen Körnern, wie in Abbildung 4 (c) in Falschfarben dargestellt. Damit ist die Strukturerkennung abgeschlossen.

Um nun ein Finite-Elemente-Modell zu erstellen, müssen die identifizierten Strukturen vernetzt werden, wie in Abbildung 4 (d) anhand der Sandkornoberflächen gezeigt. Hierzu können frei verfügbare Programme wie TetGen oder Gmsh verwendet werden. Alternativ lassen sich auch auf der Oberfläche der identifizierten Sandkörner Punkte verteilen, die dann zu einem Netz verbunden werden. Der Vorteil eines eigenen Algorithmus zur Netzerstellung liegt in der Möglichkeit, Qualitätskriterien für das Netz direkt berücksichtigen zu können. Beispielsweise sind kleine Elemente in der Regel für dynamische Analysen unerwünscht, da sie unter Umständen zu sehr kleinen Zeitschrittlängen und damit erheblich längeren Rechenzeiten führen.



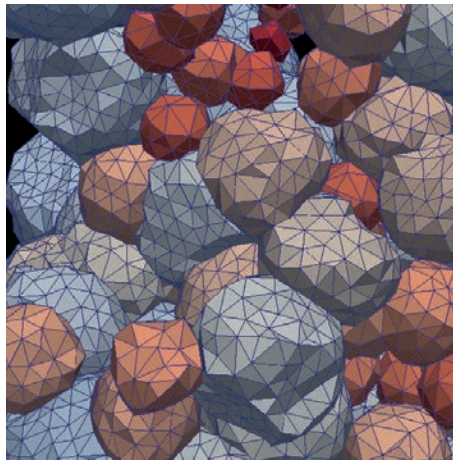
a) CT-Aufnahme (2D-Schnitt)



b) Glättung (2D-Schnitt)



c) Kornerkennung (2D-Schnitt)



d) Vernetzung der Körner (3D)

4 *Strukturerstellung auf Basis von CT-Daten. Schritte von einer CT-Aufnahme über Datenbearbeitung und Strukturerkennung hin zu einem Finite-Elemente-Netz.*

Algorithmische Strukturerstellung

Für die algorithmische Strukturerstellung werden statistische Informationen über das zu modellierende, heterogene Material benötigt. Diese Informationen können etwa auf CT-Daten oder 2D-Schliffbilddaten beruhen. Beispielsweise werden Angaben zur Formen- und Größenverteilung von Strukturelementen, wie Sandkörner oder Kristalle eines energetischen Materials, sowie deren Dichte benötigt. Nach diesen Vorgaben wird mittels eines weiter unten beschriebenen Algorithmus ein geometrisches Modell erstellt. Vorteile des algorithmischen Ansatzes sind, dass auf einfache Weise Vorgaben, wie etwa der Anteil der Strukturkomponenten im Gesamtvolumen oder deren Größenverteilung, für Parameterstudien variiert werden können; oder auch die Erstellung räumlich periodischer Modelle, die für bestimmte Fragestellungen nützlich sind. Im Folgenden

wird der Algorithmus beispielhaft für ein heterogenes Gemisch aus Kristallen und einer sie umgebenden, homogenen Matrix dargestellt.

Als Ausgangsdaten benötigt man eine Verteilung der Kristallgrößen und -formen. Wir gehen hier von der in Abbildung 5 gezeigten realistischen Größenverteilung der Kristalle aus. Die Definition der Formen erfolgt über die Angabe von Halbräumen, aus deren Schnittmenge sie sich ergeben. Sie sind somit stets konvex und lassen sich über Oberflächen, Kanten und Knoten beschreiben. Diese Formen werden zunächst überdeckungsfrei und in zufälliger Orientierung in einem periodischen Raum verteilt (Abbildung 5 (a)). Um eine höhere, vorgegebene Dichte zu erreichen, wird der Raum in einem nächsten Schritt gleichmäßig verkleinert, wobei sich die Kristalle bei Kontakt

verschieben und drehen können. Als Letztes werden die Kristalle am Rand des Periodizitätsvolumens abgeschnitten (Abbildung 5 (b)). Die Strukturerstellung ist damit abgeschlossen. Ein entsprechendes Finite-Elemente-Modell ist in Abbildung 5 (c) dargestellt. Für die Vernetzung wurde das Programm Gmsh verwendet. Auch hier ist darauf zu achten, dass keine zu kleinen Elemente auftreten. Dazu muss bereits bei der Strukturerstellung darauf geachtet werden, dass beim Abschneiden am Rand des Periodizitätsvolumens keine zu kleinen Oberflächen entstehen und die Kristalle nicht zu dicht aneinander liegen.

Eine weitere Herausforderung an die algorithmische Strukturerstellung ist, zu einer besonders hohen Dichte zu gelangen. Dies ist ein nicht-triviales Problem; man denke

z. B. an die dichteste Kugelpackung gleich großer, sich nicht überdeckender Kugeln im dreidimensionalen Raum, bei der eine Packungsdichte von »nur« etwa 74 Prozent erreicht wird.

Abbildung 5 (d) zeigt exemplarisch eine Simulation mit dem EMI-Hydrocode SOPHIA, bei der die Materialprobe in einer Richtung unter Zug belastet wird, bis sich Risse ausbilden.

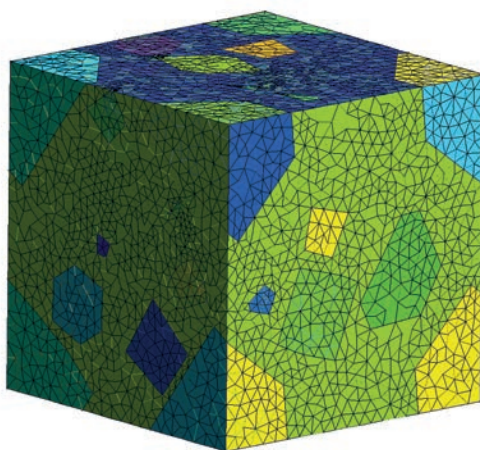
Mit den beiden neuen Methoden stehen dem EMI weitere wertvolle Werkzeuge zur Erstellung geometrischer Strukturen heterogener Materialien auf der Mesoskala zur Verfügung. Sie bilden eine wesentliche Grundlage für die numerische Simulation.



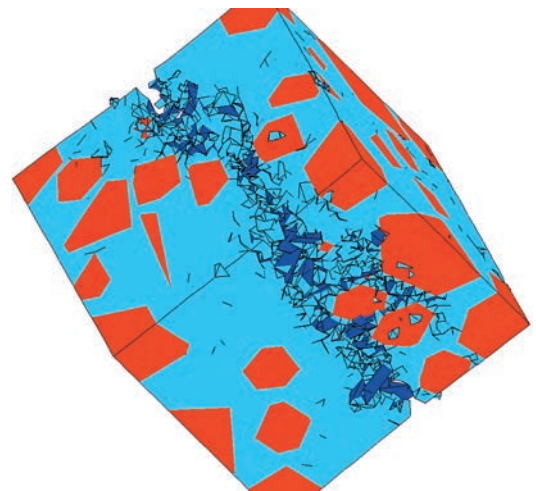
a) Zufällige Verteilung von Kristallen



b) Periodisch abgeschnittene Kristalle



c) Vernetzung mit Gmsh



d) SOPHIA-Modellsimulation

5 Algorithmische Strukturerstellung, Vernetzung und SOPHIA-Modellsimulation.

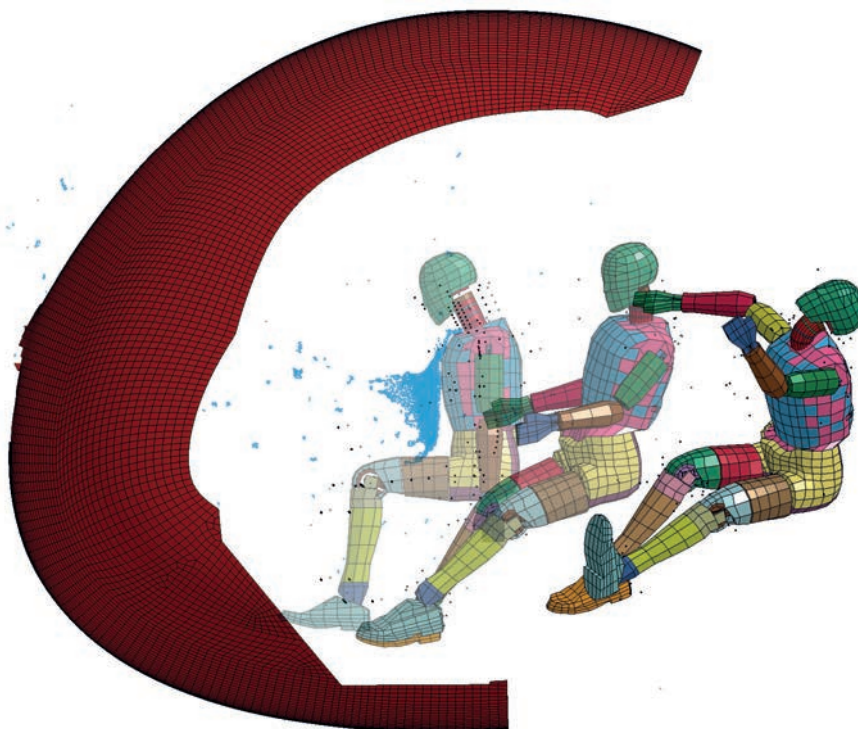
Neue Methoden zur verbesserten Simulation von Vogelschlag

Vogelschlag bezeichnet die Kollision eines Vogels mit einem Flugzeug. Obwohl ein Vogel deutlich leichter, kleiner und viel weniger hart als die exponierten Teile eines Flugzeuges ist, werden Vögel bei Relativgeschwindigkeiten von bis zu 300 Kilometern pro Stunde, welche typischerweise während der Start- und Landephase in Bodennähe erreicht werden, zu gefährlichen Geschossen mit enorm hoher Durchschlagskraft.

Über die Höhe und das Ausmaß der Schäden durch Vogelschlag im zivilen Luftverkehr gibt es Schätzungen von einigen hundert Millionen US-Dollar bis zu mehr als einer Milliarde US-\$ weltweit pro Jahr. Allerdings betrifft Vogelschlag nicht nur die größtenteils für zivile Transportzwecke benutzten Flugzeuge mit klassischen Starrflügeln und vergleichsweise kleinen und daher stabilen Sichtfenstern für das Cockpit. Hubschrauber sind durch ihre niedrige Einsatzhöhe und ihre vergleichsweise sehr großen Sichtfenster ungleich stärker durch Vogelschlag gefährdet.



Abbildung 6 zeigt ein beispielhaftes Szenario für einen Vogelschlag: Das Ersatzmodell eines Vogels durchschlägt die Schutzscheibe eines Helikopters. Die verbleibende kinetische Energie des Vogels ist so hoch, dass eine vom Vogel getroffene Person ernsthaft verletzt werden kann. Deshalb ist eine konstruktive Auslegung des Hubschrauber-Cockpits für erhöhte Sicherheit gegen Vogelschlag besonders wichtig.

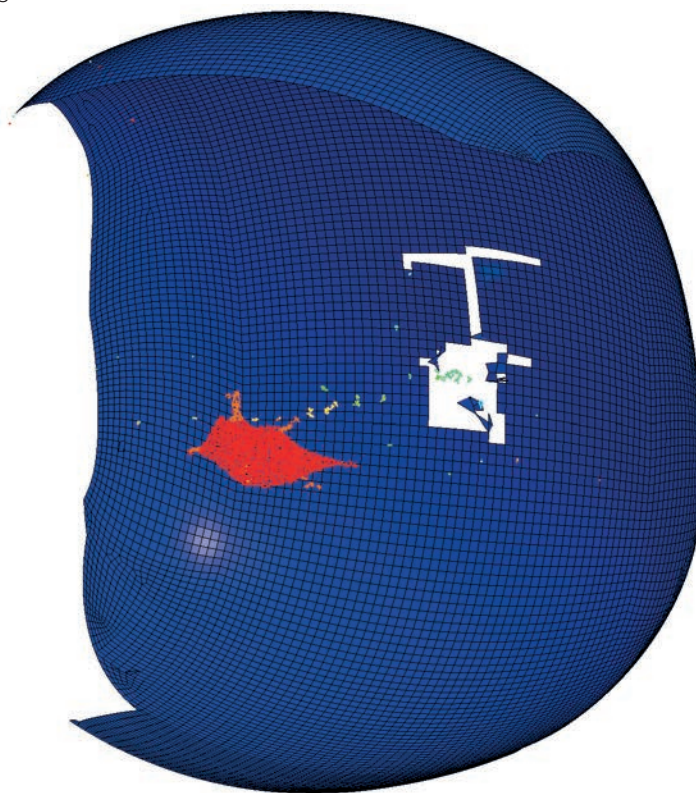


6 Vogelschlag-Szenario. Ein Ersatzmodell eines Vogels (blaue Partikel) durchschlägt, von links kommend, die Sichtscheibe eines Bell MH6 »Littlebird« Helikopters. Die Beschleunigung des Crashtests-Dummies dient zur Visualisierung der nach Durchbruch durch die Scheibe verbleibenden kinetischen Energie des Vogels.

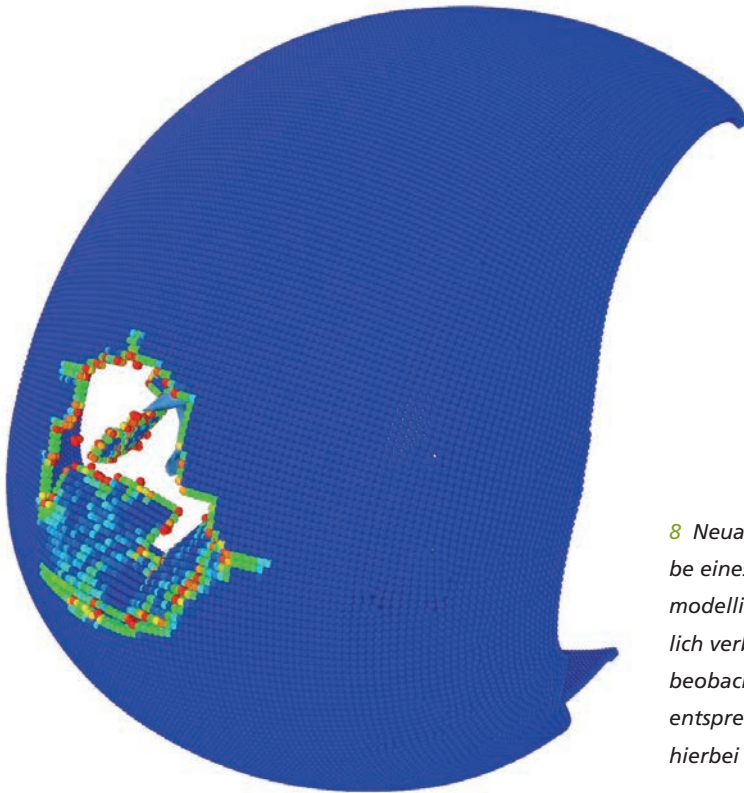
Eine derartige konstruktive Auslegung benötigt jedoch exakte Informationen über die zu erwartenden Belastungen. Diese Informationen können nur durch eine Kombination aus Experimenten und Simulationen durch numerische Modelle geliefert werden. Da Experimente – insbesondere Beschussexperimente mit einem Vogelmodell – jedoch mit einem sehr hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden sind, besteht ein großes Interesse daran, den experimentellen Aufwand gering zu halten und verstärkt numerische Modelle einzusetzen. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn die Vorhersagegüte der Simulation ausreichend hoch ist, um die Ergebnisse als vertrauenswürdig und belastbar einzustufen.

Das derzeit mit Abstand am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Simulation mechanischer Strukturbelastungen ist die Finite-Elemente-Methode. Dieses Verfahren unterteilt den zu berechnenden Körper in eine Vielzahl von einzelnen Elementen, welche miteinander verknüpft sind. Die Lösung für das kontinuumsmechanische Problem, wie Spannungen mit Deformationen zusammenhängen, wird als Lösung eines gekoppelten Satzes an Differentialgleichungen – die sogenannten Euler-Gleichungen – für jedes Element einzeln bestimmt. Die topologische Verknüpfung der Elemente miteinander sorgt für eine stetige und glatte Lösung für den gesamten Körper. Dieses Verfahren funktioniert sehr gut für Deformationen des Körpers, welche sich gutmütig verhalten und keine abrupten Änderungen der Spannungsverteilung mit sich bringen. Aber genau für die eigentlich interessanten Lastfälle, bei denen Risse entstehen und sich das Material geometrisch stark nicht-linear deformiert, versagt die Methode der finiten Elemente. Risse können mit den derzeit kommerziell eingesetzten Finite-Elemente-Verfahren nur durch Löschen einzelner Elemente beschrieben werden. Dies bedingt zwei nicht gewünschte Effekte: Zum einen führt der Materialverlust im numerischen Modell zu einem verfälschten Ergebnis unter Druckbeanspruchungen, da das entfernte Element nicht mehr unter Druck belastet werden kann. Andererseits können Risse nur entlang von Elementkanten verlaufen, was zu sehr unrealistischen Vorhersagen für die

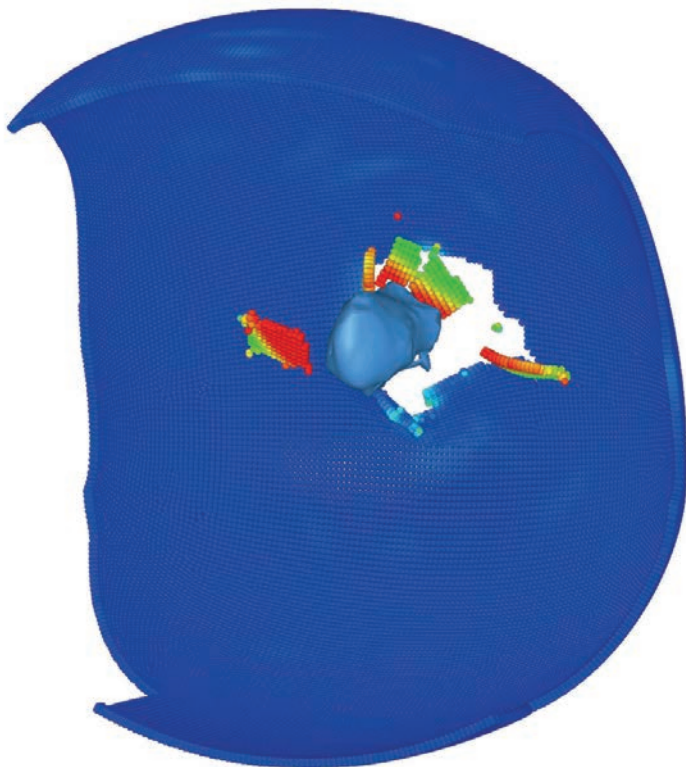
Form und Zahl von Bruchteilen eines versagten Körpers führt. Abbildung 7 illustriert diese Problematik am Beispiel der durch einen Vogel durchschlagenen Schutzscheibe: Das Versagensmuster der entstandenen Risse ist dominiert von numerischen Artefakten, nach innen in den Helikopter fliegende Trümmerteile der Scheibe können nicht verfolgt werden, da die entsprechenden Elemente nicht mehr existieren. Aus dieser Beobachtung lässt sich ableiten, dass sich die Finite-Elemente-Methode für dynamische Lastfälle mit extremen Versagensmustern ungeeignet ist.



