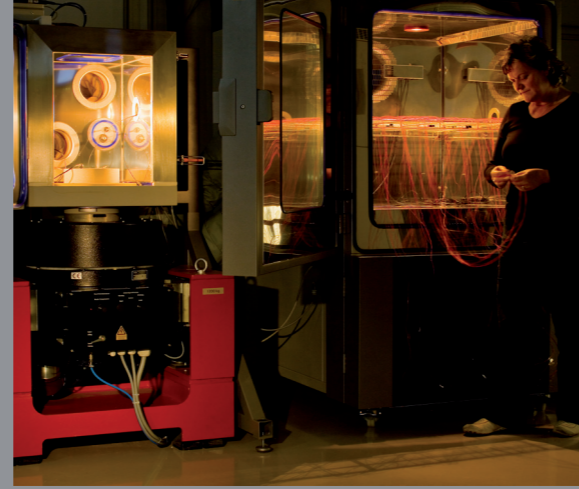




Simulation und Experiment



Labor für Langzeitzuverlässigkeitsuntersuchungen



Beschleunigte Lebensdauertests



Fraunhofer
ENAS

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE NANOSYSTEME ENAS

MICRO MATERIALS CENTER

Kontakt:

Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS
Abteilung Micro Materials Center

Technologie-Campus 3
09126 Chemnitz

Leiter der Abteilung Micro Materials Center

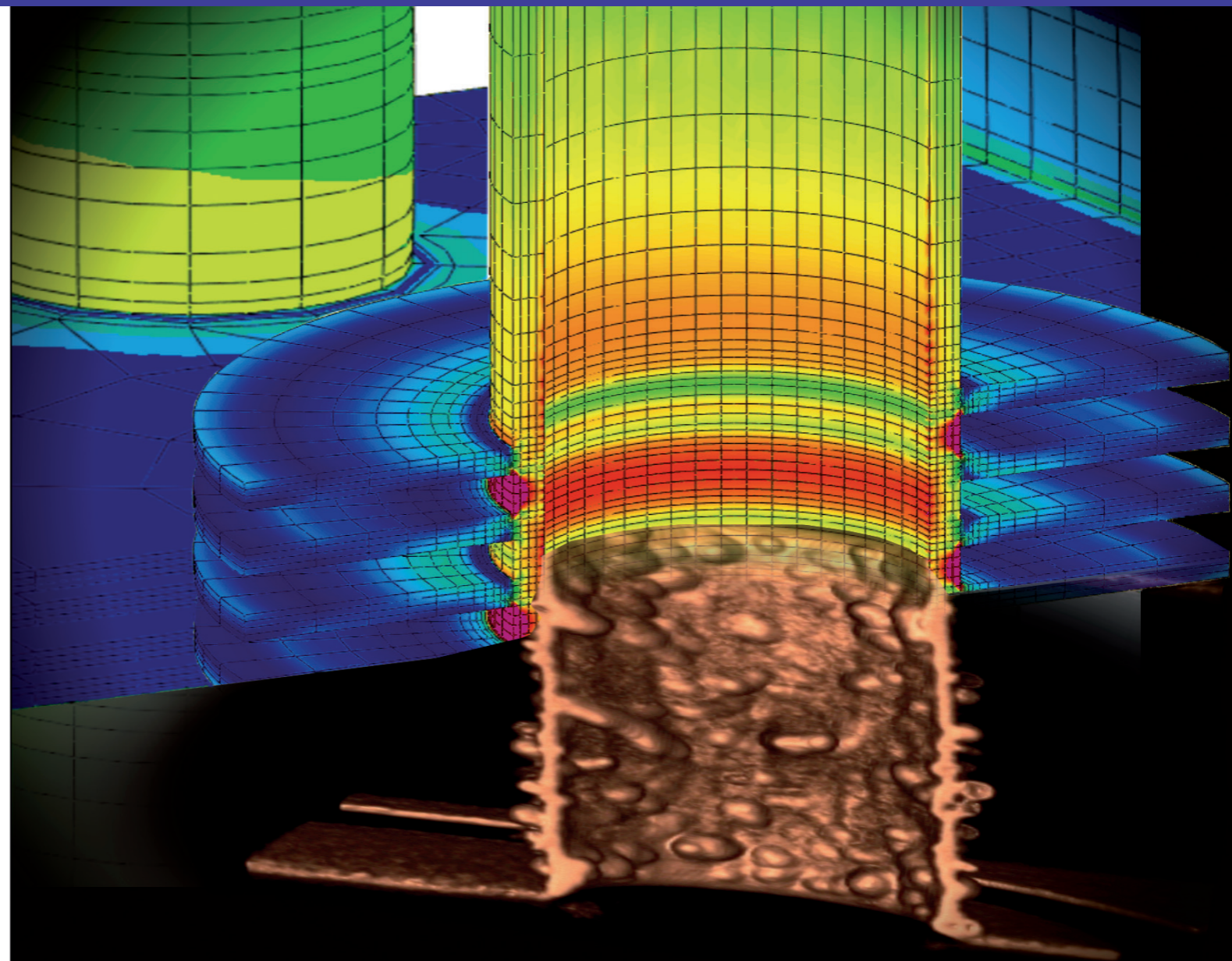
Prof. Dr. Sven Rezpka
Telefon: +49 371 45001-421
Fax: +49 371 45001-521
E-Mail: sven.rzepka@enas.fraunhofer.de
Internet: <http://www.enas.fraunhofer.de>

