

## Zerstörungsfreie Messmethoden am Hahn-Meitner-Institut

I. Manke, N. Kardjilov, R. Schneider, A. Haibel, A. Denker, A. Rack, A. Hilger und J. Banhart  
Hahn-Meitner-Institut Berlin

*Die Eigenspannungen im Inneren eines mechanischen Bauteils sichtbar zu machen oder die verborgene innere Struktur eines Objekts auf den Mikrometer genau zu studieren, sind nur zwei Beispiele für den Einsatz zerstörungsfreier Messmethoden am Hahn-Meitner-Institut (HMI) in Berlin. Da das HMI neuerdings auch Mitglied der DGZfP ist, sollen an dieser Stelle einige der wichtigsten davon sowie ihre Anwendungsfelder vorgestellt werden.*

Das Hahn-Meitner-Institut in Berlin (HMI) ist ein naturwissenschaftliches Forschungsinstitut, das sich vor allem mit der Erforschung neuartiger Materialien und Materialsysteme befasst (Bild 1).

Das Spektrum reicht von der grundlagen- über die anwendungsorientierte Forschung bis hin zur Prototypenfertigung vorindustrieller Produkte. Das Institut ist in zwei große Bereiche mit den Schwerpunkten Solarenergie und Strukturforschung aufgeteilt.

Im Bereich Solarenergieforschung wird vor allem an der steten Weiterentwicklung und Verbesserung von Technologien zur Umwandlung von Licht in elektrische oder chemische Energie gearbeitet.

Die Arbeiten befassen sich unter anderem mit der Entwicklung von hocheffizienten Dünnschichtsolarellen wie auch mit der Entwicklung neuer Materialkombinationen.

Im Bereich Strukturforschung wird eine große Vielfalt unterschiedlicher Fragestellungen in Bezug auf moderne Materialien und magnetische Phänomene untersucht. Hier kommen auch verschiedene zerstörungsfreie Messmethoden zum Einsatz.

Mit der Neutronen-, Ionen- und Synchrotronstrahlung stehen am HMI drei Sonden für die Materialanalyse zur Verfügung, die sich in hinreichender Qualität nur mit sehr aufwendigen und kostenintensiven Großforschungsanlagen erzeugen lassen.



Bild 1: Eine Experimentierhalle am HMI

Zentrale Einrichtungen des HMI sind dabei der Forschungsreaktor BER II (Bild 2), an dem Neutronenstrahlung erzeugt wird, und die Beschleuniger des IonenstrahlLABs (ISL) zur Erzeugung einer Vielfalt verschiedenartiger