7 Klassische Modellierung von Vogelschlag. Die Schutzscheibe eines Helikopters (in blau gezeigtes Netz) wird mit finiten Elementen modelliert. Ein Ersatzmodell eines Vogels durchschlägt die Schutzscheibe. Die hierbei entstehenden Risse verlaufen ausschließlich entlang bestehender Elementkanten. Es können keine nach innen in den Helikopter fliegenden Trümmerteile beobachtet werden, da diese Elemente bereits gelöscht wurden.



8 Neuartige Modellierung von Vogelschlag. Die Schutzscheibe eines Helikopters wird mit der netzfreien SPH-Methode modelliert. Die hierbei auftretenden Rissmuster zeigen deutlich verbesserte Übereinstimmung mit dem in Experimenten beobachteten Verhalten. Die Farben der Materialpunkte entsprechen einem Versagensindex, blau und rot bedeuten hierbei nicht bzw. vollständig versagt.



9 Neuartige Modellierung von Vogelschlag. Die Schutzscheibe eines Helikopters wird mit der netzfreien SPH-Methode modelliert. Im Gegensatz zur Finite-Elemente-Methode können realistische Trümmerteile der Schutzscheibe verfolgt werden, da keine Notwendigkeit zur Löschung dieser teilweise versagten Materialpunkte besteht. Die Farbskala zeigt die Geschwindigkeit der Materialpunkte, wobei rot einer Geschwindigkeit von 150 Kilometern pro Stunde entspricht.

Die beschriebenen Nachteile der Finite-Elemente-Methode können durch den Einsatz sogenannter netzfreier Methoden ausgeglichen werden. Hierbei wird das numerische Modell des zu berechnenden Körpers nicht in topologisch starr verknüpfte Elemente unterteilt, sondern mit Materialpunkten diskretisiert, welche nur als temporäre Stützstellen zur Lösung der Euler-Gleichungen dienen. Eine netzfreie Methode ist das sogenannte Smooth-Particle-Hydrodynamics-Verfahren, welches über die letzten zwei Jahrzehnte aktiv am Fraunhofer EMI weiterentwickelt wurde [1, 2], da aufgrund der hier gelegten Forschungsschwerpunkte Bedarf an numerischen Methoden besteht, welche extreme Deformationen und Versagen akkurat abbilden können. Ein im Jahre 2014 erzielter Durchbruch [3] hat dazu geführt, dass auch die Versagensmuster verhältnismäßig spröder Materialien mit guter Genauigkeit modelliert werden können. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der mit dieser netzfreien Methode erzielten Modellierung des Vogelschlags. Hierbei treten durch Rissausbreitung Versagensmuster auf, welche sehr gut mit experimentellen Beobachtungen korrelieren. Eine zweite in Abbildung 9 dargestellte Ansicht dieses Szenarios von der Innenseite des Cockpits aus zeigt zudem die Trümmerteile der durchschlagenen Schutzscheibe, welche mit hoher Geschwindigkeit verschiedene Orte im Innenraum erreichen können. Dieser neuartige Simulationsansatz besitzt somit eine verbesserte Vorhersagegüte zur Gefährdungsanalyse der Insassen, sodass eine konstruktive Auslegung zur Verminderung des Gefährdungspotenzials leichter erreicht werden kann.

Die dargestellten Simulationsergebnisse mit der netzfreien Methode wurden mit dem am EMI entwickelten Simulationsprogramm Smooth Mach Hydrodynamics berechnet. Dieses Programm beinhaltet neben den in [3] publizierten Stabilisierungsalgorithmen den neuesten Stand der Technik für die Simulation sehr starker Deformationen mit netzfreien Methoden. Zudem erlaubt es die Simulation sehr großer Systeme mit Millionen von einzelnen Materialpunkten aufgrund einer auf massiv parallele Berechnungen ausgelegter Programmarchitektur.

Referenzen

- [1] Hiermaier S., Könke D., Stilp A. J., Thoma K. (1997); Computational Simulation of the Hypervelocity Impact of Al-Spheres on Thin Plates of Different Materials. International Journal of Impact Engineering 20: pp. 363-374
- [2] Sauer M., Schäfer F., Hiermaier S. (2011) Simulation of High Velocity Impact in Fluid-Filled Containers Using Finite Elements with Adaptive Coupling to Smoothed Particle Hydrodynamics. Proceedings of the 11th Hypervelocity Impact Symposium 2010, Freiburg, Germany, April 11-15, 2010, pp. 596-575.
- [3] Ganzenmüller G. C. (2014), An Hourglass Control Algorithm for Lagrangian Smooth Particle Hydrodynamics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, in press, DOI 10.1016/j.cma.2014.12.005



WERKSTOFFDYNAMIK

WERKSTOFFDYNAMIK

Nachhaltige und effizientere Ressourcennutzung gewinnt auch im Bereich der Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung. Die Forderung nach crashtsicheren Fahrzeugen bei gleichzeitig zunehmendem Leichtbau bildet in diesem Zusammenhang ein aktuelles Spannungsfeld. Der Einsatz neuer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen und die ständige Weiter- und Neuentwicklung von Bauteilen und Strukturen ermöglichen es, genau diesen scheinbaren Zielkonflikt bei der Fahrzeugentwicklung in Einklang zu bringen.

Im Luft- und Raumfahrtbereich werden schon seit längerer Zeit hybride Materialsysteme erfolgreich eingesetzt. Einer der bekanntesten Hybridwerkstoffe ist das glasfaserverstärkte Aluminium. Dieses sogenannte GLARE besteht aus vielen dünnen abwechselnden Schichten aus Aluminium und glasfaserverstärktem Kunststoff. Auch im Automobilbereich wird zunehmend der Einsatz von hybriden Werkstoffen untersucht, da sich hier bei gleicher oder sogar verbesserter Effizienz ein großes Leichtbaupotenzial bietet, zum Beispiel im Bereich der passiven Crashtsicherheit. Im ersten Beitrag der Abteilung Werkstoffdynamik wird ein aktuelles gemeinsames Forschungsprojekt mit einem großen Automobilhersteller vorgestellt. Hier wird das Potenzial von hybriden Crashstrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen und metallischen Werkstoffen im Fahrzeugbereich untersucht.

Der Wandel hin zu alternativen Fahrzeugantrieben macht es notwendig, bisherige Fahrzeugstrukturen zu evaluieren und neue Strukturen zu entwickeln, die insbesondere möglichen neuen Gefahrenquellen beim Crash gerecht werden. Mit der Veränderung der Struktur bei Elektrofahrzeugen müssen auch die gültigen Crashtest-Normen und die standardisierten Tests der potentiellen Gefahrenquellen bei einem Crash überprüft und gegebenenfalls weiterentwickelt werden. Als Beispiel wären hier zerstörende Bauteilversuche an der Fahrzeugbatterie zu nennen. Im zweiten Beitrag der Abteilung wird die Untersuchung solcher Fragestellungen anhand eines internationalen Forschungsprojekts vorgestellt. Dabei werden auch Empfehlungen für die passive Sicherheit zukünftiger Elektrofahrzeuge abgeleitet.



Dr.-Ing. Ingmar Rohr

Abteilungsleiter Werkstoffdynamik

Abteilungsleiter bis 31.12.2014

Telefon 0761 2714-416 | ingmar.rohr@emi.fraunhofer.de



Dr.-Ing. Jens Fritsch

Abteilungsleiter Werkstoffdynamik

Abteilungsleiter seit 1.1.2015

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

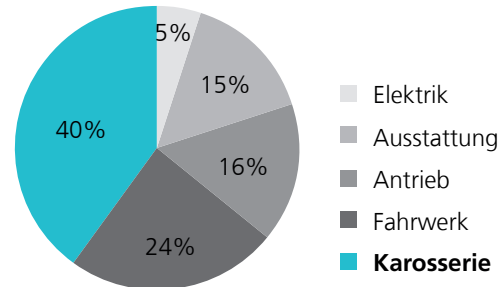
Hybrider Leichtbau aus Composites und Metallen für den Einsatz in crashbelasteten Fahrzeugstrukturen

Vor allem aufgrund strenger werdender Regelungen für die CO₂-Emission zukünftiger Fahrzeuge ist die Automobilindustrie bemüht, den Kraftstoffverbrauch neuer Modelle zu minimieren. Betrachtet man die Energiebilanz eines Pkw in urbanem Verkehr, wird deutlich, dass etwa 90 Prozent des Kraftstoffverbrauchs direkt von der Masse des Fahrzeugs abhängig sind. Folglich stellen gezielte Leichtbaumaßnahmen eine sehr effektive Stellschraube für die Effizienzsteigerung und die Emissionsreduktion dar. Die Karosserie macht mit etwa 40 Prozent den größten Teil in der Gewichts zusammensetzung aktueller Fahrzeugmodelle aus (Abbildung 1). Daraus lässt sich der hohe Stellenwert ableiten, den das Thema Karosserieleichtbau aktuell bei fast allen Automobilherstellern besitzt.

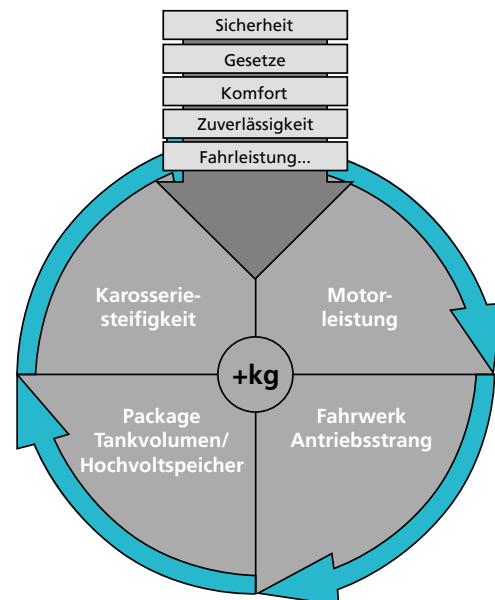
Aufgrund steigender Anforderungen an den Fahrkomfort und die Fahrzeugsicherheit war in den letzten Jahrzehnten eine kontinuierliche Gewichtszunahme über die Fahrzeuggeneration der meisten Modelle zu beobachten. Dabei führen sich gegenseitig verstärkende Effekte vor allem bei Elektrofahrzeugen in eine Spirale der Gewichtszunahme, die im Sinne der Effizienzsteigerung durchbrochen werden muss (Abbildung 2). Die kontinuierliche Verfolgung der Einzelstrategien (integrativer, konstruktiver, werkstofflicher Leichtbau) in den vergangenen Jahren hat zu einer Erschöpfung der Potenziale für die einfache und vor allem kostengünstige Gewichtsreduzierung von Fahrzeugkarosserien geführt. Deshalb verspricht insbesondere die synergetische Kombination der verschiedenen Leichtbaustrategien die Möglichkeit, die Spirale der Gewichtszunahme zu durchbrechen und sie sogar in eine Leichtbaupirale umzukehren. Eine konsequente Fortführung dieses Gedankens führt auf die Entwicklung integrativer Strukturen in Multimaterialbauweise, die ein auf die Beanspruchungen maßgeschneidertes Eigenschaftsprofil mit »dem richtigen Material an der richtigen Stelle« aufweisen.

Tragende Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVKs) oder »Composites« gehören im Bereich der Luft- und Raumfahrt bereits zum Stand der Technik. Durch die kontinuierliche Optimierung der Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse, aber auch durch eine erhöhte Leichtbaukostentoleranz elektrifizierter Fahrzeuge, rücken FVKs immer stärker in den Fokus der Automobilindustrie.

Gewichtsanteile im Fahrzeug



1 Gewichts zusammensetzung moderner Pkws.



2 Spirale der Gewichtszunahme in der Fahrzeugentwicklung.

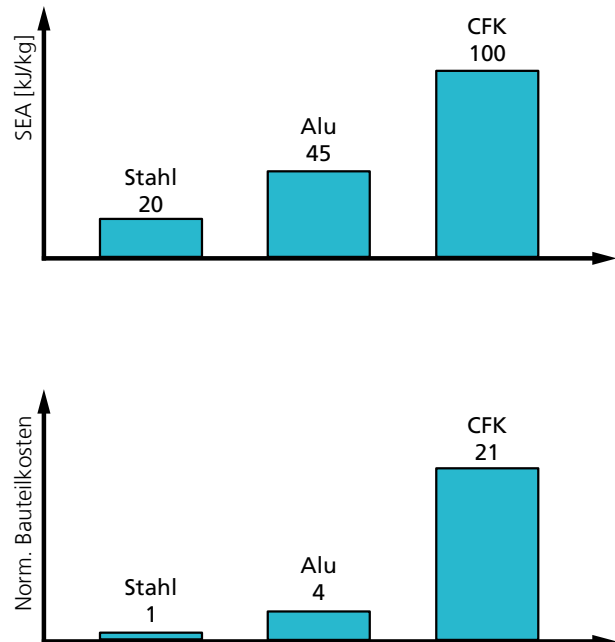
In Nischenanwendungen bereits seit Jahren etabliert, beweisen teilweise beachtliche Composite-Umfänge ihre Realisierbarkeit in aktuell erscheinenden Modellen aus klein- und mittelgroßen Serien. Obwohl dabei teilweise bereits tragende Karosseriestrukturen in Composite-Bauweise ausgeführt sind, finden sich in den meisten crash-relevanten Fahrzeugbereichen konventionelle Werkstoffe wie Stahl oder Aluminium, da sie ein meist robustes und stabiles Versagensverhalten aufweisen.

Die maßgeblichen Struktureigenschaften crashbelasteter Fahrzeugbereiche sind vor allem die Steifigkeit und die Energieabsorption bei der Deformation (»Knautschzone«). Insbesondere kohlenstoff- oder carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) besitzt in Abhängigkeit der Faserarchitektur eine gewichtsspezifische Steifigkeit und Energieabsorp-

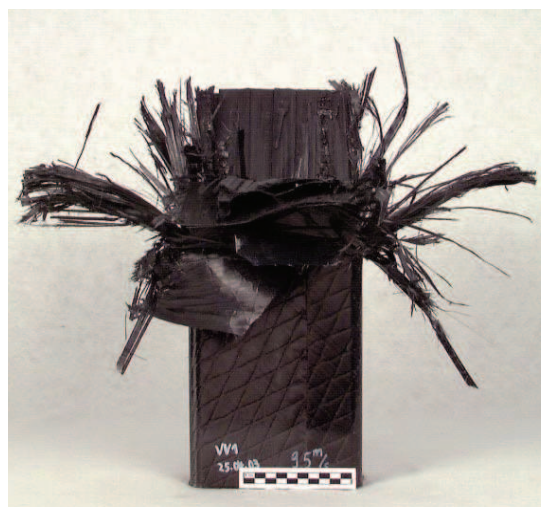
tion beim kontinuierlichen Versagen, die jene von Stahl oder Aluminium um Größenordnungen übertreffen. Die größten Hemmnisse bei der Realisierung von Crashstrukturen aus CFK sind das instabile Versagensverhalten und die Bauteilkosten, die ein Vielfaches derer von Stahl und Aluminium betragen (Abbildung 3).

Auf Basis der angeführten vorangegangenen Entwicklungen erforscht ein aktuelles Projekt am Fraunhofer EMI in Kooperation mit einem großen Automobilhersteller die Potenziale von Crashstrukturen in FVK-Metall-Hybridbauweise. Das Ziel ist dabei, die Potenziale der Einzelmaterialien zu nutzen und deren Nachteile dabei gleichzeitig zu kompensieren. Beispielsweise wäre eine hybride Crashstruktur denkbar, die das stabile, robuste Versagensverhalten von Stahl mit der hohen spezifischen Energieabsorption von CFK kombiniert und dabei leichter als Stahl und günstiger als eine reine CFK-Struktur wäre (Abbildung 4).

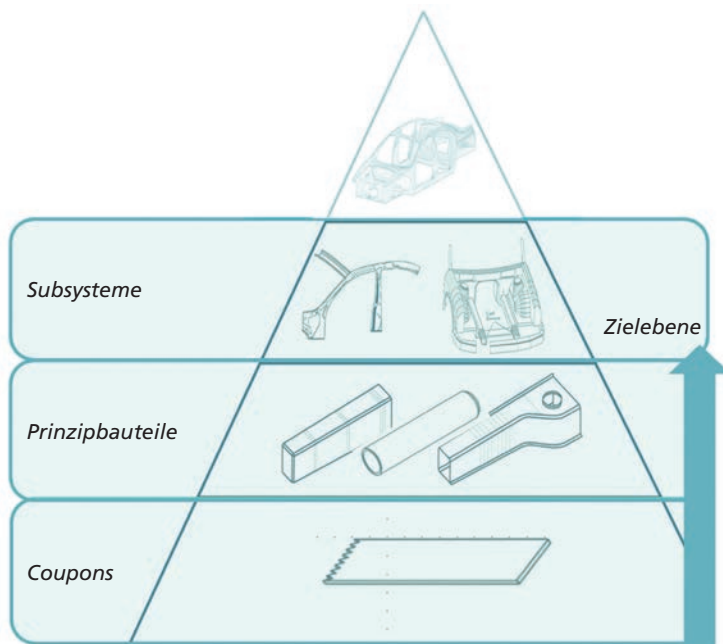
Im Sinne einer werkstoff- und anforderungsgerechten Auslegung hybrider Crashstrukturen ist ein genaues Verständnis der werkstofflichen Wirkmechanismen und mechanischen Eigenschaftsprofile essentiell. Selten lassen sich dabei maßgebliche Kerneigenschaften der Einzelmaterialien, wie im obigen Beispiel, ohne Quereinflüsse schlicht zusammenführen.