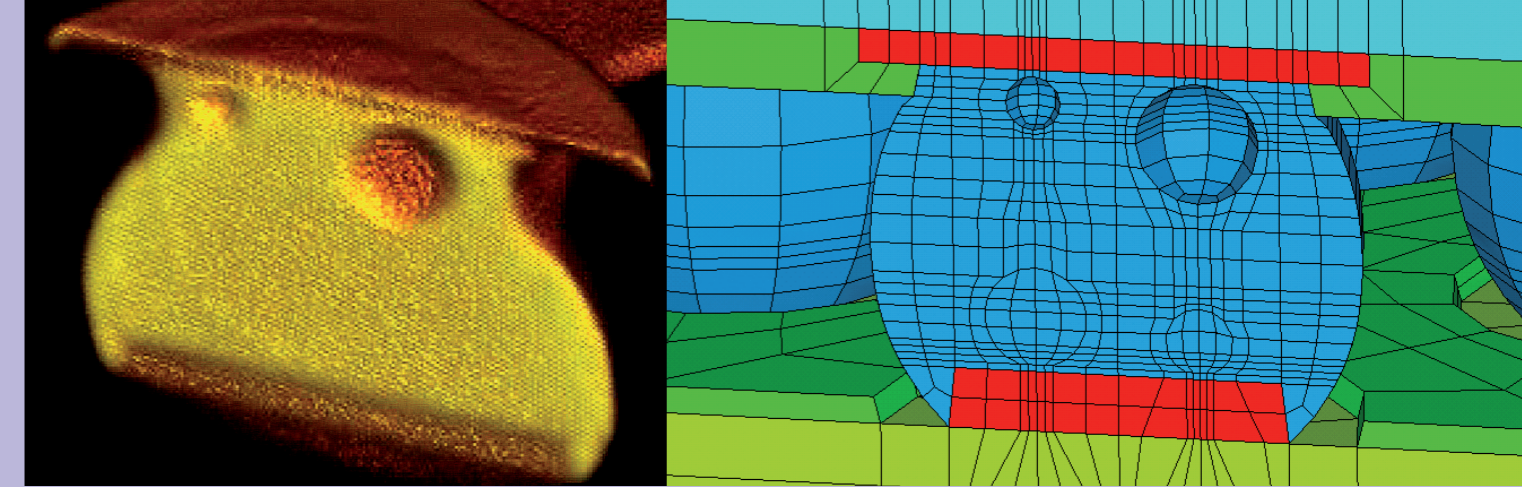
Titelseite:

Einheit von Simulation und Experiment:
Zuverlässigkeitsbewertung einer HF-Durchkontaktierung in Fahrerassistenzsystemen

Photos:

Fraunhofer ENAS





Zerstörungsfreie Analyse und vollparametrisierte Modellierung realer Mikro- & Nano-Strukturen

ZUVERLÄSSIGKEITSFORSCHUNG

=

EINHEIT VON EXPERIMENT UND SIMULATION

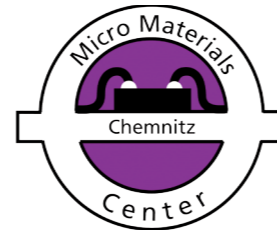
Die gegenwärtigen Entwicklungen der Mikro- und Nanotechnologie sind faszinierend. Unbestritten spielen sie heutzutage eine Schlüsselrolle bei Produktentwicklungen und dem technischen Fortschritt. Mit einer großen Auswahl verschiedener Komponenten, vielfältiger Technologien und Materialien ermöglichen sie die Integration von mechanischen, elektrischen, optischen, chemischen, biologischen und anderen Funktionen in ein einziges System auf kleinstem Raum.

Das Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS in Chemnitz ist spezialisiert auf Forschung und Entwicklung im Bereich Smart Systems Integration unter Nutzung von Mikro- und Nanotechnologie gemeinsam mit Partnern aus Deutschland, Europa und weltweit. Abgeleitet von zukünftigem Bedarf der Industrie bietet das Fraunhofer ENAS Dienstleistungen in folgenden Bereichen:

- ▶ Entwicklung, Design und Test von MEMS und NEMS (mikro- und nano-elektro-mechanischen Systemen)
- ▶ Packaging von MEMS und NEMS auf Waferebene
- ▶ Metallisierungs- und Interconnectsysteme für Mikro- und Nanoelektronik sowie 3-D-Integration
- ▶ Neue Sensor- und Systemkonzepte unter Einsatz innovativer Materialsysteme
- ▶ Integration von gedruckten Funktionalitäten in Systemen
- ▶ Zuverlässigkeit und Sicherheit von Mikro- und Nanosystemen

Micro Materials Center (MMC)

Die am Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen zur Zuverlässigkeitsforschung sind das Entwicklungsergebnis aus 25 Jahren. Begonnen als Arbeiten zu Lebensdauerabschätzung, Bruch- und Schädigungsmechanik am Institut für Mechanik wurden sie durch das Micro Materials Center in den 90er Jahren auf das Gebiet der elektronischen Baugruppen übertragen und dabei um wesentliche Bestandteile erweitert. Mit der Etablierung des heutigen Fraunhofer-Instituts erfolgte die konsequente Ausrichtung auf den Mikro/Nano-Übergangsbereich.