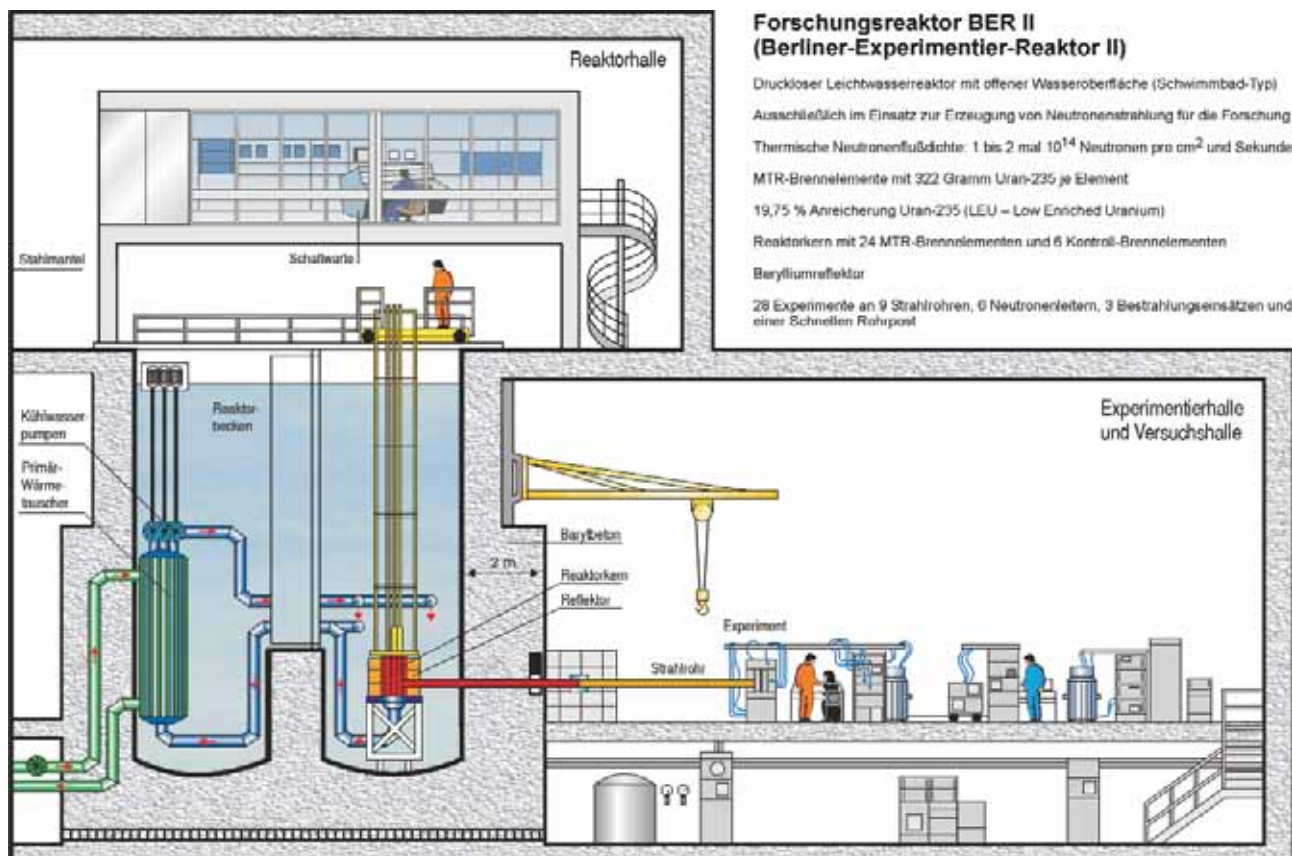


Bild 2: Schema des Forschungsreaktors BER II



Bild 3: Van-de-Graaff-Vorbeschleuniger am ISL



Bild 4: Zyklotron zur weiteren Beschleunigung von Ionen

Ionenstrahlen (Bilder 3 und 4). Schließlich unterhält das HMI noch Messplätze am Berliner Elektronenspeicherring BESSY, wo Synchrotronstrahlung hoher Brillanz zur Verfügung steht.

Das HMI versteht sich insbesondere als Dienstleister für externe Nutzer aus Industrie und Wissenschaft, denen etwa 70 % der Kapazitäten zur Verfügung stehen und die so von den aufwendigen Anlagen profitieren können. Die große Erfahrung der HMI-Mitarbeiter, sich in immer neue Problemstellungen einzuarbeiten, bildet dabei die ideale Grundlage für die Lösung komplexer Probleme, wie sie gerade in der modernen industriellen Forschung und Fertigung vermehrt auftreten.

Im Folgenden soll eine Übersicht über einige der wichtigsten zerstörungsfreien Messmethoden am HMI gegeben werden. Dazu gehören die Eigenspannungsanalyse, tomographische

und radiographische Bildgebungsverfahren sowie Anwendungen mit Ionenstrahlung. Mehrere neue Messplätze wurden erst kürzlich in Betrieb genommen oder befinden sich noch im Aufbau, um die bereits bewährten Einrichtungen zu ergänzen.

### Neutronen- und Synchrotronstrahlung

Insbesondere Neutronen- und Synchrotronstrahlung ergänzen einander in hervorragender Weise. Dies liegt an der völlig verschiedenen Natur beider Strahlenarten.