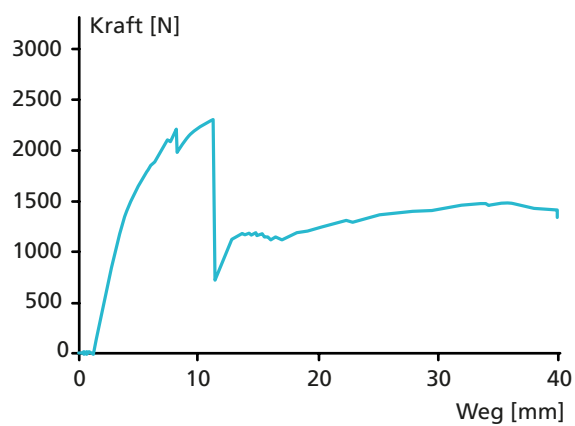
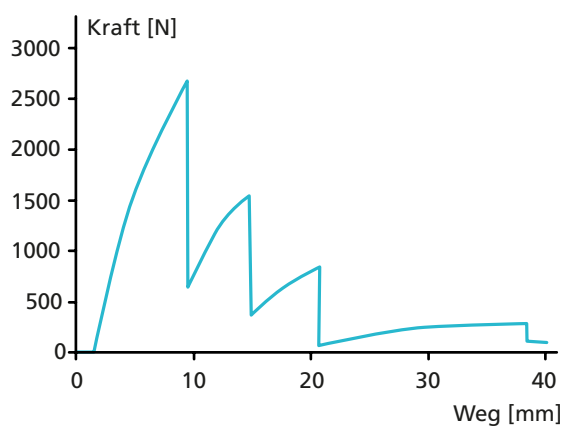
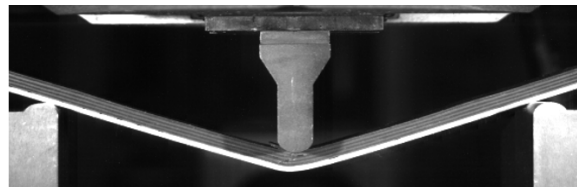
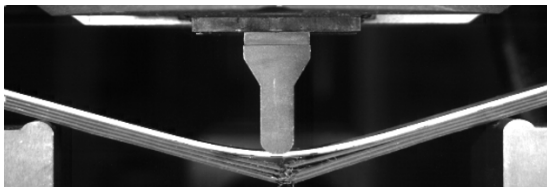
3 Spezifische Energieabsorption bei axialer Belastung (oben) und normierte Kosten für Bauteile gleicher Funktion (Richtwerte).



4 Versagensbilder Metall und FVK.



5 Systematische Charakterisierung – Building Block Approach.

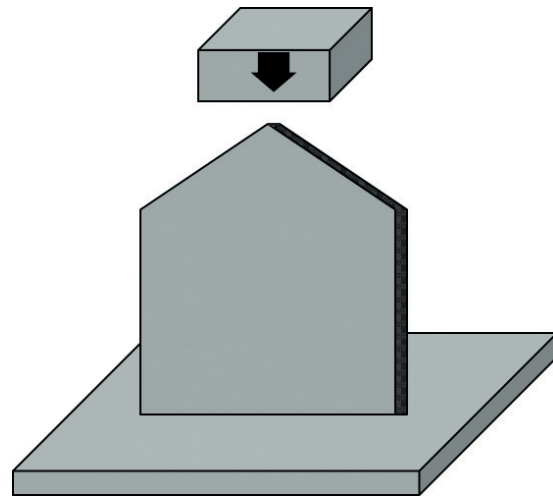


6 Energieaufnahme in Abhängigkeit der Belastungsrichtung bei der 3-Punkt-Biegung.

Um eine systematische Analyse wichtiger Materialkombinationen aus FVKs und Metallen für die Anwendung in crashbelasteten Fahrzeugstrukturen vorzunehmen, wird ein Building-Block-Approach verfolgt (Abbildung 5). Hierbei steigt die Komplexität der getesteten Strukturen bei einer gleichzeitigen Abnahme der Variantenanzahl unter Einbezug der Erkenntnisse aus der jeweils vorangegangenen Stufe.

Auf der ersten Ebene wird ein breites Spektrum an Materialkombinationen einem Screening-Prozess unterzogen. Dabei wird der Ausschluss von Geometrieinflüssen auf die Versuchsergebnisse mithilfe möglichst einfacher Coupon-Proben angestrebt. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei grundlegende Materialkennwerte wie die Steifigkeit, die Festigkeit und die Bruchdehnung. Weitere, kombinierte Kennwerte wie die absorbierte Energie sollen erste Hinweise auf crash-spezifische Kriterien geben. Neben konkreten Werten, die das Belastungs- und Versagensverhalten der hybriden Coupon-Proben beschreiben, interessieren vor allem auch qualitative Merkmale und sogenannte Wirkmechanismen, die sich bei bestimmten Materialkombinationen einstellen. Die experimentelle Charakterisierung der Coupon-Proben findet mithilfe quasistatischer und dynamischer Zug- und 3-Punkt-Biegeversuche statt. Dieser Screening-Prozess dient der Potenzialbewertung verschiedener hybrider FVK-Metall-Kombinationen und zur Quantifizierung des Einflusses maßgeblicher Werkstoffparameter, wie der Stahlsorte, der Art und Orientierung der Verstärkungsfasern sowie der Anzahl der Laminatschichten. Beispielhaft für die Analyse hybrider Wirkmechanismen kann die Energieaufnahme bei der 3-Punkt-Biegung in Abhängigkeit der Belastungsrichtung angeführt werden. Wie in Abbildung 6 zu sehen, wird bei einer Belastung von CFK auf der untenliegenden Zugseite nur knapp die Hälfte der Energie absorbiert, wie bei Belastung auf der oberen Druckseite. Dies steht im Widerspruch zu allgemeinen Konstruktionsrichtlinien, die stets eine Zugbelastung von FVKs priorisieren.

Um bereits auf Coupon-Ebene möglichst umfängliche Aussagen über das spätere Crashverhalten der verschiedenen Hybridkombinationen treffen zu können, wird das Versuchsprogramm um einen weiteren Versuchstypen erweitert. Einer der wichtigsten Lastfälle beim Fahrzeug-crash ist die axiale Druckbelastung, die (vor allem in der Knautschzone) bestenfalls ein stabiles Versagensverhalten



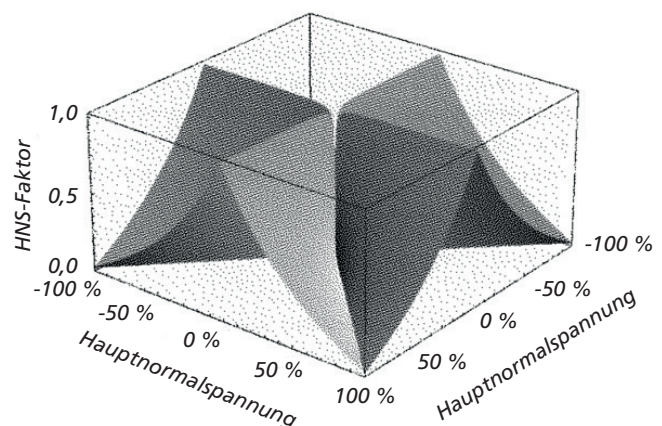
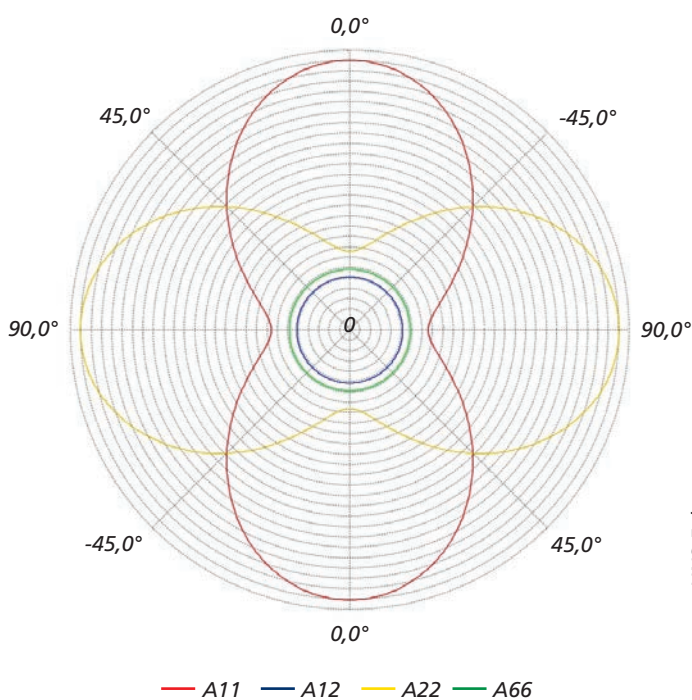
7 Axiale Stauchversuche an hybriden Couponproben.

der belasteten Hohlprofile mit hoher Energieabsorptionsrate hervorruft. Hierzu werden fünfeckige Hybridproben und ein zugehöriger Versuchsaufbau entworfen, der eine Untersuchung unter axialer Stauchung bereits auf Coupenebene ermöglicht. Neben der maximalen Last und der Energieabsorption ist das Maß der Übertragbarkeit der gewonnenen Daten auf Bauteilebene eine der Zielaussagen dieses speziellen Versuchstyps.

Ebenso wie das Verständnis für das mechanische Verhalten und die Wirkmechanismen innerhalb des hybriden Werkstoffverbunds ist das Verständnis für die jeweiligen crash-spezifischen Anforderungen in den verschiedenen Bereichen der Karosserie entscheidend. Hierzu erfolgt die Auswertung einer Vielzahl an numerischen Crashsimulationen von Gesamtfahrzeugen in den einschlägigen Lastfällen. Die Simulationsergebnisse werden hinsichtlich kritischer Kennwerte analysiert und überlagert, sodass sich eine globale Übersicht über die vorherrschenden Belastungszustände in den jeweiligen Strukturregionen ableiten lässt. Von besonderem Interesse ist hier beispielsweise das Maß der Belastungsanisotropie. Zeichnet sich in einem Strukturbereich ein besonders anisotroper Belastungszustand ab,

gibt es also eine besondere Vorzugsrichtung der Belastung über alle kritischen Lastfälle, so ist dies ein Hinweis auf ein großes Potenzial composite-intensiver Crashstrukturen an dieser Stelle. Dies ist auf die meist anisotropen, also stark richtungsabhängigen, mechanischen Eigenschaften von leistungsfähigen FVKs zurückzuführen (Abbildung 8).

Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer effizienten Methode zur Modellierung hybrider Crashstrukturen für die numerische Simulation in der Vorentwicklung neuartiger, composite-gerechter Fahrzeugarchitekturen. Die größte Herausforderung dabei ist die richtige Balance zwischen einer detailgetreuen Erfassung der besonders für FVKs hochgradig komplexen Versagensmechanismen und einer zeit- und berechnungseffizienten Modellierung mit einer hinreichenden Genauigkeit. Da Entwicklungsprozesse in der Fahrzeugsicherheit mit vielen komplexen Gesamtfahrzeugsimulationen besonders berechnungsintensiv sind, ist die Effizienz eines der wichtigsten Kriterien bei der Entscheidung für oder gegen die Anwendung einer Methode in der (Vor-)Entwicklung von Crashstrukturen.



8 Anisotropie der FVKs – Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften und der Belastungen.

Crashsimulationen für die Elektromobilität

Neue Herausforderungen durch Elektrofahrzeuge

Die Entwicklung und die Einführung von alternativ angetriebenen Fahrzeugen mit modernen Designs auf öffentlichen Straßen wirft die Frage auf, inwieweit die Crash-Sicherheit zwischen konventionell und alternativ angetriebenen Fahrzeugen durch die aktuell geltenden Crash-Test-Richtlinien noch erfüllt werden kann und ob im Crash Kompatibilitätsprobleme zwischen der alten und der neuen Fahrzeuggeneration auftreten können. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die aktuellen Richtlinien in Bezug auf die Anforderungen der neuen Fahrzeuge weiterentwickelt werden müssen und wenn ja, in welchen Punkten.

Forschungsprojekt EVERSAFE

Diesen Fragen ist das Fraunhofer EMI zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, dem schwedischen Forschungsinstitut für Verkehr und Transportwesen (VTI), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Volvo Car Corporation (VCC) in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit dem Namen »Everyday Safety for Electric Vehicles« (oder kurz EVERSAFE¹) nachgegangen. Das Projekt wurde mit Hilfe der ERA-NET Electromobility+ Gemeinschaft durch das 7. Forschungsrahmenprogramm der EU gefördert. Das Fraunhofer EMI konnte hierbei wichtige Ergebnisse insbesondere im Bereich der passiven Fahrzeugsicherheit beitragen (Abbildung 9). Aus den Untersuchungen wurden für Elektrofahrzeuge kritische Belastungsfälle identifiziert und Empfehlungen für verbesserte Crash-Test-Richtlinien erarbeitet.

Werkstoffcharakterisierung von Lithium-Ion-Zellen

Ein wichtiger Arbeitsschritt war es, eine geeignete Beschreibung des strukturellen Verhaltens von aktuellen Batteriezellen unter dynamischen Belastungen zu finden. Eine Mehrzahl von Veröffentlichungen zu Zellversuchen und Zellsimulationen betreffen noch immer hauptsächlich thermische und elektrische Fragestellungen. Im Crashfall dagegen sind die mechanischen Eigenschaften und Verformungen der Zelle entscheidend und diese müssen bei der Modellierung besonders berücksichtigt werden.

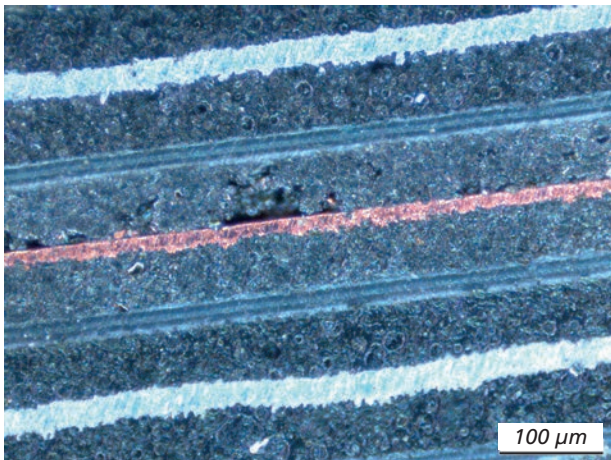
Daher wurden am Fraunhofer EMI zunächst Charakterisierungsversuche an Zellmaterialien und Experimente an Lithium-Ion-Pouch-Zellen durchgeführt. Mikroskopische Analysen ermöglichten es dabei, die wesentlichen Materialschichten und ihre Schichtdicken zu identifizieren (Abbildung 10, nächste Seite).

Die Proben für die Versuche wurden direkt aus der Zelle ausgestanzt, wodurch sowohl jede Einzelschicht als auch der ganze Schichtverbund charakterisiert werden konnte. Die mit Hilfe der Materialcharakterisierung kalibrierten numerischen Modelle haben es ermöglicht, ein genaues Verständnis über die auftretenden Versagensmechanismen zu generieren, insbesondere zur Vorhersage von Kurzschlüssen.

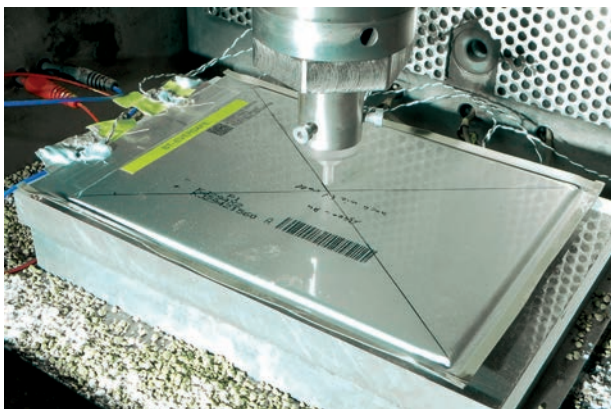
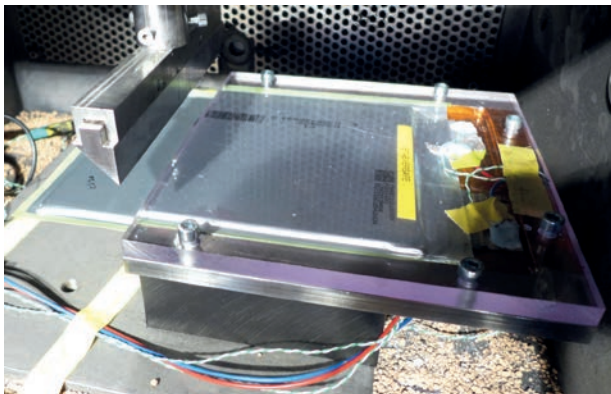


9 Aufgaben des Fraunhofer EMI im Projekt EVERSAFE: Von der Zellenanalyse über die Modellierung von Zellen, Zellmaterialien und Fahrzeugbatterien bis hin zur Simulation ganzer Fahrzeugmodelle unter beliebigen Crashfällen.

¹ Mehr Informationen unter der Internet-Adresse www.eversafe-project.eu.



10 Mikroskopische Analyse einer Lithium-Ion-Zelle zur Identifizierung der Einzelschichten und der Schichtdicken.



11 Durchführung von zerstörenden Bauteilversuchen an vollständig aufgeladenen Lithium-Ion-Zellen. Oben: Scherversuche an einer Zelle mit einem scharfkantigen Eindringkörper; Unten: Penetrationstest mit rundlichem Penetrator aus Kunststoff.

Im weiteren Verlauf wurden verschiedene zerstörende Bauteilversuche an geladenen Zellen durchgeführt (Abbildung 11). Bei diesen sogenannten »Abuse-Tests« wurden zum einen Penetrationsversuche mit stabförmigen Eindringkörpern, zum anderen Scherversuche mit scharfkantigen Schneiden durchgeführt. Das Ziel der Scherversuche bestand darin, das Auftrennen des Zellkörpers durch das Einschneiden eines breiten scharfkantigen Metallbleches zu untersuchen, was im Crash-Fall ein nicht unwahrscheinliches Szenario darstellen könnte. Erstaunlicherweise haben diese bislang noch nicht klassifizierten Tests selbst bei vollständig aufgeladenen Zellen zu keiner chemischen Reaktion oder gar einem Kurzschluss geführt.

Außerdem wurden Penetrationstests mit spitzen Eindringkörpern durchgeführt, sowohl nach den Standardbedingungen als auch nach eigenen freien Vorgaben. Gegenüber dem genormten Versuch gemäß SAE J2464 unterscheidet sich der Penetrator des eigenen, nicht genormten Versuchs in der geometrischen Form und auch im verwendeten Material: Der In-House-Penetrator hat keinen spitzen, sondern einen rundlichen Kopf und besteht im Gegensatz zum standardisierten Penetrator nicht aus Metall, sondern aus Kunststoff, so dass eigene elektrische Einflüsse ausgeschlossen werden können.

Alle Tests wurden mehrmals mit derselben Konfiguration durchgeführt und haben immer zum selben Ergebnis geführt: Der Standardversuch mit dem relativ spitzen und metallischen Eindringkörper führte dabei nie zu einer Reaktion, während der In-House-Test stets zu einem Kurzschluss mit heftigen elektrochemischen Folgen führte.