Die angesammelten Kompetenzen ermöglichen es heute, die Effekte und Wechselwirkungen, welche zu Drift oder Degeneration von Funktionsparametern sowie letztendlich zum Ausfall in Mikro- und Nanosystemen führen, hinsichtlich ihrer Mechanismen und Folgen aufzuklären, zu analysieren und zu bewerten (Physics of Failure). Damit können die Zuverlässigkeitsrisiken neuartiger Technologien und Produkte quantifiziert und in Lebensdauermodelle überführt werden. Das findet seine unmittelbare Anwendung im Entwurf der neuen Systeme (Design for Manufacturability and Reliability). Als höchste Form wird dabei angestrebt, bei der Optimierung des Produktdesigns weitgehend auf die zeitlich und personell aufwändigen Vorversuche verzichten zu können. Stattdessen soll dies durch ‚virtuelles Prototyping‘ erfolgen, d.h. durch Mittel der numerischen Simulation. Dabei sollen mit einem Bruchteil des Aufwandes zuverlässige Lösungen entstehen, die bereits

in ihrer ersten Realisierung für die Fertigung qualifiziert werden können. Die heutige Praxis im Mikroelektronik-Schaltungsentwurf und im Automobilbau gibt Anlass zu Optimismus, eine solche Vision auch für die komplexen Mikro- und Nanosysteme erfolgreich umsetzen zu können. Grundvoraussetzung ist dabei, dass die simulativen Prognosen dieselbe Präzision aufweisen wie die bisher durchgeführten Stichprobentests. Der Schlüssel hierfür liegt in der konsequenten Einheit experimenteller und simulativer Methoden, welche die hochpräzise Kalibrierung der Modelle und die umfassende Validierung der Simulationsergebnisse ermöglicht. Prof. Bernd Michel und das Micro Materials Center am heutigen Fraunhofer ENAS sind Pionier und Träger dieser Strategie.



Das European Center for Micro- and Nanoreliability (EUCEMAN) ist das umfangreichste europäische Forschungsnetzwerk zur Zuverlässigkeit im Mikro/Nano-Übergangsbereich. Das Fraunhofer ENAS koordiniert die Aktivitäten von der EUCEMAN-Zentrale in Berlin aus. Bedeutende Labors und Forschungseinrichtungen aus zahlreichen europäischen Staaten, wie Frankreich, Österreich, Niederlande, Schweden, Schweiz, Polen, Rumänien u.a., arbeiten in diesem Netzwerk mit. EUCEMAN ist ein bedeutender Initiator zahlreicher europäischer Projekte im Bereich der Forschung zur Zuverlässigkeit. Der erste Weltkongress ‚Micro/Nano Reliability‘ führte Teilnehmer aus über 40 Ländern zusammen. Weitere Informationen unter: www.euceman.com

Höchste Zuverlässigkeit für Industrie, Forschung und Lehre

Das Micro Materials Center bietet im Auftrag und in Kooperation Dienstleistungen auf dem Gebiet von Forschung und Entwicklung, zur Beratung und Begleitung per Consulting, zum Mentoring sowie in Form technisch-wissenschaftlicher Gutachten auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsforschung für die Mikro- und Nanotechnologien und der sie begleitenden Werkstoffforschung an. Zu den Partnern und Kunden gehören eine Vielzahl kleiner und mittelständischer Unternehmen wie auch Großunternehmen und Weltkonzerne von A-Z – zum Beispiel:

AMD, Audi, Global Foundries, Siemens,
 ... BMW, Bosch, Hella, Heraeus, X-Fab,
 Continental, ... IBM, Infineon, ... ZMDi

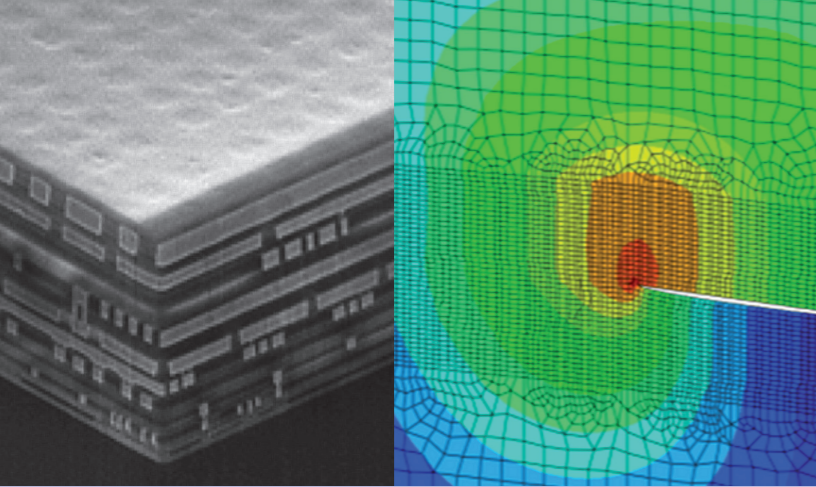
Das Micro Material Center arbeitet in regionalen, nationalen und internationalen Forschungsprojekten und -initiativen mit:

- ▶ Kompetenzzentrum „Technologien für die Elektromobilität“, Chemnitz
- ▶ Spitzencluster-Initiative „Cool Silicon“,
- ▶ EU Joint Technology Initiative „Clean Sky“,
- ▶ European Green Car Initiative und weitere.

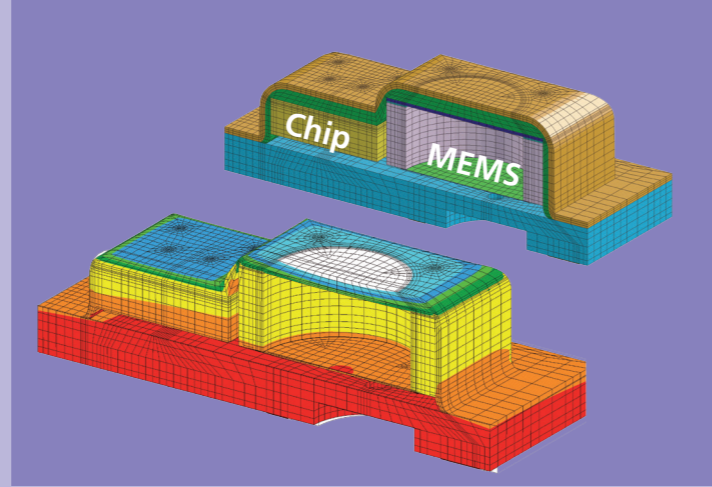
Das MMC ist aktiv in Plattformen und Verbänden:

- ▶ Dresden Fraunhofer-Cluster Nanoanalytik und Silicon Saxony,
- ▶ VDI/VDE – GMM,
- ▶ European Platform of Smart Systems (EPoSS) und andere.

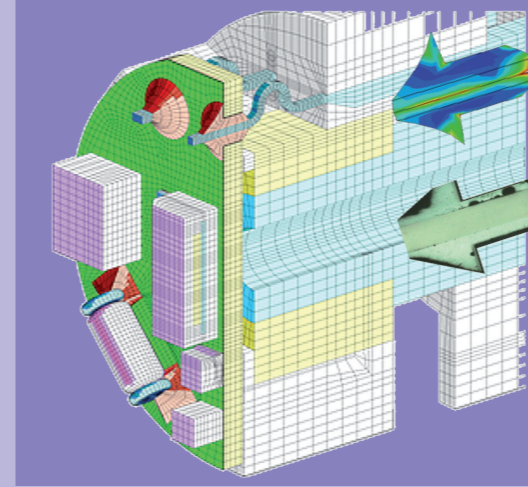
Das MMC beteiligt sich an der universitären Aus- und Fortbildung, editiert internationale Fachzeitschriften und gibt eigene wissenschaftliche Schriften heraus.