Da Neutronen, dem Namen entsprechend, elektrisch neutral sind, wechselwirken diese vornehmlich mit den Atomkernen und ignorieren praktisch die Elektronenhüllen. Bei der Synchrotronstrahlung dagegen handelt es sich um elektromagnetische Strahlung, mit einem kontinuierlichen und sehr breiten Energiespektrum (von keV bis zu GeV), die ausschließlich mit den Elektronenhüllen wechselwirkt. Das HMI nutzt dabei vor allem die Synchrotronstrahlung im Energiebereich der Röntgenstrahlung. Der entscheidende Unterschied zu einer herkömmlichen Röntgenquelle ist allerdings die extrem hohe so genannte Brillanz. Darunter versteht man, dass die Strahlung eine sehr hohe Intensität in einem sehr engen Raumwinkelbereich, also eine hohe Parallelität, aufweist. Beides ist ent-

scheidend für die Qualität der hier eingesetzten Messmethoden.

Der grundlegende physikalische Unterschied zwischen Neutronen- und Synchrotronstrahlung führt in der Praxis zu einer sehr unterschiedlichen Abhängigkeit des Abschwächungskoeffizienten vom Material (Bild 5). Während die Röntgenstrahlung ein kontinuierliches Ansteigen des Abschwächungskoeffizienten mit zunehmender Ordnungszahl des Elements aufweist, wird die Neutronenstrahlung vor allem von leichten Elementen, wie Wasserstoff, Lithium und Bor, stark abgeschwächt. Beide Strahlenarten verhalten sich also gewissermaßen komplementär zueinander. Materialien, die für Röntgenstrahlen schwer durchdringbar sind, können von Neutronen in der Regel leicht durchflogen werden und umgekehrt.

Genau genommen ist die Situation bei der Neutronenstrahlung sogar noch komplizierter. So ergeben sich extreme Unterschiede zwischen einzelnen Isotopen. Während der „normale“ Wasserstoff  $^1\text{H}$  stark abgeschwächt, ist Deuterium  $^2\text{H}$  nahezu durchsichtig.

### Radiographie und Tomographie

Tief in das Innere eines Bauteils oder Materials hinein zu schauen und dessen Beschaffenheit zu untersuchen ohne es aufschneiden zu müssen, ist das Einsatzgebiet der Radiographie und Tomographie.

Bei der Radiographie wird ein Objekt durchstrahlt und dabei eine Projektion erzeugt, die die Stärke der Absorption an verschiedenen Stellen abhängig von der Materialdicke und -art widerspiegelt, wie beim bekannten Röntgenbild in der Medizin.

Im Prinzip kann dazu jede beliebige Strahlenart verwendet werden, so lange diese das Objekt durchdringen kann und gleichzeitig zu einem Teil von ihm abgeschwächt wird, so dass ein kontrastreiches Bild entsteht. Für praktische Anwendungen werden diese beiden Bedingungen zumeist nur von Röntgen- und Neutronenstrahlung erfüllt.

Ein typisches Beispiel für den Einsatz konventioneller Röntgen-Radiographie am HMI zeigt Bild 6, in dem der Schäumungsprozess eines Metalls, vergleichbar mit dem Aufgehen eines Hefeteigs beim Backen, zu sehen ist.

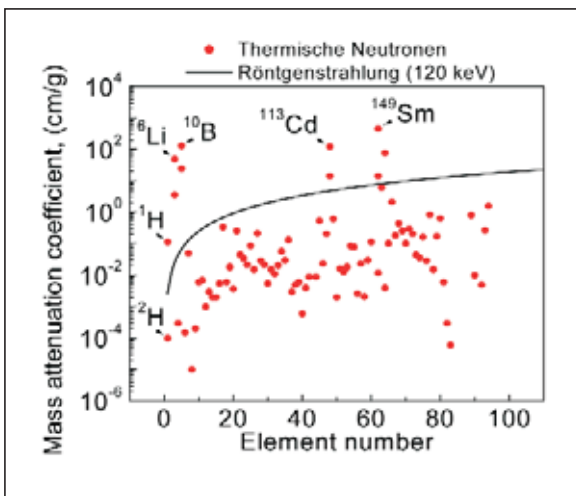


Bild 5: Abschwächungskoeffizienten von Röntgen- und Neutronenstrahlung in Abhängigkeit von der Ordnungszahl des Elements