Modellierung und Validierung von Lithium-Ion-Zellen

Die Modellierung der Lithium-Ion-Zellen und die entsprechenden Simulationen ermöglichten es dann, die unterschiedlichen Versagensarten im Detail nachzuvollziehen (Abbildung 12, nächste Seite). Im Fall des Standardversuchs wird die Zelle zwar aufgetrennt, die Einzellagen falten sich, aber ein direkter Kontakt zwischen den Elektroden wird verhindert. Im Fall des nicht-genormten Versuchs werden die Einzellagen stark deformiert, der Separator wird lokal beschädigt, bis die Separator-Schicht versagt und ein Kurzschluss eintritt.

Modellierung und Simulation von Elektrofahrzeugen bei Crashbelastungen

Um Aussagen über das Crashverhalten von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zu bekommen, musste ein entsprechendes numerisches Fahrzeugmodell erstellt werden. Hierzu wurde auf das am US-amerikanischen National Crash Analysis Center frei verfügbare Finite-Elemente-Modell des Toyota Yaris zurückgegriffen, welches grundlegend überarbeitet und verbessert sowie mit experimentellen Daten aus der Crash-Datenbank der BASt validiert wurde.

Eine Studie über mögliche Batteriepositionen im Innern des Fahrzeugs und eine Studie zu aktuellen Designkonzepten hat ergeben, dass der unfallstatistisch sicherste Bauraum für Fahrzeugbatterien stets im Tunnelbereich des Fahrzeugs liegt.

Aus diesem Grund wurde das gegebene Fahrzeugmodell des Toyota Yaris in ein Elektrofahrzeug der ersten Generation umgewandelt, indem eine eigenständig modellierte Tunnelbatterie in die bestehende Fahrzeugstruktur integriert und der Verbrennungsmotor durch einen kleineren Elektromotor ersetzt wurde. Das Batterie-Modell besteht aus 192 Pouch-Zellen und ist in acht Module aufgeteilt. Sowohl die plastische Verzerrung des Batteriegehäuses als auch die in den Modulen auftretenden Kräfte und Beschleunigungen wurden verwendet, um den Grad der Gesamtbeschädigung der Batterie in den jeweiligen Unfallszenarien beurteilen zu können.

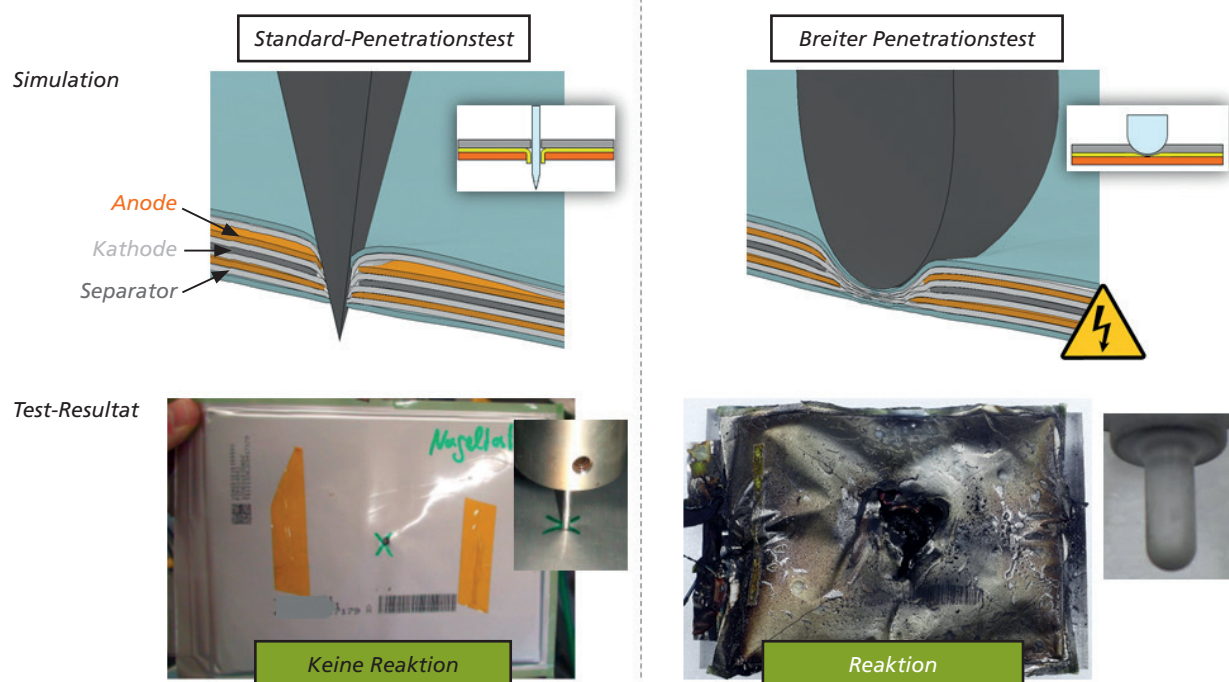
Das entwickelte Fahrzeugmodell wurde gegenüber einer großen Anzahl von Crash-Szenarien getestet, sowohl nach gängigen Crash-Test-Richtlinien als auch nach noch nicht klassifizierten Crashbedingungen, wie beispielsweise

Unterboden- oder Mehrfachkollisionen. Das Modell zeigte dabei eine ausgesprochen gute numerische Stabilität (Abbildung 13, nächste Seite). Die Ergebnisse aus allen simulierten Unfallszenarien wurden quantitativ untersucht und klassifiziert.

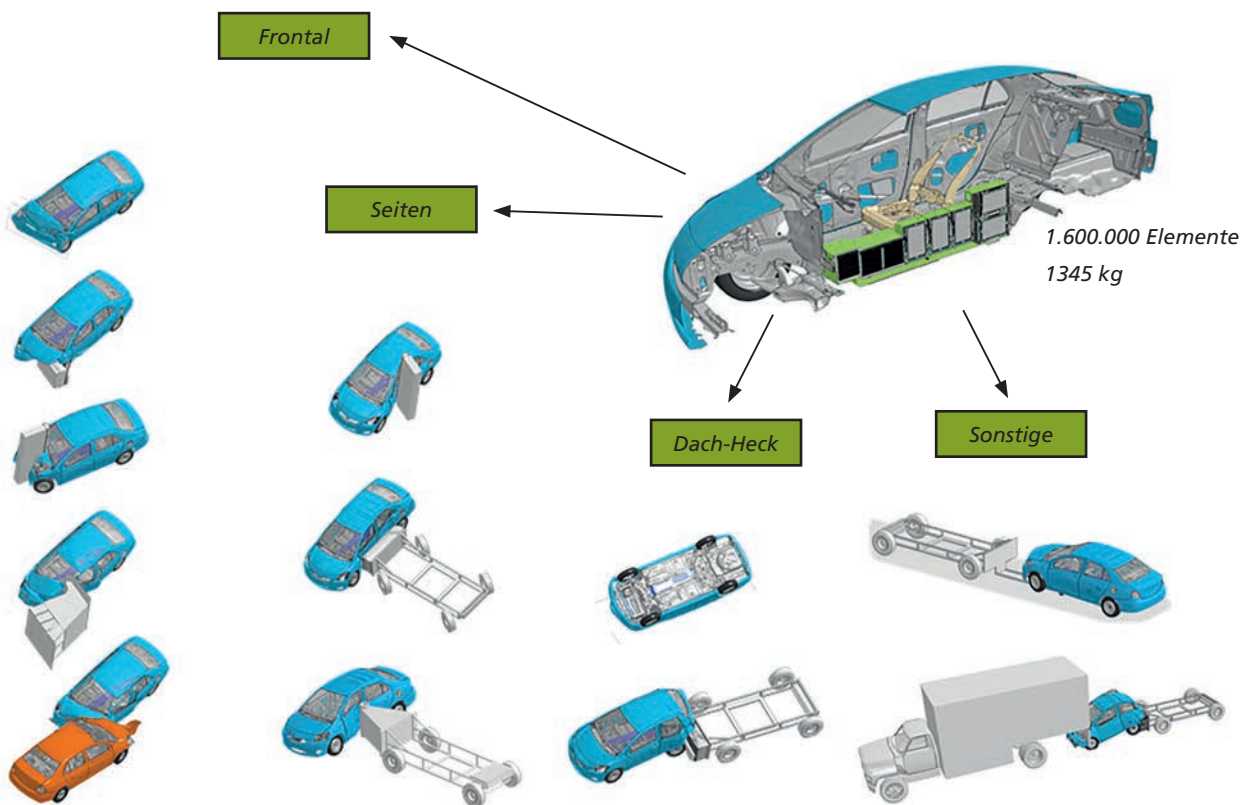
Forschungsergebnisse und Diskussion

Beruhend auf den im Projekt EVERSAFE gesammelten Ergebnissen, aber auch durch die Sichtung aktueller Literatur und den Erfahrungen von Fahrzeugherstellern, konnten Empfehlungen für die passive Sicherheit zukünftiger Elektrofahrzeuge herausarbeitet werden. Diese Empfehlungen betreffen vor allen Dingen die im Projekt identifizierten kritischen Belastungen beim frontalen Pfahlaufprall und bei Unterbodenkollisionen. Es hat sich im Laufe der Projektarbeiten herausgestellt, dass die Fahrzeug-Kompatibilität im Crashfall weniger eine Frage der Batterieintegrität, sondern vielmehr eine Frage des Insassenschutzes ist.

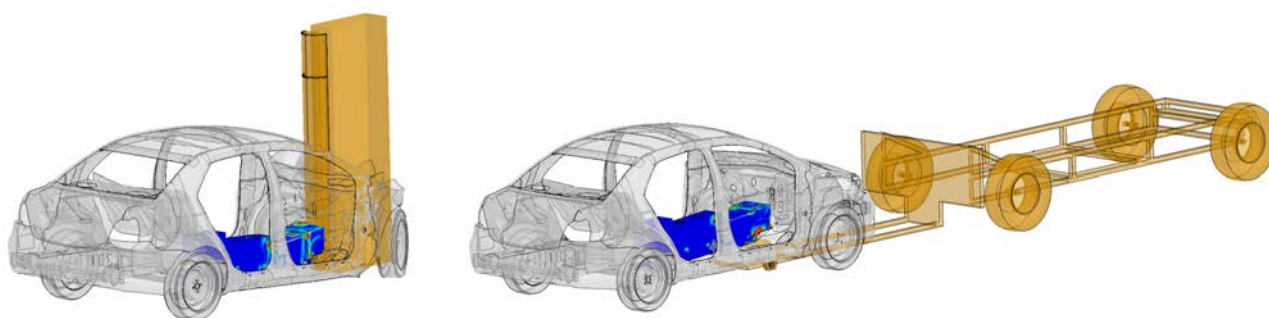
Heutige Batteriezellen werden in der Regel dahingehend optimiert, dass sie gegenüber den standardisierten Prüfverfahren bestehen. Bei geringen Abweichungen von den Prüfvorschriften können jedoch nachweislich enorme elektrochemische Reaktionen mit verheerenden Folgeschäden entstehen.



12 Penetrationstests nach Standardvorgaben (links) und nach eigenen Anforderungen (rechts).



13 Untersuchte Crash-Szenarien mit der Elektrovariante des Toyota Yaris im Rahmen des Projekts EVERSAFE.



14 Für die Batterie besonders kritische Lastfälle für das entwickelte Fahrzeugmodell. Links: Frontaler Pfahlaufprall mit 50 Kilometern pro Stunde. Rechts: Unterbodenkollision mit 40 Kilometern pro Stunde. Farblich hervorgehoben ist die plastische Verformung der Fahrzeugbatterie.

Die Simulationen auf Fahrzeugebene haben nicht nur konzeptspezifische Ergebnisse geliefert, sondern auch eine Methode, um die Unfallschwere bei Elektrofahrzeugen zu klassifizieren und zu beurteilen. Dabei wurden Empfehlungen zur Verbesserung der aktuellen Crashtest-Normen und zur Auslegung zukünftiger Elektrofahrzeuge geliefert.

Die für das untersuchte Fahrzeugkonzept besonders kritischen Lastfälle sind der frontale Pfahlaufprall bei 50 Stundenkilometern und eine Unterbodenkollision bei 40 Stundenkilometern ohne spezifische Schutzmaßnahmen. Beide Szenarien gehören derzeit keiner klassifizierten Crash-Test-Richtlinie an und sind gesetzlich nicht vorgeschrieben (Abbildung 14).

Für den frontalen Pfahlaufprall wurde ein maximaler Puls von über 100 g im vordersten Batteriemodul registriert. Der durch die Umwandlung des Verbrennungsmotors in einen kleineren Elektromotor gewonnene Raum im Frontbereich des Fahrzeugs muss folglich optimiert werden, um dieses Szenario sicherer zu gestalten.

Da in vielen Elektrofahrzeugen die Fahrzeugbatterien im Unterbodenbereich liegen, müssen auch Unterbodenkollisionen untersucht werden. Der Einfluss einer Schutzvorkehrung, die die direkte Krafteinleitung eines überfahrenen Gegenstands auf das Batteriegehäuse verhindert, ist in diesem simulierten Crash-Lastfall besonders bemerkenswert gewesen, da sie den eingeleiteten Crash-Puls von ursprünglich knapp 90 g auf mehr als die Hälfte senken konnte.

Derzeit ist geplant, den Einfluss von dynamischen Belastungen und den Einfluss von unterschiedlichen Penetrator-Formen genauer zu untersuchen. Das numerische Modell der Batteriezelle wird ebenfalls verfeinert. Auch umliegende Batterie-Komponenten wie beispielsweise Kabel und Elektronik-Bauteile sollten berücksichtigt werden, da diese beim Crash potenzielle Gefahrenquellen darstellen können.

**VERBÜNDE, ALLIANZEN
KOOPERATIONEN**

WISSENSCHAFTLICHES
NETZWERK

VERBÜNDE, ALLIANZEN UND KOOPERATIONEN MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER EMI



Kompetenzen bündeln

Das Fraunhofer EMI verfügt über ein breites Portfolio an Forschungsthemen. 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 Verbünden 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 seinen vielseitigen Kompetenzen 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 fünf 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 Leichtbau
- Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation von Produkten, Prozessen
- Fraunhofer-Allianz Space

KOOPERATIONEN

- »Centre for Security and Society«:
Kooperation mit der Universität Freiburg zur gemeinsamen Sicherheitsforschung
- Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg
Eine Kooperation zwischen den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten, der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und der Industrie (S. 117)
- Resilien-Tech: Kooperationsprojekt mit der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften – zur Entwicklung strategischer Zukunftsthemen im Bereich resilienter Infrastrukturen (S. 127)
- Spitzencluster Elektromobilität Süd-West (S. 129)
- Clean Sky 2
Joint Technology Initiative im Bereich Luftfahrt. Fraunhofer ist eines der 12 Clean Sky-Gründungsmitglieder (S. 131)
- Weiterbildungsangebot »Sicherheitssystemtechnik« in Kooperation mit der Universität Freiburg (S. 133)

LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT FREIBURG



DAS LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT

FREIBURG

Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg

Am 6. März 2015 wurde das Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg im Rahmen einer Festveranstaltung im Historischen Kaufhaus feierlich eröffnet. Im Leistungszentrum arbeiten erstmals Forscherinnen und Forscher der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute und der Universität Freiburg gemeinsam mit der Industrie für mehr Ressourcen- und Klimaschutz. Die Konstellation ist in dieser Form neu und viel versprechend: Die unterschiedlichen Blickwinkel auf das Thema Nachhaltigkeit schaffen neue, anwendungsorientierte Lösungen.

Möglich wurde diese besondere Form der Zusammenarbeit durch den Schulterschluss zwischen Universität Freiburg und Fraunhofer-Gesellschaft. Professor Hans-Jochen Schiewer und Professor Reimund Neugebauer sehen das Potenzial, das in der Bündelung der unterschiedlichen Stärken beider Institutionen liegt. Damit konnte auch die Industrie überzeugt werden, die ihre Fragen hier einbringen und von den Ergebnissen der Forschung profitieren kann. Das wurde in der Panel-Diskussion am Eröffnungstag deutlich, in der die Industrievertreter die Dringlichkeit nachhaltiger Entwicklung betonten.

»Nachhaltigkeit ist ein Schlüsselthema für die deutsche Wirtschaft« sagt Professor Reimund Neugebauer, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft. »Wir müssen unsere Stärken ausbauen. Mit dem Pilotvorhaben für ein Nationales Leistungszentrum bereiten wir den Weg, um die Potenziale der Region intensiver zu nutzen. Freiburg soll als Standort für Spitzenforschung zur nachhaltigen Entwicklung ausgebaut werden. Wir sind jedoch nur dann erfolgreich, wenn wir die Wirtschaft mit ins Boot holen«, ergänzt Neugebauer. In den aktuellen Projekten des Leistungszentrums Nachhaltigkeit untersuchen die Experten, wie sich die ressourceneffiziente LED-Technologie flächendeckend durch niedrigere Fertigungskosten durchsetzen könnte, ob und wie man CO₂ als Rohstoff weiterverwenden kann und was

wir von Selbstreparaturmechanismen im Pflanzenreich lernen können. Finanziert werden die Pilotprojekte und das Leistungszentrum Nachhaltigkeit von den Ministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg und der Fraunhofer-Gesellschaft. In den kommenden drei Jahren stehen insgesamt 7,2 Millionen Euro zur Verfügung: Damit werden die Pilotprojekte und unter anderem auch die jährliche Konferenz, der »Sustainability Summit«, der bisherige »Solar Summit« des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, finanziert. Die Partner aus der Industrie beteiligen sich darüber hinaus an Arbeiten zur Überführung der Forschungsergebnisse in die Praxis mit insgesamt 6 Millionen Euro.

»Mit unserer Förderung unterstützen wir das strategische Ziel von Universität Freiburg und Fraunhofer, ein weltweit beachtetes Zentrum für Nachhaltigkeitsforschung zu etablieren. Nachwuchswissenschaftler aus der ganzen Welt sowie etablierte Spitzenforscher, innovative Unternehmensgründer und traditionsreiche Konzerne sollen im Leistungszentrum zusammenarbeiten. Hier und heute beginnen wir mit der Umsetzung der Vision von dem Standort für Spitzenforschung, Lehre und Weiterbildung zur nachhaltigen Entwicklung, dem Innovationsraum für Nachhaltigkeit sowie dem Ort für den Dialog mit der Gesellschaft über das Zukunftsthema Nachhaltigkeit«, sagt Baden-Württembergs Forschungsministerin Theresia Bauer.