Bruchmechanik für den Nanometer-Bereich

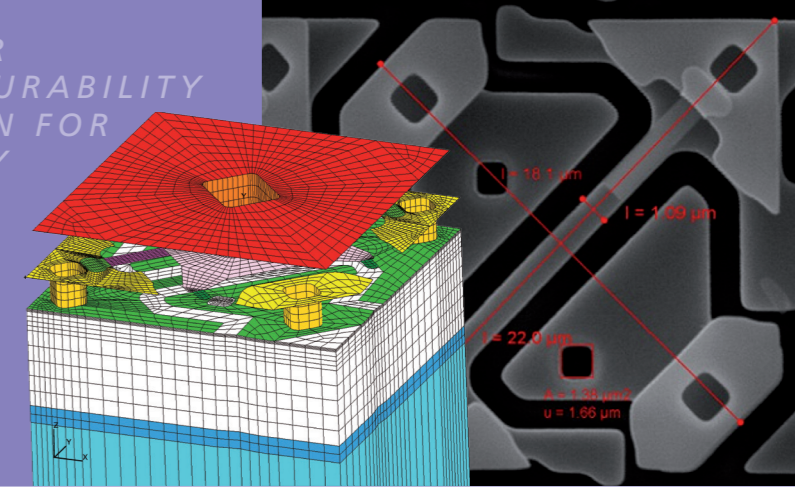


Virtuelles Prototyping für Smart Systems



Sensor- und Aktuator-Systeme für Automotive- und Kommunikationsanwendungen

DESIGN FOR
MANUFACTURABILITY
AND DESIGN FOR
RELIABILITY



ZUVERLÄSSIGKEIT FÜR MIKRO/NANO- UND CLEAN-TECHNOLOGIES

Zuverlässigkeit für 3-D-Nanoelektronik

Im Jahrzehnt bis 2020 liegen die größten Herausforderungen für die Back-End-of-Line (BEoL) und Packaging-Technologien der Elektronik in der Meisterung der 3-D-Integration stark abgedünnter Chips mittels Vias durch das Silizium hindurch (**3-D-TSV**) und in der Beherrschung der **CHIP/PACKAGE-INTERAKTION** (CPI) auch bei ultradichter Packung und Ultra-low-k-(ULK)-Isolationsschichten auf dem Wafer. Das Micro Materials Center unterstützt diese Anstrengungen durch Prognosen zu Machbarkeit und Zuverlässigkeit der neuen Technologien auf Basis modernster **SIMULATIONSTECHNIKEN** unter Einsatz der Kontinuums-, Bruch- und Schädigungsmechanik auf weltweit höchstem Niveau.

Dabei werden unter anderem folgende Aspekte betrachtet:

- ▶ Analyse und Optimierung von Herstellbarkeit (Yield) und Zuverlässigkeit im Mikro/Nano-Übergang,
- ▶ Bewertung und Prognose der BEoL-Bruchfestigkeit,
- ▶ Einbeziehen von ULK- und nanoporigen Materialien,
- ▶ Komplettbetrachtung der 3-D-Systemintegration inkl. TSV, vom Einzel-Via bis zum Gesamt-Modul,
- ▶ Anwendung der Bruch- und Schädigungsmechanik im Mikro-, Nano- und Sub-Nanometer-Bereich (z.B. Anriss in Barrierschichten),
- ▶ Riss- und Delaminations-Vermeidungsstrategien.

Eingesetzte Simulationstechniken sind:

- ▶ Extended FEM (X-FEM),
- ▶ Cohesive Zone Modelling (CZM) und virtuelle Riss-Schließungstechnik (VCCT),
- ▶ Multi-Skalen- und Multi-Level-Simulation.

Zuverlässigkeit für heterogene Mikro/Nano-Systeme

Die neuen Effekte der nanofunktionalen Werkstoffe und Komponenten erfordern **MULTI-FELD-KOPPLUNGEN**, um die Zuverlässigkeit realistisch analysieren, bewerten und prognostizieren zu können. Die Vielzahl der neu zu modellierenden Werkstoffeigenschaften und neuartiger Wechselwirkungen erzwingt darüber hinaus den Einsatz effektiver **OPTIMIERUNGSGRUNDALGORITHMEN** zur Parameteridentifikation. Am Micro Materials Center werden diese Tools für die folgenden Anwendungsfelder genutzt und weiter entwickelt:

- ▶ FE-Simulation komplexer 3-D-Systeme der Mikro- und Nanosystemtechnik,
- ▶ Charakterisierung und Modellierung mikro- und nanotechnischer Werkstoffe,
- ▶ Thermo-mechanische Beanspruchungsanalysen, Zuverlässigkeits- und Lebensdauermodellierung für Einzelkomponenten und Komplettsysteme mit deutlich erweitertem Temperaturbereich,
- ▶ Simulation kombinierter Belastungsvorgänge: Temperatur, Feuchte, elektrische Spannung / elektrischer Strom, Fluid-Strömung, statische und dynamische mechanische Belastung,
- ▶ optimale Auslegung neuer Aufbauten für Test- und Einsatzbedingungen,
- ▶ ‚Design for Reliability‘-Support bei technologischen Innovationen auf Basis umfassender Erfahrungen,
- ▶ Erarbeitung von Standards für Mikro/Nano-Systeme,
- ▶ automatisierte DoE-, Optimierungs- und Robustheitsanalysen.

Zuverlässigkeit für moderne Mobilität

Hochzuverlässige Smart Systems und Alternativ-Werkstoffe stellen die Hardware-Basis aller modernen Mobilitätskonzepte dar. Bereits aus dem regulären Betrieb dieser Systeme für **ELEKTROMOBILITÄT, AVIONIK UND RAUMFAHRT** leiten sich jedoch Anforderungen an die mechanische und thermo-mechanische Stabilität ab, die das Niveau der bisher üblichen Büro- und Industrieelektronik bei Weitem übersteigen. Die Sicherheitserfordernisse erhöhen diese Anforderungen weiter. Das Micro Materials Center beteiligt sich dazu unter anderem an folgenden Entwicklungsarbeiten:

- ▶ Entwicklung zuverlässiger Batterie-Management-Systeme neuer Generation (EU-Projekt ‚smart LIC‘),
- ▶ Erhöhung der Zuverlässigkeit der Leistungselektronik für E-Mobile (‚Powertrain‘),
- ▶ Prognose der Lebensdauer von Faser-Verbundwerkstoffen bei beliebiger Belastung auch unter Feuchteinfluss,
- ▶ Struktur der Verbundwerkstoffe: Bestimmung der Eigenschaften mehrlageriger Verbünde aus den Daten der Bestandteile (Matrix, Verstärkung),
- ▶ Strukturintegration und Strukturüberwachung (structural health monitoring) von Leichtbauteilen,
- ▶ Zuverlässigkeit von Sensornetzwerken: Analyse und Zuverlässigkeitstests für integrierbare Patchantennen in Wireless-Sensor-Netzwerken, in faserverstärkten Leichtbauteilen, in Li-Batteriezellen u.a.,
- ▶ Zuverlässigkeit von Komponenten zur aktiven Kühlung und Strömungsbeeinflussung: Simulation und Messung, Strömungscharakterisierung an Mikrojets.