Fraunhofer und die Universität Freiburg werden ihre Zukunftsplanungen mit einer Roadmap aufeinander abstimmen. Dazu gehört im Leistungszentrum die gezielte Weiterentwicklung der Themenschwerpunkte nachhaltige Werkstoffe, Energiesysteme, Resilienzforschung sowie der Umgang der Gesellschaft mit Veränderungsprozessen. Das geplante Institut für nachhaltige Ingenieursysteme (Institute for Sustainable Systems Engineering (ISSE)) an der Technischen Fakultät soll der ingenieurwis-

senschaftliche Kern des Leistungszentrums werden. »Das ISSE wird unsere Universität um einen zukunftsweisenden Themenschwerpunkt erweitern und viele wichtige Impulse für Forschung und Lehre geben« sagt Professor Hans-Jochen Schiewer, Rektor der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Nur wer über seinen eigenen wissenschaftlichen Tellerrand hinausblickt, kann die richtigen Antworten finden. »Genau hier werden wir ansetzen«, erklärt Schiewer. »Wir bringen die anwendungsorientierten Forscher von Fraunhofer mit den Naturwissenschaftlern, aber auch den Sozial- und Geisteswissenschaftlern der Universität zusammen.« Sechs Pilotprojekte starteten bereits.

»Die Herausforderungen, die das Thema nachhaltige Entwicklung stellt, sind höchst unterschiedlich und verlangen sowohl technologische, ökologische und ökonomische Expertise als auch profunde Kenntnisse gesellschaftlicher Zusammenhänge. In Freiburg entsteht mit unserer Förderung ein Zentrum, das relevante Zukunftsfragen umfassend angeht. Das stärkt die wirtschaftsnahe Forschung und wird die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen und zwischen den Instituten in Freiburg beschleunigen«, betont Finanz- und Wirtschaftsminister Dr. Nils Schmid.

Besonders wichtig ist den Wissenschaftsorganisationen der Dialog mit der Bevölkerung. »Unsere wissenschaftlichen Ergebnisse sollen möglichst schnell ihren Weg in die Praxis finden«, sagt dazu Professor Reimund Neugebauer. »Und das geht nur, wenn wir wissen, was die Menschen bewegt und wie wir ihnen helfen können.« Deshalb soll es im Leistungszentrum künftig Formate geben, die den Austausch zwischen Wissenschaft und Bevölkerung fördern.

Als erster wichtiger Industriepartner beteiligt sich die Georg H. Endress-Stiftung des Firmengründers von Endress+Hauser gemeinsam mit der Universität und dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM am Leistungszentrum Nachhaltigkeit. Das Vorhaben ist auf breite Resonanz bei Firmen in der Region und darüber hinaus gestoßen, die Aspekte der Nachhaltigkeit in ihre Produktentwicklungen integrieren möchten. Weitere Projekte sind unter anderem mit der Daimler AG, EnBW und der Robert Bosch GmbH geplant. Die Partner des Leistungszentrums bauen so ein breites Netzwerk mit dem Schwerpunkt bei Unternehmen aus Baden-Württemberg auf.

Foto 1: Die beiden Koordinatoren des Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg, Professor Gunther Neuhaus, Vizerektor/Prorektor für Forschung der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und Professor Stefan Hiermaier, Institutsleiter Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI; **Foto 2:** Mehr als 200 Gäste kamen zur feierlichen Eröffnungsveranstaltung im Historischen Kaufhaus; **Fotos 3 und 4:** Im von Heike Schmoll (FAZ) moderierten Panel diskutierten Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Präsident Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jochen Schiewer, Rektor Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Dr. Gisela Splett MdL, Staatssekretärin im Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, Dr. Robert Bauer, Vorsitzender des Vorstands SICK AG, Dr. Klaus Dieterich, ehemaliger Vorsitzender der Geschäftsleitung Forschung und Vorausentwicklung, Robert Bosch GmbH und Dr. Ulrich Kaiser, Director Technology Endress + Hauser Management GmbH; **Foto 5:** Die Ausstellung der Pilotprojekte; **Foto 6:** Hartmut Klein im Gespräch mit der Presse über das Projekt »Bio-Inspirierte selbstreparierende Werkstoffe für eine nachhaltige Entwicklung«.



Die Pilotprojekte mit Beteiligung des Fraunhofer EMI im Leistungszentrum

Bio-inspirierte selbstreparierende Werkstoffe

Das Pilotprojekt »Bio-inspirierte selbstreparierende Werkstoffe für eine nachhaltige Entwicklung« ist thematisch dem Forschungsschwerpunkt Sustainable Materials des Leistungszentrums Nachhaltigkeit zugeordnet.

Inhaltlich geht es um die Untersuchung von Selbstreparaturprozessen in speziellen Pflanzenarten, die Herausarbeitung der dabei zu beobachtenden Funktionsprinzipien und die Bildung eines geeigneten numerischen Modells. Es soll geprüft werden, ob und inwiefern natürliche Selbstreparaturmechanismen auch auf technische Werkstoffe übertragen werden können. Eine kritische Bewertung des Potenzials von selbstreparierenden Werkstoffen im Hinblick auf die Verbesserung der Nachhaltigkeit ist ebenfalls Gegenstand der Forschungsarbeit.

Die Verwendung von Materialien mit Selbstreparaturfunktion in technischen Produkten ist für alle Anwendungen interessant. Selbstreparierende Materialien ermöglichen eine Verlängerung der Funktionsfähigkeit bei möglicherweise verschwindend geringem Wartungsaufwand. Insbesondere für Baumaterialien oder für schwer zugängliche Bauteile in Systemen, die permanent in Betrieb sein müssen, sind selbstreparierende Werkstoffe von großem Interesse.

Das Projekt wird von einem Team aus Biologen und Bionikern der Plant Biomechanics Group der Albert-Ludwigs-Universität (Dr. Olga Speck, Prof. Dr. Thomas Speck) und Ingenieuren der Abteilung Werkstoffdynamik des Fraunhofer EMI (Dr. Matthias Boljen, Hartmut Klein) durchgeführt. Das Projekt zeichnet sich insbesondere durch seinen interdisziplinären Ansatz und durch die komplementären wissenschaftlichen Kompetenzen aus den Bereichen der Biologie, der Bionik, der Materialmodellierung und der Materialprüfung sowie der Nachhaltigkeitsbewertung aus.

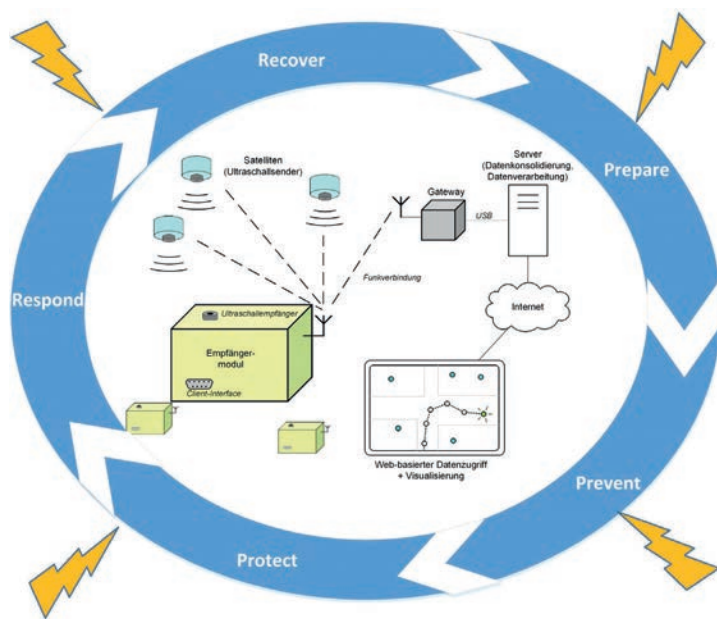
Formbare Kunststoffe aus Lignin: Ein Abfallprodukt der Holzindustrie ersetzt fossile Rohstoffe

Lignin ist ein Bestandteil von Holz und tritt als Abfallprodukt der Papierherstellung in enormen Mengen auf. Eigentlich ist Lignin aufgrund seiner chemischen Struktur ein wertvoller Rohstoff, aus dem ein biobasierter Kunststoff entstehen könnte. Aufgrund von Schwierigkeiten in der Verarbeitung wird Lignin jedoch nicht in einer wertschöpfenden Kette zu Kunststoffen veredelt, sondern dient als Brennstoff für den Energiebedarf der Papierherstellung. Hierbei werden jährlich 50 Millionen Tonnen eines im Prinzip wertvollen Rohstoffs vernichtet.

In diesem Forschungsprojekt untersucht das EMI gemeinsam mit dem Freiburger Materialforschungszentrum der ALU einen neuartigen Ansatz, wie die Verarbeitungseigenschaften von Lignin durch Zugabe einer zweiten biobasierten Komponente erheblich verbessert werden können.

Resilienzmaße zur Optimierung technischer Systeme

Im Pilotprojekt »Resilienzmaße zur Optimierung technischer Systeme« sollen technische Resilienzgrößen und -metriken bestimmt werden, die den Ausfall von Funktionen auf Systemebene und deren zeitliche Änderung beschreiben, insbesondere nach dem Eintritt von disruptiven Ereignissen (Umweltstöreinflüsse, Teilsystemausfälle, menschliche Fehler). Ziel ist die Entwicklung eines gesamtheitlichen und systematischen Vorgehens zur Bewertung und zum Vergleich unterschiedlicher Systemdesigns hinsichtlich relevanter Resilienzdisziplinen wie z. B. Zuverlässigkeit, Sicherheit oder Verfügbarkeit unter Berücksichtigung der Phasen des Resilienzzyklus. In diesem Zusammenhang sind insbesondere für die Ermittlung des Optimierungspotenzials von technischen Systemen neue nachweisbare Resilienzmaße einzuführen sowie zu deren Bestimmung neue methodische und experimentelle Analysen erforderlich. Die Projektpartner Fraunhofer EMI, die drei Institute IMTEK (Institut für Mikrosystemtechnik), IIF (Institut für Informatik) und IFS (Institut für Soziologie) der Universität Freiburg sowie das HSG-IMIT (Institut der Mikro- und Informationstechnik



Schematische Darstellung technischer Systeme im Resilienzyklus.

der Hahn-Schickard-Gesellschaft) liefern hierbei die entsprechenden methodischen Grundlagen und die Erfahrung bei deren praxisnaher Umsetzung und gewährleisten durch die Erarbeitung eines neuen interdisziplinären Analyseverfahrens die Übertragbarkeit auf Systeme unterschiedlicher Technologie und Anwendung. Als erstes Beispielsystem dient ein energieautarkes und autonomes Sensorsystem zur kostengünstigen Indoor-Lokalisierung für mobile Objekte im Bereich der Lagerlogistik (Steuerung und Überwachung der Interaktion zwischen Waren und Roboter). Die dabei zu untersuchenden disruptiven Teilsystemausfälle umfassen u. a. die Unterbrechung von Datenverbindungen, den Ausfall ganzer Sender- und Empfängerbauteile sowie die Störung von Netzbereichen. Das Forum INTRALOGISTIK e. V. unterstützt hierbei das Projekt hinsichtlich des Aufbaus der Test- und Praxisumgebung. Mit weiteren Fallbeispielen im Bereich der Flughafensicherheit und der Baustellenlogistik soll für das entwickelte methodische Vorgehen zur Resilienzbestimmung abschließend die Technologieunabhängigkeit und Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsbereiche nachgewiesen werden.

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



Weitere Informationen finden Sie unter
www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de

**FRAUNHOFER-VERBUND
WERKSTOFFE, BAUTEILE – MATERIALS**



Der Fraunhofer-Verbund 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 quasi-industriellen Maßstab, 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 und 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 & 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 Verbundes sind:

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



Weitere Informationen finden Sie unter
www.materials.fraunhofer.de

- 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
Silicatforschung ISC
Solare Energiesysteme ISE
System- und Innovationsforschung ISI
Werkstoffmechanik IWM
Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Windenergie und Energiesystemtechnik IWES
Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB (Gast)
Integrierte Schaltungen IIS (Gast)
Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM (Gast)

Verbundvorsitzender:

Prof. Dr. 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

Der VVS bleibt die nationale Instanz im Bereich der Sicherheits- und Verteidigungsforschung. Die erste große Wissenschaftskonferenz in Kooperation mit der DWT setzt ein wichtiges Zeichen. Prof. Thoma übergibt nach zwei Amtsperioden den Vorsitz des Verbunds an seine Nachfolger.

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.

Wohlstand und Wachstum unserer entwickelten Industriegesellschaften sind schon heute stark abhängig von global hochvernetzten kritischen Infrastrukturen, deren massive Störung oder gar Zerstörung das Potenzial bergen, unkalkulierbare ökonomische und gesellschaftliche Folgeschäden auszulösen. Zudem stellen schwindende Grenzen zwischen innerer und äußerer, zwischen öffentlicher und privater Sicherheit in Anbetracht moderner Phänomene, wie dem international agierenden Terrorismus, transnationaler organisierter Kriminalität sowie den teils globalen Auswirkungen lokaler Naturkatastrophen und Großunfälle unsere für die Sicherheit verantwortlichen staatlichen Institutionen vor bisher ungekannte Herausforderungen. Um die Vielzahl an möglichen Gefahrenherden frühzeitig zu erkennen und möglichst zu vermeiden sowie die Folgeschäden nach deren Eintritt zu minimieren, werden innerhalb des VVS umfassende technologische Sicherheitslösungen und begleitende methodische, prozessuale und taktische Konzepte entwickelt.

1. Wissenschaftskonferenz »Angewandte Forschung für Verteidigung und Sicherheit« in Kooperation mit der Studiengesellschaft der DWT

Vom 3. bis zum 5. Februar fand auf Wunsch des BMVg erstmals eine große Wissenschaftskonferenz statt, die in Kooperation zwischen dem Fraunhofer VVS und der Studiengesellschaft der DWT in Berlin veranstaltet wurde. Neben einer Vielzahl an wissenschaftlichen Vorträgen wurde die Veranstaltung begleitet von einer Fachausstellung, die den Besuchern eine breite Übersicht an greifbaren Forschungsentwicklungen bot. Die insgesamt 304 Teilnehmer der Konferenz erhielten in den Vorträgen einen Überblick über die Forschungsaktivitäten der anwendungsorientierten Forschungsorganisationen, d. h. in erster Linie waren dies Vertreter von Fraunhofer, DLR und dem ISL Saint-Louis. Ergänzt wurden diese durch Beiträge der zugeordneten Dienststellen des BMVg, wie z. B. den Wehrtechnische Dienststellen (WTDs). Die Veranstaltung erfuhr zudem auch großen Zuspruch und Interesse aus dem Feld der zivilen Sicherheitsbehörden, was sich an reger Teilnahme durch Vertreter von Bundeskriminalamt, GSG9, der Deutschen Hochschule der Polizei, sowie durch Vertretungen aus Landeskriminalämtern zeigte.

Prof. Thoma übergibt den Vorsitz des Fraunhofer-Verbunds VVS an Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer und Prof. Dr. Peter Martini

Seit der Gründung des Fraunhofer-Verbunds VVS im Jahr 2002 bekleidete Prof. Thoma das Amt des Vorsitzenden und führte den Verbund erfolgreich durch teils turbulente Zeiten. Neben einer hervorragenden Positionierung des Verbunds im Rahmen der nationalen und internationalen Sicherheits- und Verteidigungsforschungslandschaft gelang es Prof. Thoma, die Integration der ehemaligen FGAN-Institute in die Fraunhofer-Gesellschaft – heute sind dies das Fraunhofer FHR, das Fraunhofer FKIE, sowie das Fraunhofer IOSB – erfolgreich zu begleiten und zu moderieren.



Neben der Konsolidierung der deutschen Verteidigungsforschung angesichts wachsender Herausforderungen durch strukturelle und politische Veränderungen der Forschungslandschaft ist es maßgebliches Verdienst von Prof. Thoma, dass es im Bereich der zivilen Sicherheitsforschung heute ein solides nationales wie auch ein europäisches Forschungsprogramm gibt. Nach 12 Jahren Amtszeit übergab Prof. Thoma die Leitung des Verbunds zum 1.1.2015 an Prof. Jürgen Beyerer, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB. Der neue Stellvertreter von Prof. Jürgen Beyerer wird Prof. Peter Martini, seinerseits Leiter des Fraunhofer-Instituts für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE.

Mitgliedsinstitute sind die Fraunhofer-Institute für

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

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



Foto: VVS-Sitzung im November 2014 am Fraunhofer EMI.

Weitere Informationen finden Sie unter www.vvs.fraunhofer.de

RESILIEN-TECH: KOOPERATIONSPROJEKT MIT DER ACATECH ZUR ENTWICKLUNG STRATEGISCHER ZUKUNFTSTHEMEN IM BEREICH RESILIENTER INFRASTRUKTUREN

BMBF-Innovationsforum „Zivile Sicherheit“
Antworten der Forschung

7.-9. Mai 2017, Moskauer und Kino International, Berlin



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BMBF-Innovationsforum
„Zivile Sicherheit“

Anpassen statt abschotten: Resilienz ist das Sicherheitskonzept des 21. Jahrhunderts

Fraunhofer EMI definiert Anforderungen an zukünftige technologische Lösungen zur Erhöhung der Resilienz der Gesellschaft

Moderne Infrastrukturen lassen sich vor Naturkatastrophen, Terrorismus, Cyber-Angriffen oder Unfällen nicht vollständig abschirmen. Deshalb ist »Resilienz« das Sicherheitskonzept der Zukunft: Die schnelle Anpassung ergänzt bisherige Strategien, wie etwa Abschottung durch robuste aber starre Schutzmechanismen, zu einem holistischen Ganzen.

Diese Aussage ist das zentrale Ergebnis des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts »Resilien-Tech«, in dem Fraunhofer EMI und acatech – Nationale Akademie der Technikwissenschaften zusammen mit Experten aus Europa und den USA Anforderungen an die resilienten technischen Systeme von Morgen formuliert haben. Anspruch der Projektpartner war es, wichtige Handlungsempfehlungen für forschungspolitische Entscheidungsträger in Deutschland zu entwickeln, damit ein ‚resilient-by-design‘ Ansatz in zukünftigen Forschungsprogrammen und Strategien konsequent verfolgt wird.

Nach einer ersten Prüfung und Analyse bestehender Ansätze wurden unter Einbeziehung renommierter Experten insgesamt drei Workshops durchgeführt, in denen nationale, europäische sowie außereuropäische (insbesondere USA) Perspektiven der Resilienz beleuchtet wurden. Zuletzt wurde das Thema »Resiliente Unternehmen« behandelt und geprüft, welche Aspekte der Resilienz bereits in langfristige Unternehmensstrategien Eingang finden. Aus den Vorträgen und Diskussionen der Workshops wurden insgesamt zehn Handlungsempfehlungen generiert.



Ansprechpartner
Daniel Hiller

daniel.hiller@emi.fraunhofer.de

Resilienz zielt auf eine Neudefinition von Sicherheit ab: Kritische Infrastrukturen funktionieren auch bei unerwarteten Störungen zuverlässig oder kehren möglichst schnell in einen funktionsfähigen Zustand zurück. Resilienz ist kein statischer Zustand, sondern eine Eigenschaft lernfähiger, beweglicher, adaptiver Systeme. Auch die Bürgerinnen und Bürger müssen sich auf das Unvorhersehbare vorbereiten, damit die menschlichen, ökonomischen und ökologischen Schäden so gering wie möglich gehalten werden können.

Dabei wird insbesondere die Resilienz kritischer Infrastrukturen immer wichtiger, weil diese zunehmend vernetzt arbeiten und deshalb neue Schwachstellen auftreten. Bereits kleine, zunächst harmlos wirkende Störungen können in einer Kettenreaktion zu gravierenden Schäden am ganzen System – bis hin zum Totalausfall – führen. Weil sich Naturkatastrophen, Unfälle oder Terroranschläge ohnehin nicht vollständig verhindern lassen, muss Sicherheit neu gedacht werden: Nach dem Prinzip »Biegen statt Brechen« müssen moderne Infrastrukturen lernen, das Unvorhersehbare besser zu verkraften. Menschen und Infrastrukturen können in Zukunft nur dann wirkungsvoll geschützt werden, wenn sowohl Prävention als auch adäquate Krisenreaktion und nachhaltiges Lernen aus vergangenen Ereignissen in der Gesellschaft als wichtige Aufgaben erkannt und umgesetzt werden.

Die Ergebnisse von Resilien-Tech wurden im Rahmen des zweiten BMBF-Innovationsforums Zivile Sicherheit am 8. Mai 2014 in Berlin von Prof. Thoma an Dr. Wolf Junker aus dem Forschungsministerium übergeben (siehe Foto). Nachzulesen sind sie in der acatech Studie »Resilien Tech – ‚Resilience-by-design‘: Strategien für die technologischen Zukunftsthemen« (Download unter: www.acatech.de/de/publikationen/studie.html).



Weitere Informationen finden Sie unter www.acatech.de

Foto links: Prof. Thoma übergibt die Ergebnisse von Resilien-Tech an Dr. Wolf Junker aus dem Forschungsministerium.

SPITZENCLUSTER ELEKTROMOBILITÄT SÜD-WEST



Spitzencluster Elektromobilität Süd-West: Fraunhofer EMI entwickelt Diagnosekonzepte im After Sales für Elektrofahrzeuge

Damit Deutschland seine ambitionierten Klimaschutzziele erreichen kann, müssen die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor drastisch sinken. Ein geeignetes Mittel dafür ist die Einführung von Elektrofahrzeugen in größerer Stückzahl. Das wiederum stellt Zulieferer, Automobilhersteller, Werkstätten und Prüforganisationen vor neue Herausforderungen. Dazu gehören insbesondere der sichere Betrieb, die sichere und eindeutige Identifikation von Mängeln und Fehlern im Hochvoltssystem sowie die sichere Instandsetzung von Elektrofahrzeugen. Ein entscheidender Faktor für den wirtschaftlichen Durchbruch von Elektrofahrzeugen ist daher ein wettbewerbsfähiges Instandsetzungskonzept im After Sales-Bereich. Nur wenn das komplexe Hochvoltssystem von Elektrofahrzeugen im Falle eines Unfalls oder Defektes zuverlässig, sicher und kosteneffizient wieder repariert werden kann, kann sich eine positive Kundenakzeptanz ausbilden.

Daher wurde das Projekt DINA - Diagnose und Instandsetzung im After-Sales ins Leben gerufen. Das Fraunhofer EMI arbeitet darin zusammen mit der Robert Bosch GmbH, der Dekra und dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) noch bis zum Herbst 2015 an der Erforschung von effizienten und zuverlässigen Diagnosemöglichkeiten und Reparaturkonzepten sowie kostengünstigen Instandsetzungslösungen im After-Sales-Bereich. Forschungsschwerpunkte des Fraunhofer EMI bilden die Analyse der Komponenten im Gesamt-

system sowie die Erfassung der Interaktionen, Wechselwirkungen und der sich daraus ergebenden Fehlerbilder. So werden 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 werden in ein ganzheitliches Diagnosekonzept integriert. Dieses wird ein wesentlicher Bestandteil des im Rahmen des Projekts entwickelten Servicekonzeptes für Elektrofahrzeuge sein.

Das Projekt DINA ist eines der zentralen Projekte des Spitzenclusters »Elektromobilität Süd-West«, der 2012 erfolgreich an der 3. Runde des Spitzencluster-Wettbewerbs des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) teilgenommen hat. Mit über 80 renommierten großen, mittleren und kleinen Unternehmen, Hochschulen sowie Forschungsinstituten verbindet der Cluster Kompetenzen aus Fahrzeugtechnik, Energiewirtschaft, IKT und Produktion. Das Fraunhofer EMI ist als Partner im Spitzencluster besonders in dessen Innovationsfeld »Fahrzeug« aktiv.

Mit innovativen Technologien und Methoden gestalten die Clusterpartner maßgeblich die Basis für neue, nachhaltig wirtschaftliche Geschäftsmodelle, die die regionale Wertschöpfung und Beschäftigung in der Clusterregion und in ganz Baden-Württemberg sicherstellen. 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.



Ansprechpartner

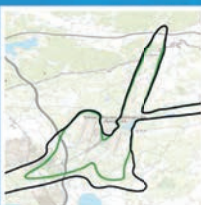
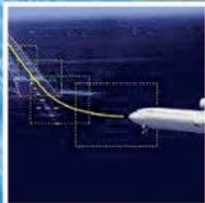
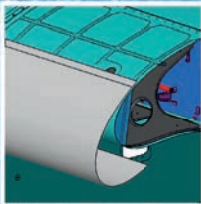
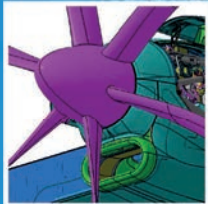
Benjamin Scharte

benjamin.scharte@emi.fraunhofer.de



Weitere Informationen finden Sie unter www.e-mobilbw.de

CLEAN SKY



Beteiligung an der ehrgeizigsten Forschungsinitiative der europäischen Luftfahrt

75 Prozent weniger CO₂, 90 Prozent weniger NO_x, 65 Prozent weniger Fluglärm: Clean Sky hat sich zum Ziel gesetzt, Technologien zu entwickeln, die maßgeblich zu umweltverträglicheren Flugzeugen und einem schadstoffärmeren Luftverkehr insgesamt beitragen.

Bei einem zu erwartenden Anstieg des internationalen Luftverkehrsaufkommens um 4 bis 5 Prozent pro Jahr bedeutet eine Reduzierung des erzeugten Lärms und der ausgestoßenen Emissionen einen wichtigen Beitrag zur Umweltverträglichkeit des Transportmittels und zur Luft- und damit Lebensqualität der Bevölkerung, insbesondere im direkten Umkreis von Flughäfen. Effizientere Treibstoffe und zugleich eine zusätzliche Reduzierung des benötigten Treibstoffs durch die Verwendung leichter Materialien beim Flugzeugbau sollen den Flugverkehr außerdem kostengünstiger machen.

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. Seit 2008 läuft diese Public-Private-Partnership im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms der EU. Bis 2014 ist es gelungen die CO₂-Emissionen verglichen zum Jahr 2000 um 20 Prozent zu senken. Doch Clean Sky soll weitergehen: Über die Ergebnisse von

Clean Sky hinaus sollen die Umweltbelastungen durch den Flugverkehr weiter reduziert und die europäische Luftfahrt noch wettbewerbsfähiger werden. Die neuen Technologien sollen bis zur Demonstrationsreife vorangetrieben werden, der Treibstoffverbrauch und damit die CO₂-Emissionen verglichen zum Stand von 2014 um weitere 20 bis 30 Prozent gesenkt, der Stickoxid-Ausstoß ebenso wie der Lärm um mindestens 30 Prozent gemindert werden. Die Partnerschaft von Industrie und Europäischer Union wird in »Clean Sky 2« fortgesetzt. Im Rahmen des neuen EU-Forschungsrahmenprogramms Horizon 2020 ist das Joint Undertaking Clean Sky 2 für die Jahre 2014 bis 2020 mit einem Gesamtbudget von 4 Milliarden Euro ausgestattet.

Neben den großen europäischen Luftfahrtunternehmen Airbus, Airbus Helicopters, AgustaWestland, Alenia Aermacchi, Dassault Aviation, DLR, EADS-CASA, Evktor, Liebherr, MTU, Piaggio Aero, Rolls-Royce, SAAB, Safran und Thales ist auch die Fraunhofer-Gesellschaft an der Partnerschaft beteiligt. Bei Clean Sky 2 zählt das Fraunhofer EMI zu den sieben Kerninstituten der Fraunhofer Aviation, die in direkter Zusammenarbeit mit der Industrie aktiv an der Entwicklung der Luftfahrttechnologie der nächsten Generation arbeiten. Die Simulation von Blitz- und Vogelschlag und Debris Impact gehört dabei ebenso zu den Kompetenzen und Beiträgen des Ernst-Mach-Instituts wie die Herstellung leichter Bauteile mit dem Lasersinterverfahren, die Untersuchung des Crashverhaltens von kleinen und größeren Flugzeugteilen sowie die On-Site-Diagnose von möglichen Schäden am Flugzeug durch mobile Röntgenapparate.



Ansprechpartnerin
Dr. Stephanie Günther
stephanie.guenther@emi.fraunhofer.de



Weitere Informationen zu Clean Sky 2 finden Sie unter www.cleansky.eu.

AUFTAKT DES WEITERBILDUNGSANGEBOTS »SICHERHEITSSYSTEMTECHNIK« 27. UND 28. FEBRUAR 2014

**WEITERBILDUNGSANGEBOT
DIPLOMA OF ADVANCED
STUDIES (DAS)**

SICHERHEITSSYSTEMTECHNIK



CERTIFICATES OF ADVANCED STUDIES

**CAS RISIKOANALYSE
CAS TECHNISCHE SICHERHEIT
CAS STRUKTURELLE SICHERHEIT**



Forschungsthemen des Ernst-Mach-Instituts als Blended Learning Weiterbildungsangebot

Mit einer Auftaktveranstaltung im Ernst-Mach-Institut in Freiburg begannen am 27. und 28. Februar 2014 die Kurse »Risikoanalyse« und »Technische Sicherheit« des Weiterbildungsangebots »Sicherheitssystemtechnik«, welche das Ernst-Mach-Institut und die Universität Freiburg in Kooperation entwickeln und durchführen.

Die Inhalte der Weiterbildungskurse umfassen aktuelle und abgeschlossene Forschungsthemen der Abteilung Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz. Themenbeispiele sind hierbei Risikoanalyseschemata, die Bewertung von Risiken, Beispiele für qualitative und quantitative Risikoanalysen, Systemanalysemethoden wie Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) und Fault Tree Analysis (FTA), der Umgang mit sicherheitsrelevanten Normen wie der IEC 61508 und die semiformale Modellierung von sicherheitskritischen Systemen.

Zur besseren Vereinbarkeit von Weiterbildung mit Familie und Beruf werden die Kurse im »Blended Learning«-Format durchgeführt. Die Teilnehmenden treffen sich dreimal während des einjährigen Kurses in Freiburg und arbeiten zwischen den Treffen selbstständig circa 5 Stunden in der Woche mit einer Internet-Lernplattform. Die Selbstlernphasen werden durch regelmäßige Online-Meetings mit Fachexperten des Ernst-Mach-Instituts unterstützt.

Das Weiterbildungsangebot ist eingebettet in das Weiterbildungsprogramm der Universität Freiburg. Die Kurse werden gemäß der Systematik und den Qualitätsstandards der Swissuni entwickelt. Sie werden mit den durch den Bologna-Prozess bekannten ECTS-Punkten (European Credit Transfer System, 1 ECTS-Punkt entspricht 30 Arbeitsstunden) bewertet und können zu kleinteiligen Abschlüssen (10 ECTS-Punkte, 30 ECTS-Punkte) kombiniert werden.

Die Entwicklung des Weiterbildungsangebots erfolgt im Rahmen des Verbundprojekts »Freiräume für Wissenschaftliche Weiterbildung« mit der Universität Freiburg und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Wettbewerb »Aufstieg durch Bildung: Offene Hochschulen« gefördert wird.

Anfang 2016 werden die Kurse voraussichtlich erneut angeboten. Im Rahmen der 2. Phase des BMBF-Verbundprojekts sollen im Teilprojekt »Resiliente Technische Systeme« durch Fraunhofer EMI in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg in 2015 bis 2017 weitere Kurse entwickelt und pilotiert werden: CAS Strukturelle Sicherheit, CAS Resilienzanalyse und CAS Anwendertoolsentwicklung. Wiederum soll jedes CAS aus zwei Kursen zu je 5 ECTS Punkten bestehen.

Weitere Informationen finden Sie unter www.offenehochschule.uni-freiburg.de/sicherheitssystemtechnik



Ansprechpartner
Dr. Ivo Häring

ivo.haering@emi.fraunhofer.de

Foto oben:

Gruppenfoto bei der Auftakt-Präsenzveranstaltung in Freiburg.

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE
HIGHLIGHTS
2014/15

»FUTURE SECURITY«, BERLIN 16. BIS 18. SEPTEMBER 2014



9. Future-Security-Konferenz in Berlin

Die 9. Auflage der Konferenz setzte mit hochrangigen Gästen aus den USA einen besonderen thematischen Schwerpunkt: In verschiedenen Fachpanels und Vorträgen wurde diskutiert, inwieweit das Konzept der Resilienz dem bisherigen Verständnis von klassischer Sicherheit eine neue Dimension verleiht. Die Lebensleistung von Prof. Thoma, Sprecher des Fraunhofer VVS und zugleich Veranstalter der Konferenz, wurde gebührend geehrt.

Vom 16. bis 18. September fand in der Landesvertretung Nordrhein-Westfalens in Berlin die 9. Sicherheitskonferenz »Future Security« des Fraunhofer-Verbunds für Verteidigungs- und Sicherheitsforschung VVS statt. Insgesamt 237 Teilnehmer aus Forschung, Industrie, Politik und Behörden diskutierten während der dreitägigen Veranstaltung über aktuelle Forschungsergebnisse und suchten nach neuen Lösungen für bestehende und zukünftige Herausforderungen im Bereich der zivilen Sicherheitsforschung.

Eröffnet wurde die Konferenz durch den parlamentarischen Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Herrn Thomas Rachel. Daran anschließend bot Richard A. Serino, ehemaliger Vize-Chef der U.S.-amerikanischen Katastrophenschutzbehörde FEMA (Federal Emergency Management Agency) in einer packenden Keynote spannende Einblicke in die jüngsten Bemühungen der USA, das Konzept der Resilienz durch völlig neue Partnerschaften unterschiedlichster Akteure mit konkreten Inhalten zu füllen. – Serino war z. B. während des schweren Sturms Sandy in 2013 leitender Kommandant sämtlicher Katastrophenhelfer in New York und New Jersey. Am zweiten Konferenztag bot ein mit U.S.-Vertretern besetztes Panel weitere aufschluss-

reiche Erkenntnisse darüber, wie man in den USA Resilienz bereits in Policy-Initiativen und Regularien überführt. Letztere wurden in einer weiteren Keynote von Caitlin A. Durkovich, Assistant Secretary for Infrastructure Protection im Heimat-schutzministerium DHS (Department of Homeland Security) dargestellt.

Das wissenschaftliche Programm bot in insgesamt 75 Fachvorträgen einen breiten Über- und Einblick in aktuelle Forschungsarbeiten und -ergebnisse. Die Fachkonferenz wurde auch in diesem Jahr von einer Posterausstellung begleitet. Erstmals wurde dabei ein Best-Poster-Award verliehen, für den alle Teilnehmer der Konferenz die Möglichkeit zur Abstimmung hatten. Gewonnen hat ein Beitrag von Mitarbeitern des Fraunhofer IIS zum Thema Gefahrstofferkennung in Frachtcontainern via Röntgentomographie. An dem zugrundeliegenden Forschungsprojekt waren auch Kollegen des Fraunhofer EMI beteiligt.

Ein ganz besonderes Highlight bot das Konferenz-Dinner, welches im Technikmuseum Berlin ausgerichtet wurde. Platziert zwischen realen Flug- und Fahrzeugen genossen die Teilnehmer neben einem hervorragenden Essen auch ein vergnügliches Rahmenprogramm in Form eines humorvollen Beitrags von Henning Beck zu »Neuro-Security – How to protect data in biological systems«.

Auf der 9. Future-Security-Konferenz hieß es allerdings auch Abschied nehmen. Prof. Klaus Thoma, Mitbegründer und seither Sprecher des Fraunhofer-Verbunds VVS verlässt das Fraunhofer EMI zum Jahresende 2014 und tritt in den Ruhestand. Hochrangige Vertreter aus Politik und Industrie würdigten Prof. Thomas Lebensleistung und sprachen Dank und Anerkennung aus.

Fotos 1 und 2: Keynote I »Resilience – Success Through Partnerships«, Richard A. Serino; **Foto 3:** Caitlin A. Durkovich; **Foto 4:** Die Teilnehmer bei der Poster Session; **Foto 5:** Konferenz-Dinner im Technikmuseum Berlin; **Foto 6:** Lauren Alexander Augustine.



Informationen zur nächsten »Future Security« finden Sie unter www.future-security2015.de

WISSENSCHAFTSCAMPUS, FREIBURG

6. BIS 9. OKTOBER 2014

Wissenschaftscampus 2014 in Freiburg: Das Sprungbrett für Frauen in die Forschung

Studentinnen der Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik ab dem vierten Fachsemester hatten im Oktober vier Tage lang die Möglichkeit, sich in Workshops und Vorträgen weiterzubilden, beraten zu lassen und Einblicke hinter die Kulissen von Forschungseinrichtungen zu gewinnen. Veranstalter dieses abwechslungsreichen Programms waren die Fraunhofer-Gesellschaft und die Universität Freiburg.