Zuverlässigkeit für Energiesysteme

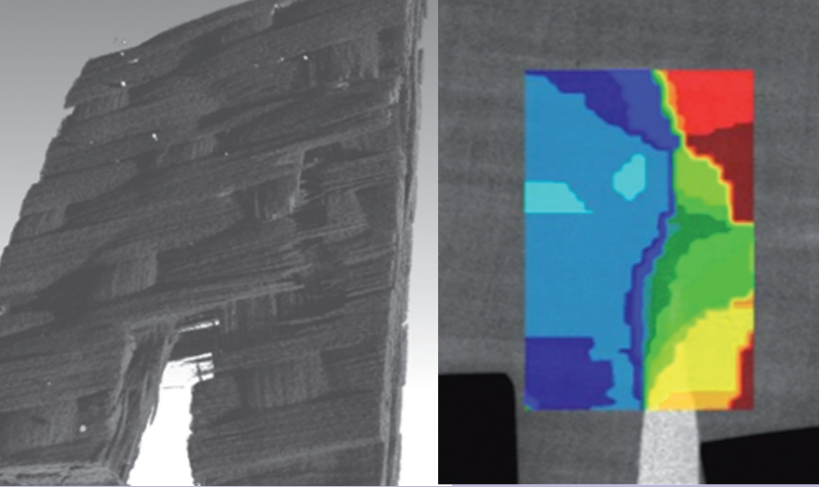
Herzstück der ‚Clean Technologies‘ als Verbindung der Hochtechnologien mit **ÖKOLOGISCHEN KONZEPTEN** ist die Energiegewinnung und -verteilung. Für die notwendige Kommunikation, Steuerung und Überwachung werden Smart Systems die entscheidende Rolle spielen. Das Micro Materials Center arbeitet an Konzepten und Lösungen für die spezifischen Zuverlässigkeitserfordernisse:

- ▶ Solarenergie – Sicherung der Modul-, System- und AVT-Zuverlässigkeit großformatiger Strukturen,
- ▶ Öl/Gas/Geothermie – beschleunigende Zuverlässigkeitstestmethoden für Höchsttemperatur-Systeme,
- ▶ Windkraft, Desert-Tec Langzeitlebensdauer unter extremen Umweltbedingungen (See-, Wüstenklima).

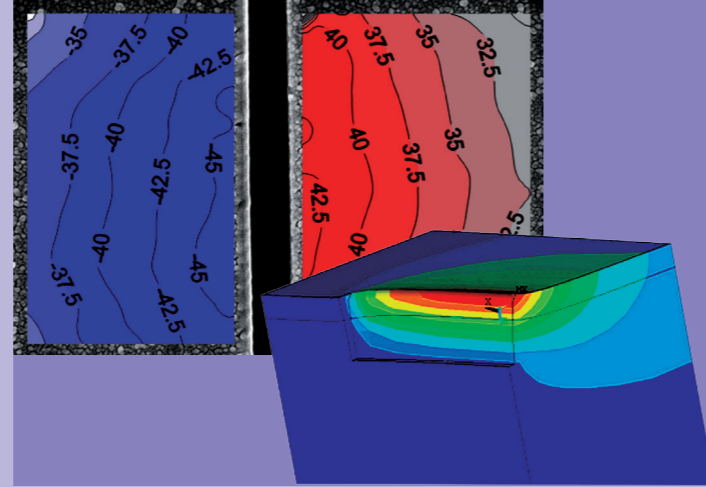
Sicherheit für Smart Systems

Zuverlässigkeitsfragen spielen eine große Rolle im Bereich der technischen Sicherheit (**SAFETY**) und der Sicherheit von Personen, Einrichtungen, Anlagen usw. (**SECURITY**). Mikro- und Nanotechnologien bieten ausgezeichnete Möglichkeiten zur Lösung derartiger Fragen. Die Arbeitsgruppe Micro- and Nanosecurity des MMC befasst sich zum Beispiel mit:

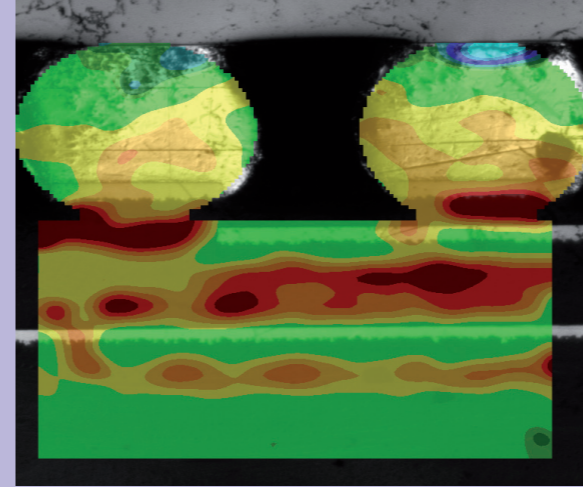
- ▶ Fälschungssicherheit von Komponenten, Systemen, Dokumenten (z.B. von Hochsicherheits-Chips),
- ▶ Sicherheit und Zuverlässigkeit medizinischer Produkte (z.B. von Herzschrittmachern),
- ▶ Gebäudesicherheit, Anlagensicherheit durch Mikro- und Nanotechnologien.



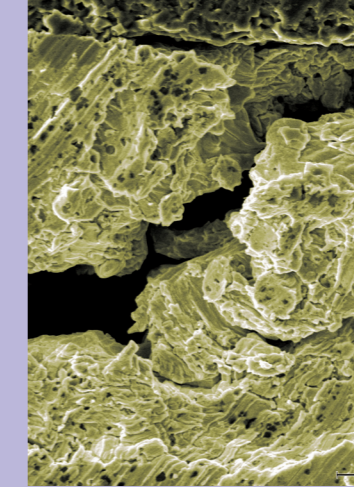
microDAC – Verformungsmessung an der Risspitze



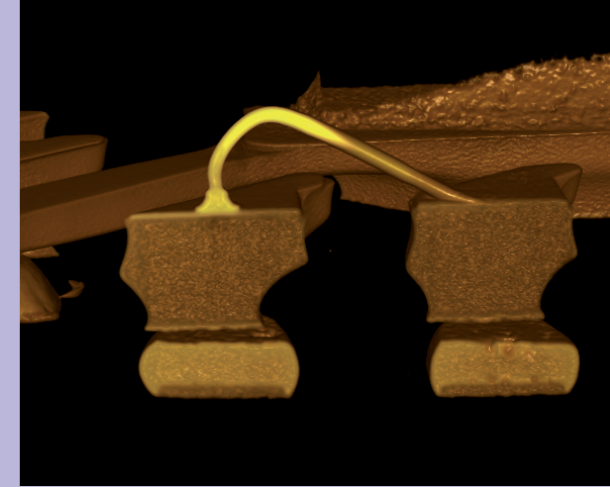
fibDAC – Stressmessung in kleinsten Dimensionen



Inhomogene Verformung im Substrat



Gefügeanalyse



Schadensbewertung in Mikrosystemen

OHNE PRAKTISCHES PRÜFEN KEINE

ZUVERLÄSSIGKEITSBEWERTUNG

Verformungsanalysen für alle Bereiche: Von nano-winzig bis MEGA-riesig

Für das phänomenologische Aufklären thermo-mechanischer Versagensmechanismen sowie die umfassende Interpretation von Bewegungs- und Deformationsvorgängen an Werkstoffen und Bauteilen werden am Micro Materials Center innovative Analyseverfahren auf Basis der digitalen Bildkorrelation genutzt: **MICRODAC®**, **NANODAC** (Eigenentwicklung mit der CWM GmbH). Sie erlauben auch die hochgenaue Kalibrierung der Modelle sowie die notwendige Validierung der Verformung bzw. der Bewegung als die primären Lösungen der mechanischen Simulationsrechnungen. Weitere Eigenschaften der Analyseverfahren sind:

- ▶ Anwendungsbereich: Nanometer ... Kilometer sowie Mikrosekunde ... Jahre,
- ▶ absolut rückwirkungsfreies in-situ-Messprinzip,
- ▶ freie Wahl der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Schutzgas / Vakuum, etc.).
- ▶ Typische Applikationsbeispiele betreffen:
 - ▶ Dehnungs- und Verwölbungsmessung an Werkstoff- und Bauteiloberflächen,
 - ▶ Temperaturabhängige 3-D-Volumen- und Verformungsanalyse per Röntgen-Computer-Tomografie,
 - ▶ Rissspitzen-Detektion, Rissverfolgung,
 - ▶ Materialdatenbestimmung (E-Modul, Querkontraktion, thermische Ausdehnung),
 - ▶ Haftfestigkeitsanalysen,
 - ▶ Stressmessung in Mehrschichtsystemen.