Die Teilnehmerinnen erhielten in Seminaren, Vorträgen und bei Laborbesuchen Einblicke in neueste Entwicklungen in der Raumfahrttechnologie, sie erfuhren, welche Verfahren und Systeme zum Gelingen der Energiewende beitragen, wie sich Werkstoffeigenschaften verbessern lassen und vieles mehr. Und sie hatten die Möglichkeit, ihre Karrierefragen mit Vertretern der Institute und Coaches zu besprechen. In Workshops lernten die Studentinnen mehr über ihre eigene Kreativität, ihre Stärken und wie sie diese in der anwendungsorientierten Forschung nutzen können. Wie der Berufsalltag aussieht und Karrierewege in der Forschung verlaufen, erfuhren die Teilnehmerinnen im Gespräch mit Expertinnen und Experten in den Fraunhofer-Instituten für Angewandte Festkörperphysik IAF, für Kurzzeitdynamik EMI, für Physikalische Messtechnik IPM, für Solare Energiesysteme ISE sowie für Werkstoffmechanik IWM und an der Technischen Fakultät der Universität Freiburg. »'Mehr Frauen in die angewandte Forschung' ist ein wichtiges Ziel der Fraunhofer-Gesellschaft. Wir möchten junge Frauen für Wege in der Wissenschaft begeistern und damit den Anteil an Wissenschaftlerinnen bei Fraunhofer erhöhen. Der Mehrwert von gemischten Teams ist ja längst nachgewiesen«, so Michael Vogel, Abteilungsleiter Fraunhofer-Personalmarketing. »Fraunhofer bietet hervorragende Entwicklungschancen für den wissenschaftlichen Nachwuchs. Absolventinnen technischer und naturwissenschaftlicher Fachrichtungen haben bei uns die Möglichkeit,

sich für eine verantwortungsvolle Tätigkeit in den Fraunhofer-Instituten und in der Industrie zu qualifizieren.« Arbeitgeber rankings belegen: Die Fraunhofer-Gesellschaft zählt in den Bereichen Ingenieurwesen und Naturwissenschaften zu den beliebtesten Arbeitgebern in Deutschland. Bei der Universum-Studie 2014 beispielsweise liegt Fraunhofer bei den Naturwissenschaften auf Platz 3.

Am EMI erhielten die Teilnehmerinnen Einblick in die Forschungsfelder des Instituts. Am sogenannten Fachtag hatten sie die Möglichkeit, Angebote passend zu ihren Studienfächern zu nutzen und wissenschaftlich weiter in die Tiefe zu gehen: Die Gruppe Raumfahrt öffnete ihre Labore und stand für wissenschaftliche Fragen zur Verfügung. In Workshops zu den Themen Sicherheitsforschung und dem EMI-Geschäftsfeld Verkehr konnten sie bis in die Praxis der Projektarbeit am EMI vordringen.

Den Abschluss der Veranstaltung bildete eine interessante Diskussionsrunde mit echten Role-Models: Auf dem Podium saßen Dr. Bärbel Thielicke, Zentrale Gleichstellungsbeauftragte der Fraunhofer-Gesellschaft und selbst viele Jahre als Physikerin und Gruppenleiterin bei Fraunhofer tätig, neben ihr Dr. Lena Schnabel, Gruppenleiterin und Expertin für Wärmeübertragung in gebäudetechnischen Anlagen am Fraunhofer ISE und Nicola Heidrich, Gruppenleiterin »Diamanttechnologie« am Fraunhofer IAF. Moderiert wurde die Runde von Silvija Kauric (Femtec).

Die Rückmeldungen nach Abschluss des Wissenschaftscampus in Freiburg waren durchweg positiv: Sowohl die beteiligten Kolleginnen und Kollegen an den Instituten als auch die Teilnehmerinnen selbst haben bereichernde Erfahrungen gemacht, es wurden auch schon erste Gespräche über einen Arbeitsbeginn bei Fraunhofer geführt. Mit solchen Aktivitäten kommt Fraunhofer dem Ziel, mehr Frauen für die Wissenschaft und insbesondere in Führungspositionen zu gewinnen, einen großen Schritt näher.



Foto 1: Beim Wissenschaftsquiz am ersten Tag gab es in jedem Institut und an der Universität einen Überblicksvortrag. Später mussten im Quiz Fragen dazu beantwortet werden; **Foto 2:** Im Kontrollraum der Gruppe Raumfahrttechnologie; **Fotos 3 und 4:** Martin Schimmerohn erklärt die Funktion der EMI-Leichtgasbeschleuniger und deren Einsatz im Bereich Schutz im Weltraum; **Foto 5:** Dr. Bärbel Thielicke, Zentrale Gleichstellungsbeauftragte der Fraunhofer-Gesellschaft (rechts) mit Silvija Kauric, Femtec (links) bei der Podiumsdiskussion der Abschlusveranstaltung.



»MESSE BAU«, MÜNCHEN 19. BIS 24. JANUAR 2015



Die BAU 2015 in München

Das Wachstum und der Wandel der Städte wird die Entwicklung im 21. Jahrhundert entscheidend beeinflussen, denn der Wettlauf um eine ökologisch nachhaltige Zukunft findet vor allem in den urbanen Zentren statt. Innovative Lösungen im Umgang mit Ressourcen und Energie sind sowohl für private Haushalte als auch für Unternehmen gefragt. So werden sich, angesichts steigender Rohstoffpreise und Energiekosten, nur noch die Unternehmen auf dem Markt durchsetzen, die Materialien und Energie effizient und nachhaltig einsetzen. Die Bauindustrie zählt mit mehr als 700 000 Beschäftigten zu den tragenden Säulen der deutschen Volkswirtschaft. Ihre Innovationsfähigkeit wird entscheiden, ob die Klimaziele der Bundesregierung bezüglich CO₂-Reduktion und Energieeinsparung durch weitere Verbesserungen in den Bereichen Energieeffizienz und Nachhaltigkeit erreicht werden können. Gleichzeitig wird die Baubranche aber auch auf die sich ständig ändernden Anforderungen an die künftige Lebenssituation und den Komfort reagieren müssen.

Auf der Messe-Sonderschau »ForschungsWerkStadt« präsentierten 18 Forschungseinrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft zu den Bereichen »Baustoffe«, »Bausysteme« und »Sicherheit« insgesamt 44 Produkt- und Systemlösungen aus der angewandten Bauforschung für die Realisierung der Vision einer CO₂-neutralen, energieeffizienten und klimaangepassten Stadt.



Weitere Informationen finden Sie unter
www.bau.fraunhofer.de

Foto: Oliver Millon erläutert das Exponat des Fraunhofer EMI. Vorstandsmitglied Prof. Dr. Alexander Verl, Klaudia Kunze (Leitung Kommunikation) und Franziska Kowalewski (ZV) hören interessiert zu.

Wie mit intelligenten Füge-techniken mehrgeschossige Holzbaukonstruktionen erdbebensicher errichtet werden können, multifunktionale Fassadenlösungen Sanierungskosten reduzieren und dabei zugleich zur Energieversorgung beitragen, Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen die Recyclingfähigkeit von Gebäuden erhöhen oder die Bauwerksdatenmodellierung (BIM) bei der Effizienzsteigerung von Bauprozessen entscheidende Hilfestellungen leisten kann, erfuhren die Besucherinnen und Besucher auf der Messe-Sonderschau der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen der BAU 2015.

Das EMI präsentierte seine Kompetenzen im Bereich Sicherheits- und Resilienzforschung. Viel Aufmerksamkeit zog ein Exponat zur Veranschaulichung von Gefahren und möglichen Schutzmaßnahmen auf sich. Mit Hilfe des Modells werden die Auswirkungen einer extremen Einwirkung infolge eines Verkehrsunfalls auf bauliche Strukturen in einer Stadt gezeigt. Die am Fraunhofer EMI entwickelten Konzepte zur Verbesserung des Widerstandsverhaltens von Bauwerken (Mauerwerk-, Stahlbeton- und Glasfassaden) bei extremen Belastungen werden auf die einzelnen Bauwerke angewendet. In Abhängigkeit vom Abstand zum Unfallort wird die Wirkung der Schutzmaßnahmen auf das Gesamttragverhalten durch das Modell visualisiert. Der Besucher des Messestandes wird aktiv in das Modell mit einbezogen, indem er die bestehenden Schutzkonzepte individuell den Gebäuden vergibt. Die Wirksamkeit der gewählten Schutzmaßnahmen wird danach durch eine logische Darstellung visuell wahrgenommen.

Die nächste BAU findet vom 16. bis 21. Januar 2017 auf dem Gelände der Messe München statt.



16.–21. Januar • München

Weltleitmesse für Architektur,
Materialien und Systeme

www.bau-muenchen.com

NAMEN, DATEN, EREIGNISSE

Girls' Day 2014 am 27. März im Fraunhofer EMI

Ein Forschungsinstitut ist für Mädchen der neunten Klasse unbekanntes Terrain. Was darin vor sich geht und woran die Menschen dort arbeiten, konnten die acht Teilnehmerinnen des Girls' Day 2014 am Fraunhofer EMI erkunden.

Weibliche Rollenvorbilder sind gerade im technischen Bereich kaum sichtbar, das ist einer der Gründe, warum Mädchen sich oft nicht für ein Studium in MINT-Fächern (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft, Technik) entscheiden.

Mit Deborah Mohrmann lernten sie am EMI ein echtes Role-Model kennen. Ihr Werdegang und das Thema ihrer Promotion – nachhaltige Werkstoffe – unterscheidet sich deutlich von dem, was den Mädchen aus dem privaten Umfeld vertraut ist.

Nach den Vorträgen über die Fraunhofer-Gesellschaft und die Arbeitsgebiete des Ernst-Mach-Instituts ging es in die Labore, wo wissenschaftliche Versuche durchgeführt werden.

Beim Gang durch die verschiedenen Teile der Werkstatt zeigte der Werkstattleiter Helmut Zettl, wie Werkzeuge hergestellt werden und was die Lehrlinge der Feinwerkmechanik am EMI erlernen. Zum Abschluss konnten sie dabei zusehen, wie ein EMI-Schlüsselanhänger mit einer CNC-Maschine gefertigt wurde und jedes Mädchen durfte einen mit nach Hause nehmen.

In der zweiten Hälfte des Tages kam zur Theorie auch eine praktische Erfahrung. Unter der professionellen Anleitung von Kevin Kreklow, Ulrike Clausen, Max Ortlieb und Melina Haller durfte im Elektronik-Labor jedes Mädchen selbst eine LED-Taschenlampe basteln und lernte dabei den Umgang mit dem Lötkolben.

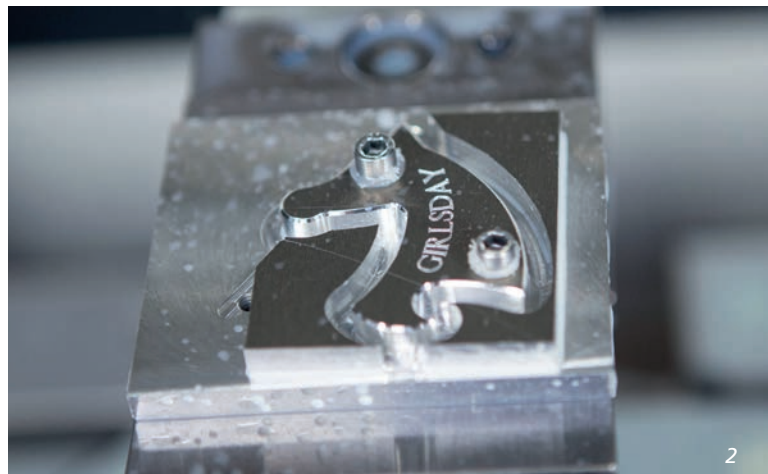
Am Mädchen-Zukunftstag öffnen in ganz Deutschland Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Institutionen ihre Türen für Schülerinnen und Schüler ab der fünften Klasse. So können die Mädchen Technik und Naturwissenschaften erleben und dabei die Erfahrung machen, dass auch Frauen in scheinbar typischen Männerberufen erfolgreich sein können. Parallel zum Girls' Day findet in Deutschland auch der Boys' Day statt. Beim Jungen-Zukunftstag können die Teilnehmer Einblick in Berufe nehmen, in denen es wenige Männer gibt: Im sozialen, erzieherischen oder pflegerischen Bereich.

Es ist ein erklärtes Ziel der Fraunhofer-Gesellschaft, mehr Frauen insbesondere für Fach- und Führungspositionen zu gewinnen. Aktionen wie der Girls' Day tragen dazu bei, den Mädchen die Scheu vor Wissenschaft und Technik zu nehmen und sie zu einem technischen Studium oder einer Ausbildung zu motivieren.

Foto 1: Die Teilnehmerinnen des Girls' Day mit Birgit Bindnagel; **Foto 2:** Der EMI-Schlüsselanhänger; **Fotos 3, 4 und 5:** Die Mädchen bei der Fertigung einer LED-Taschenlampe im EMI-Elektronik-Labor; **Foto 6:** Zum Schluß wurde noch ein Versuch durchgeführt, bei dem es laut wurde: Ein Knall darf am EMI nicht fehlen!

GIRLS' DAY AM FRAUNHOFER EMI

27. MÄRZ 2014



FESTKOLLOQUIUM ZU EHREN VON DR. CHRISTOPH MAYRHOFFER 23. APRIL 2014

Verabschiedung von Dr. Christoph Mayrhofer am 23. April 2014

»Vom Zerstören zum Simulieren – die Entwicklung der Sicherheitsforschung am EMI in der Ära Mayrhofer« lautete der Titel des Vortrags, in dem Dr. Alexander Stolz die geladenen Kolleginnen und Kollegen am EMI, Partner und Wegbegleiter auf eine lange und große Karriere zurückschauen ließ. 39 Jahre lang war Christoph Mayrhofer Wissenschaftler am Ernst-Mach-Institut. Am 23. April nahm er im Kreise seiner Familie Abschied vom Berufsleben – mit einem lachenden Auge!

Sein Nachfolger Alexander Stolz sprach in seinem Vortrag über die beeindruckende Entwicklung des ehemaligen Versuchsplatzes in Efringen-Kirchen, wo aus einem hölzernen Besprechungs-Bungalow im Jahr 1975 später ein Fraunhofer-Standort mit Druckstoßkammer, Stoßrohrhalle, Betonfertigungshalle und noch später mit einem Technikum (1999), Laboren für Bauwesen, Sensorik, Mikromechanik, Crashprüfung, Hochgeschwindigkeitsimpakt, Sprengprüfung und Blastbelastung geworden war.

In seiner Laudatio machte Professor Thoma deutlich, wie stark diese Entwicklung des Standortes Efringen-Kirchen von der Person Christoph Mayrhofer geprägt wurde. Er hat als Wissenschaftler und später als Abteilungsleiter der Abteilung Sicherheitstechnologie und Baulicher Schutz das Geschäftsfeld Sicherheit am Ernst-Mach-Institut aufgebaut und verankert. Das alles meisterte er unter der Doppelbelastung als Abteilungsleiter und gleichzeitig lange Jahre als Verwaltungsleiter in beeindruckender Weise.

Die hervorragende wissenschaftliche Zusammenarbeit auf der »Südschiene« mit der Universität der Bundeswehr Neubiberg, und der Wehrtechnischen Dienststelle 52 in Oberjettenberg ließen die Laudatoren Professor Norbert Gebbeken und Rainer Gündisch in interessanten Beispielen der Zusammenarbeit aus der Vergangenheit noch einmal Revue passieren. Im Vortrag von Andreas Bach aus der Schüßler-Plan-Ingenieurgesellschaft wurde zudem die stetige Industrienähe des Bauingenieurs Mayrhofer noch einmal hervorgehoben.

Christoph Mayrhofer war sowohl am EMI als auch innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft, insbesondere in der Allianz Bau, ein sehr anerkannter Kollege, der sowohl fachlich als auch menschlich als herausragende Führungskraft geschätzt wurde.

Das zeigten die Geschenke und Gesten, die ihm an seiner Abschiedsveranstaltung zuteilwurden. Ein T-Shirt mit dem von ihm geprägten Lebens-Motto »Einatmen, Ausatmen« nahm er mit Freude entgegen, ebenso wie die letzte »Zielvereinbarung«, die ihm sein Nachfolger übergab. Darin sind als neue Ziele die Weiterentwicklung von Hobbies und Zeit mit der Familie formuliert, was durchaus einer strategischen Herangehensweise bedarf. Die neue Zielvereinbarung schließt mit den Worten von Arthur Schopenhauer: »Der Ruhestand hat die Heiterkeit dessen, der seine Fesseln los ist und sich nun frei bewegt«.

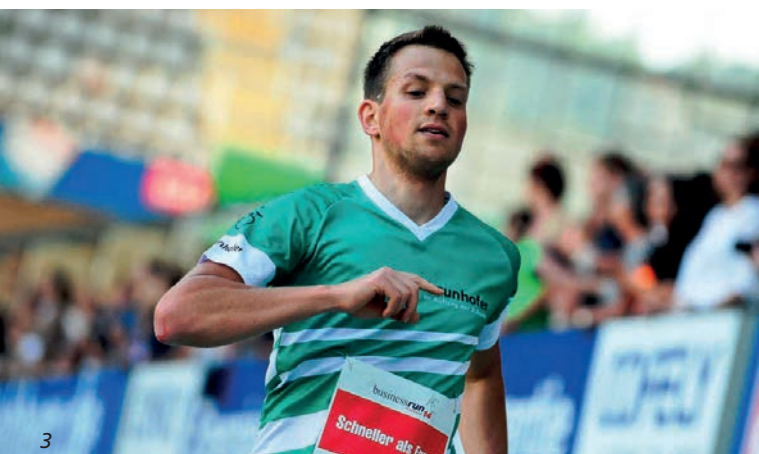
Foto 1: Dr. Alexander Stolz bei seinem Vortrag; **Fotos 2 und 6:** Kolleginnen und Kollegen, Partner, Kunden und Wegbegleiter nahmen Abschied von Christoph Mayrhofer; **Foto 3:** Professor Klaus Thoma dankt seinem langjährigen Abteilungsleiter; **Foto 4:** Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken sprach über die Zusammenarbeit »Südschiene«: UniBW, WTD 52, EMI am Beispiel der BauProtect; **Foto 5:** Einatmen und Ausatmen. Das Lebensmotto von Christoph Mayrhofer auf einem T-Shirt war das Geschenk der Kolleginnen und Kollegen in Efringen-Kirchen.

DER RUHESTAND IST DAS, WORAUF MAN SEIN GANZES LEBEN LANG HINARBEITET
UND SICH ERSCHROCKEN WUNDERT, WENN ES DANN SOWEIT IST.



BUSINESS RUN FREIBURG

5. JUNI 2014



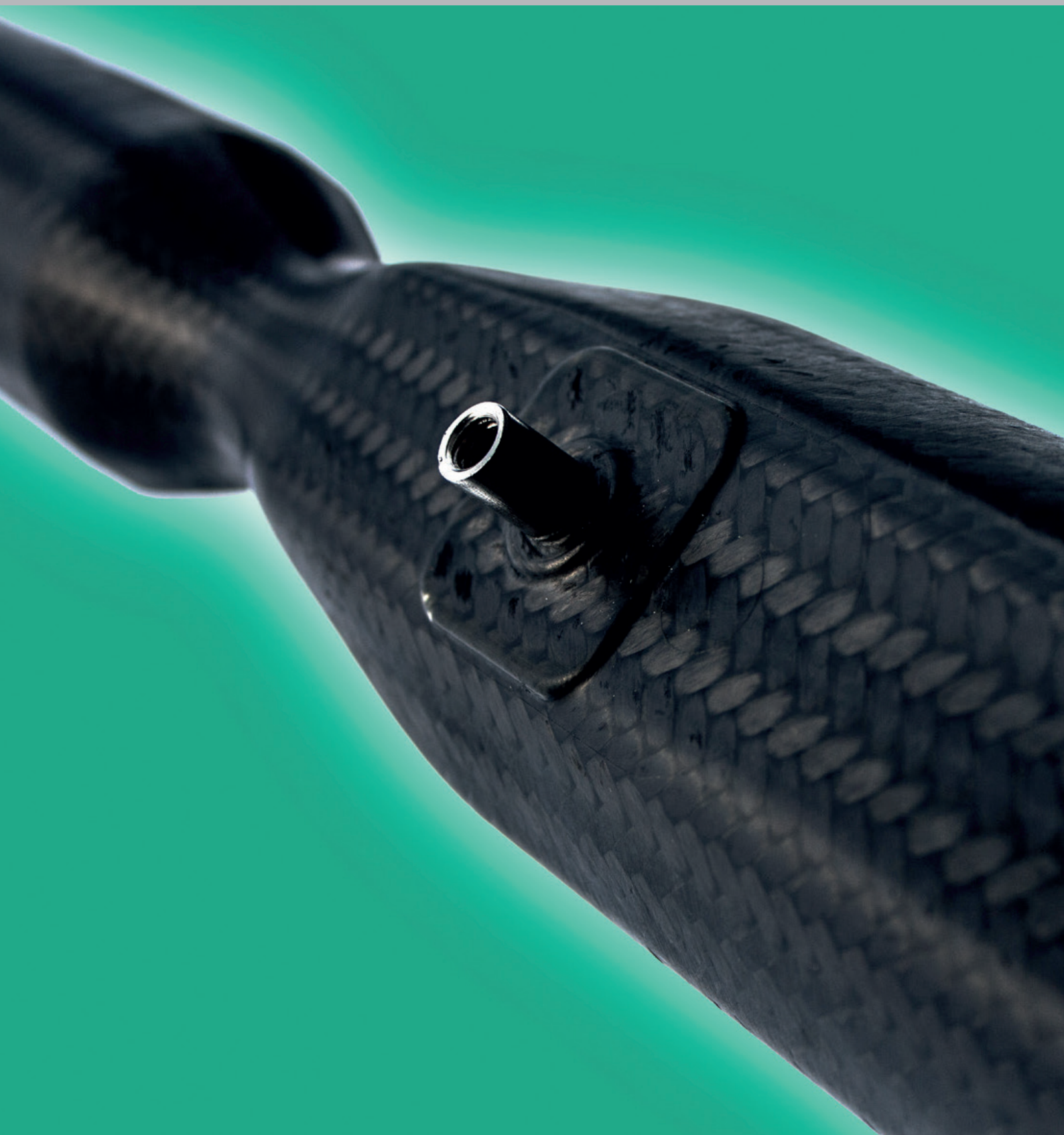
BusinessRun Freiburg 2014

Am 5. Juni 2014 hat sich das Institut zum ersten Mal am Freiburger BusinessRun beteiligt. Gleich fünf Teams gingen an den Start der 6 Kilometer langen Strecke rund um das Schwarzwald-Stadion. Das erfolgreichste EMI-Team mit Frank Boraus, Manuel Beck und Markus Jung konnte sich einen beachtlichen 7. Platz in der Teamwertung erlaufen und war damit die erfolgreichste Fraunhofer-Mannschaft.

Der nächste BusinessRun findet am 15. Juni 2015 statt. Weitere Information finden Sie unter www.business-run-freiburg.de

Foto 1: Ein starkes Team für den BusinessRun; **Foto 2:** Gute Laune im Team »Lazy Space«; **Foto 3:** Er war der Schnellste: Markus Jung im Zieleinlauf, er wurde 2. in seiner Altersklasse und 7. mit seinem Team »Schneller als Ernst«; **Fotos 4 und 5:** Beim Start war viel los: Mehr als 3800 Läuferinnen und Läufer gingen auf die Strecke; **Foto 6:** Fraunhofer Freiburg war stark vertreten: Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer ISE, IAF und IWM haben sich am Lauf beteiligt.

AVK-INNOVATIONSPREIS
6. OKTOBER 2014





AVK-Innovationspreis für die Gruppe Composite Design

Auf der Tagung der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (AVK) am 6.10.2014 wurde die Gruppe Composite Design des Fraunhofer EMI zusammen mit ihren Projektpartnern mit der Bronzemedaille des AVK-Innovationspreises im Bereich Forschung/Wissenschaft ausgezeichnet.

Der renommierte AVK-Innovationspreis wird seit 1995 von der AVK für herausragende Innovationen in der Composite-Industrie vergeben. Ziel des Innovationspreises ist die Förderung neuer Produkte/Bauteile bzw. Anwendungen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) sowie die Förderung neuer Verfahren bzw. Prozesse zur Herstellung dieser FVK-Produkte.

Der Preis wurde an die Composite-Design-Gruppe zusammen mit Ihren Projektpartnern (die Fraunhofer-Institute ICT und IPM, IFB Uni Stuttgart, FAST Karlsruher Institut für Technologie, ASCS und Porsche) für Arbeiten an dem »Transferprojekt Porsche« des Technologieclusters Composites Baden-Württemberg TC² verliehen.

Im Rahmen des »Transferprojekt Porsche« wurden Crashstrukturen aus CFK-Geflecht untersucht, um diese im Bereich der Simulation als auch der Fertigungstechnik voranzubringen. Ein Schwerpunkt des Projektes war die Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie im Hochdruck-RTM-Verfahren zur Herstellung von integralen Hohlstrukturbauteilen. Die Zielsetzung war eine Reduktion der Zykluszeiten, um den wirtschaftlichen Anforderungen des Kraftfahrzeugbaus zu genügen, unter Beibehaltung der hohen Eigenschaften im Struktur- und Crashverhalten des CFK-Verbundes. Das EMI im Speziellen befasste sich mit der Charakterisierung des Verbundwerkstoffs sowie der Methodenentwicklung im Bereich des »Crushing« und leistete somit einen wertvollen Beitrag zum Erfolg des Projekts.

Foto links: Demonstrator-Bauteil aus tri-axialem CFK-Geflecht, welches im Hochdruck-RTM-Verfahren hergestellt worden ist.

Foto oben: Dr. Sebastian Kilchert (Mitte) nahm den Preis stellvertretend für die Gruppe entgegen.

Von links nach rechts: Dr. Gerd Esswein, Mitglied im AVK-Vorstand; Florian Gnädinger, Universität Stuttgart; Alexander Walser, ASC-S; Dr. Sebastian Kilchert, Fraunhofer EMI; Michael Karcher, Fraunhofer ICT; Prof. Dr. Frank Henning, Fraunhofer ICT; Heike Wolfangel, Mitglied im AVK-Vorstand. Abwesend bei der Preisverleihung waren die Projektpartner Dr. Julian Schöpfer, Porsche AG und Timm Kuhlmann, Fraunhofer IPA.

ERFOLGREICHER START INS BERUFSLEBEN: EHRUNG DER BESTEN 11. NOVEMBER 2014



Erfolgreicher Start ins Berufsleben: Ehrung der Besten

Zum Abschluss ihrer Berufsausbildung ehrt Fraunhofer jährlich Auszubildende mit heraus- ragenden Leistungen – zusammen mit ihren Ausbilderinnen und Ausbildern.

Eine Ausbildung bei Fraunhofer steht immer im Zeichen der Forschung. Deshalb fand im Rahmen der feierlichen Ehrung der Auszubildenden eine Institutsbesichtigung am Fraunhofer IBP statt, wo sie gemeinsam mit ihren Ausbilderinnen und Ausbildern das Fluglabor besichtigten konnten. Anschließend gab es eine Diskussionsrunde über Nachhaltigkeit im alltäglichen und beruflichen Umfeld.

Für die Ehrung wurden die besten Azubis ihres Jahrgangs zu einem Festakt im Fraunhofer-Haus empfangen. Stefan Scherer wurde für seinen Abschluss als Elektroniker mit einem »sehr gut« ausgezeichnet.

Susanne Woltering, Leiterin der Fraunhofer-Personalentwicklung (B1), überreichte den jungen Talenten ihre Urkunden und die Stelen mit dem Motiv eines in See stehenden Schiffs unter dem Motto »Volle Kraft voraus!«.

»Für uns sind unsere Auszubildenden wichtige Nachwuchskräfte. So gut wie alle heute geehrten Auszubildenden werden weiter bei Fraunhofer arbeiten, parallel ein weiterführendes Studium oder eine Techniker Ausbildung absolvieren. Das freut uns sehr«, sagt Woltering.

Über die Erfolge der Azubis freuten sich auch die mitprämiierten Ausbilderinnen und Ausbilder, die mit ihrem Engagement wesentlich dazu beitrugen. Kevin Kreklow wurde mit einer Ehrenurkunde und der Stele »Stolz darauf!« geehrt.

Auszubildende wurden im Fraunhofer-Haus für ihre herausragenden Leistungen geehrt – die Urkunden überreichte Susanne Woltering, Leiterin der Fraunhofer-Personalentwicklung. Stefan Scherer aus dem EMI-Elektronik-Labor (Mitte) wurde für seinen »sehr guten« Berufsabschluss geehrt, Kevin Kreklow (links) erhielt eine Ehrenurkunde als sein Ausbilder.

HONORARPROFESSUR FÜR DR. FRANK SCHÄFER 11. MÄRZ 2015



Honorarprofessur für Dr. Frank Schäfer

Am 11. März 2015 wurde Frank Schäfer vom Rektor der Universität Freiburg, Prof. Dr. Hans-Jochen Schiewer, zum Honorarprofessor ernannt. An der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen hält er eine Vorlesung über »Shock Waves in Geomaterials«. Ein Aspekt dieser Vorlesung ist die »Einführung in die Stoßwellentheorie«, sie richtet sich an Studierende im Studiengang Geologie und Mineralogie.

Mit dieser Honorarprofessur wird das Netzwerk zwischen Fraunhofer EMI und Albert-Ludwigs-Universität Freiburg weiter verstärkt, indem beispielsweise Bachelor- und Masterarbeiten am Ernst-Mach-Institut geschrieben oder auch Promotionen durchgeführt werden.

Als Mitglied der Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen kann Frank Schäfer inhaltliche Kooperationen anregen. Neben der Anbindung an die Technische Fakultät schafft dies zusätzliche Möglichkeiten der Zusammenarbeit, in denen das EMI als technologische Schnittstelle fungiert. Darüber hinaus bieten sich neue Perspektiven in der gemeinsamen Akquise von Projekten. Eine wichtige Rolle spielt dabei das Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg, in das sich Prof. Frank Schäfer mit Prof. Dr. Thomas Kenkmann vom Institut für Geo- und Umweltwissenschaften – Geologie zusammen im Bereich der Georisiken durch Extremereignisse einbringen möchte. Erforscht werden zum Beispiel die Auswirkungen von Einschlägen von Himmelskörpern auf unser Geosystem aber auch Fragestellungen im Zusammenhang mit Blitzeinschlägen oder Hangrutsch.



Prof. Frank Schäfer und Prof. Klaus Thoma bei der feierlichen Verleihung des goldenen Doktorhutes.

Prof. Frank Schäfer mit dem Rektor der Albert-Ludwigs-Universität, Prof. Hans-Jochen Schiewer (links) und Prof. Stefan Hiermaier (rechts) am 15. März 2015 bei der Übergabe der Ernennungsurkunde zum Honorarprofessor.

DOKTORANDEN

Doktorandenseminar am EMI

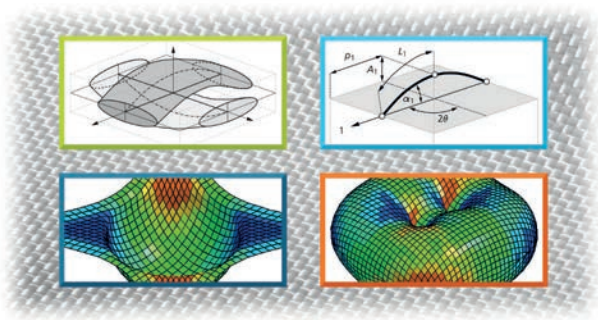
Im Jahr 2014 haben Jens Fritsch und Matthias Boljen ihre erfolgreich abgeschlossene Promotion gemeinsam gefeiert. Die beiden jungen Wissenschaftler haben einander während der Erstellung ihrer Arbeiten stets begleitet und unterstützt – bei der Doktorfeier haben sie noch einmal auf die auch manchmal zähen Zeiten des Promovierens zurückgeblickt, und die Freude über den Erfolg war umso größer.

Die Arbeit von Matthias Boljen ist unter dem Titel »Ein kontinuumsmechanisches Materialmodell für das Verformungs- und Schädigungsverhalten textiler Gewebestrukturen bei dynamischen Lasten« in der »Schriftenreihe $\dot{\epsilon}$ – Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik« erschienen. Textile Gewebe sind aufgrund ihrer niedrigen Dichte, ihrer großen Flexibilität und ihrer hohen Zugfestigkeit hervorragend geeignete Materialien für Leichtbaukonstruktionen. Aufgrund der charakteristischen Fadenstruktur ist ihr Verhalten üblicherweise stark durch nichtlineare Merkmale geprägt, welche durch kontinuumsmechanische Materialmodelle bislang nur rudimentär erfasst werden können. In der vorliegenden Arbeit wird ein Materialmodell entwickelt, welches die Spannungsberechnung auf der Makroebene aus der Betrachtung einer repräsentativen Volumenzelle auf der Mesoebene herleitet. Der skalenübergreifende Ansatz ermöglicht die wirkungsvolle Kombination effizienter Modellierungstechniken mit der Detailgenauigkeit hochauflösender numerischer Modelle. Im vorliegenden Fall können wichtige Fadenwechselwirkungen mit geeigneten konstitutiven Beziehungen bei mehreren Verzerrungsraten gleichermaßen erfasst werden. Das Modell wurde als benutzerdefinierte Materialroutine in den expliziten Finite-Elemente-Code LS-DYNA implementiert und mittels einer umfangreichen Charakterisierung von realen Geweben validiert.

Jens Fritsch hat über die »Charakterisierung und Modellierung glasfaserverstärkter Thermoplaste unter dynamischen Lasten« promoviert und bereits im Jahr 2012 abgeschlossen. Kunststoffe, die mit Langglasfasern verstärkt sind, besitzen neben ihren guten mechanischen Eigenschaften auch enormes Leichtbaupotenzial – bei gleichzeitig kostengünstigen Herstellungsprozessen. Im Automobilbau werden sie daher inzwischen häufig für große Bauteile eingesetzt, zum Beispiel als Strukturelemente für Instrumententafeln. Im Crash-Fall können bei solchen Komponenten starke Deformationen bis hin zum Versagen auftreten. Um solche Vorgänge prognosefähig in der numerischen Simulation abbilden zu können, sind entsprechende Materialmodelle nötig, die die komplexen mechanischen Eigenschaften der langglasfaserverstärkten Kunststoffe abbilden können. Kommerzielle Berechnungsprogramme für den Einsatz in der Crash-Simulation bieten gegenwärtig nicht die Möglichkeit, die genannten Phänomene und Abhängigkeiten beliebig zu kombinieren beziehungsweise gleichzeitig zu verwenden. In Jens Fritschs Dissertation wird ein Materialmodell für ein langglasfaserverstärktes Polypropylen PP/LGF entwickelt, welches die für die Crash-Simulation dominierenden Materialeigenschaften mit hinreichender Genauigkeit abbilden soll. Dazu wird auch eine Vorgehensweise entwickelt, die sowohl die notwendigen Charakterisierungsexperimente als auch die Ableitung der Materialkonstanten des Materialmodells aus diesen Experimenten spezifiziert. Auch seine Arbeit ist in der »Schriftenreihe $\dot{\epsilon}$ – Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik« erschienen.

Die Doktoranden am EMI 2014.





Ein kontinuumsmechanisches Materialmodell für das Verformungs- und Schädigungsverhalten textiler Gewebestrukturen bei dynamischen Lasten

Schriftenreihe $\dot{\mathcal{E}}$ – Forschungsergebnisse aus der

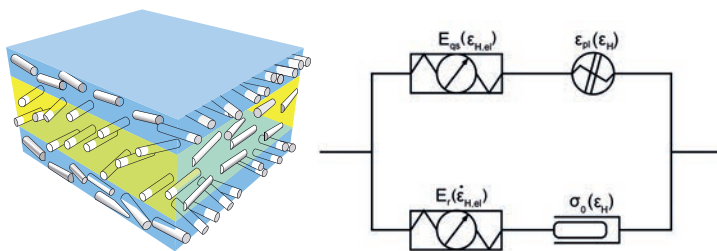
Kurzzeitdynamik, Band 26, Matthias Boljen

Hrsg.: Fraunhofer EMI, Freiburg/Brsg.;

Klaus Thoma, Stefan Hiermaier

2014, Fraunhofer-Verlag

ISBN 978-3-8396-0747-3



Charakterisierung und Modellierung glasfaserverstärkter Thermoplaste unter dynamischen Lasten

Schriftenreihe $\dot{\mathcal{E}}$ – Forschungsergebnisse aus der

Kurzzeitdynamik, Band 22, Jens Fritsch

Hrsg.: Fraunhofer EMI, Freiburg/Brsg.;

Klaus Thoma, Stefan Hiermaier

2012, Faunhofer-Verlag

ISBN 978-3-8396-0333-8

Die Doktorfeier von Matthias Boljen und Jens Fritsch war sowohl für die Familie als auch für die Doktorväter und Kollegen Grund zur Freude. Eine solche Arbeit ist nicht nur für die Promovenden, sondern auch für ihr Umfeld eine Herausforderung. Daß diese gut gemeistert wurde, ist allen anzusehen!



EMI-ALUMNI GASTWISSENSCHAFTLER



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 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 zehn 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.

IMPRESSUM

Redaktion

Birgit Bindnagel
Tobias Leismann
Stefan Hiermaier

Redaktionelle Mitarbeit

Johanna Holz

Layout und graphische 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 +49 761 2714-366
birgit.bindnagel@emi.fraunhofer.de
www.emi.fraunhofer.de

© Fraunhofer EMI, Freiburg 2015

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier aus
nachwachsenden Rohstoffen.

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik,
Ernst-Mach-Institut, EMI
Eckerstraße 4
79104 Freiburg
Telefon +49 761 2714-0
info@emi.fraunhofer.de
www.emi.fraunhofer.de

Standorte
Freiburg, Efringen-Kirchen und Kändern