Messung von Schicht- und Eigenspannungen in kleinsten Dimensionen

Mechanische Spannungen sind ein wesentliches Instrument zur Performance-Erhöhung moderner Halbleiterkomponenten. Für einige Strukturen der Mikro/Nano-Systeme sind sie sogar funktionsnotwendig. Andererseits stellen sie oft die Hauptursache für Degradation und Ausfall der Smart Systems dar. Mechanische Spannungen sind stets strukturgebunden und daher lokal konzentriert. Das präzise Quantifizieren der Schicht-, Thermo- und Eigenspannungen ist somit ein Grunderfordernis für das Entwickeln funktionssicherer und zuverlässiger Mikro- und Nanosysteme. Das Micro Materials Center hat mehrere hochauflösende Verfahren zur Stressbestimmung entwickelt und im Einsatz. Sie gestatten auch unmittelbar das Validieren jener abgeleiteten Ergebnisgrößen der FE-Simulationen, anhand derer die Designoptimierung vorgenommen wird. Folgende Verfahren stehen bereit:

- ▶ **FIBDAC STRESS RELIEF** – eine Entwicklung des Micro Materials Center zur Stressbestimmung durch Spannungsfreisetzung im FIB-Mikroskop; leistungsfähig für nahezu alle Werkstoffe und Dimensionen – auch dort, wo etablierte Methoden versagen,
- ▶ **MICRO- UND NANO-RAMAN** – Stress-Mapping an Halbleitern, Kunststoffen und Nanomaterialien (z.B. carbon nano tubes – CNT) auch in Kombination mit FE-Simulation,
- ▶ Elektronenbeugung mit **EBSD**-Detektoren für höchste räumliche Auflösung an kristallinen Materialien,
- ▶ **STRESS-SENSOREN** – online Spannungsanalyse in Packages während Herstellung, Test und Betrieb.

Schadensanalyse, Schadensbewertung, Schadensvermeidung

Das Rückgrat der experimentellen Analyse realer Untersuchungsobjekte ist eine hochentwickelte Mikroskopie und Materialografie. Am Micro Materials Center verbinden sich mehr als zwei Jahrzehnte praktische Erfahrung mit einem breiten Spektrum modernster Analysetools unter anderem:

- ▶ die gesamte Palette der Mikroskopie (licht- und elektronenoptisch, Laser-Scan, Fluoreszenz, Ultraschall),
- ▶ Mikro/Nano-Analytik: EDX, EBSD, FIB (Zeiss Auriga 60),
- ▶ 3-D-Röntgen-Computertomografie mit Sub-Mikrometer-Ortsauflösung – 3D-XCT (Nanotom),
- ▶ zur umfassenden Materialografie und Gefügeanalyse,
- ▶ zur Volumenkorrelation und zur Stoff-/Topologie-Ermittlung,
- ▶ zur Messung geometrischer, thermo-mechanischer und elektrischer Kennwerte – in-situ in REM, FIB oder 3-D-XCT sowie unter vielfältig kombinierten Real-, Test- und Umweltbedingungen.

Sie werden für Forschung und Entwicklung wie auch bei der **ERSTELLUNG VON FACHGUTACHTEN** genutzt zum

- ▶ in-situ Bestimmen des mechanisch-thermischen Bauteilverhaltens unter realen Betriebsbedingungen,
- ▶ Erkennen und phänomenologischen Aufklären grundlegender Ausfallmechanismen sowie deren Fehlerbilder und Fehlermodi,
- ▶ Feststellen des Schadensumfanges,
- ▶ Rekonstruieren des Schadensherganges,
- ▶ Aufklären der Schadensursachen,
- ▶ Ableiten von Hinweisen zur Schadensvermeidung.

Beschleunigte Belastungs- und Langzeit-Alterungstests / Umweltstresstests

Für die Zuverlässigkeitsbewertung innerhalb der Entwicklung und Qualifikation neuer Mikro/Nano-Systeme sind beschleunigte Alterungstests essentiell, die die Ausfallmechanismen schneller aber nicht anders als unter den Einsatzbedingungen ablaufen lassen. Das Micro Materials Center beteiligt sich aktiv an der Schaffung solcher Tests auf Basis folgender Belastungen (einzeln und kombiniert):

- ▶ Thermisch (Lagerung, Wechsel- und Schock-Events),
- ▶ Mechanisch (Vibration, Schock- und Falltests),
- ▶ Elektrisch (Lastzyklen, Konstantstrom, Impulse),
- ▶ Umwelt (Feuchte, Inertgas, Vakuum Hermetizität).

Zur Validierung der Alterungstests betreibt das MMC in einem ehemaligen Bergwerk das **EUROPÄISCHE LABOR FÜR LANGZEIT-ZUVERLÄSSIGKEIT** (in Zusammenarbeit mit Infineon, Siemens, Bosch und anderen Partnern).

Werkstoffzuverlässigkeit

Grundvoraussetzung für das virtuelle Prototyping ist die quantitative genaue Kenntnis der Belastungseigenschaften und der Beanspruchungsgrenzwerte aller relevanten Werkstoffe. Dabei sind die zumeist **NICHT-LINEAREN UND ZEITABHÄNGIGEN EFFEKTE** der Mikrostruktur, des Herstellungsprozesses und der Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Feuchte oder UV,) zu berücksichtigen. Das Micro Materials Center zählt zu den ersten Adressen auf dem Gebiet der Werkstoffcharakterisierung und -modellierung für Mikro- und Nanoelektronik und Systemtechnik.