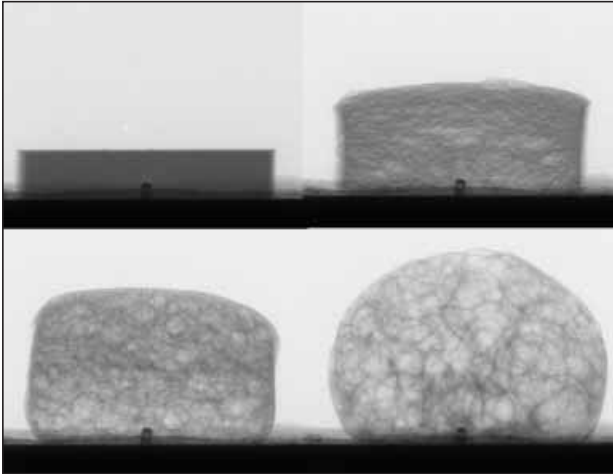


Bild 6: Echtzeitradiographie des Schäumungsprozesses eines Metalls [1]

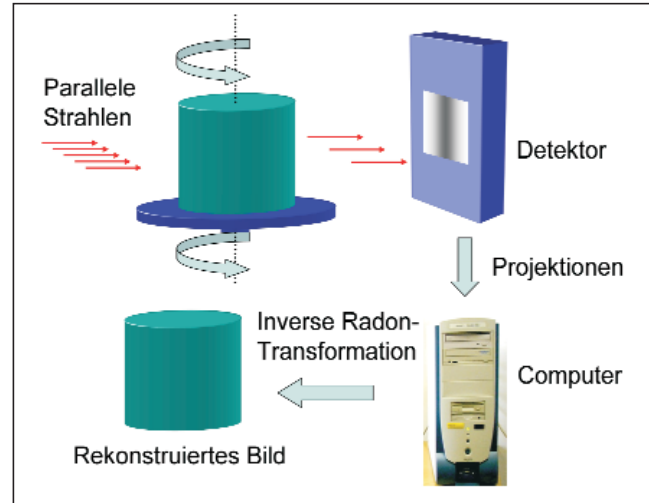


Bild 7: Prinzip der Tomographie

### Prinzip der Tomographie

Noch mehr Informationen als bei der Radiographie erhält man mit der Tomographie, bei der ein dreidimensionales Bild des gesamten Innenbereichs eines Objekts erzeugt wird [2].

Zur Erstellung eines Tomogramms wird das Objekt zunächst auf einem drehbaren Tisch montiert und schrittweise gedreht. Für jede Winkelposition wird dabei jeweils ein Radiogramm erstellt, bis ein Winkelbereich von 180° bzw. 360° abgedeckt ist (Bild 7).

Zumeist sind mehrere hundert bis über tausend Einzelbilder nötig. Dies dauert etwa zwischen einer halben und einigen Stunden und erzeugt abhängig von der gewünschten Auflösung Datenmengen von mehreren Gigabyte.

Um daraus ein dreidimensionales Tomogramm zu erzeugen, kann auf unterschiedliche mathematische Verfahren zurückgegriffen werden. Zumeist werden dabei mittels inverser Radon-Transformation die einzelnen Schnittebenen des Objekts zurückgerechnet und dann zu einem 3D-Bild zusammengesetzt [3].

Aufgrund der enormen Datenmengen sind neben einer effizienten Software-Implementierung auch entsprechend leistungsstarke Computer nötig, um die Rechenzeit in Grenzen zu halten.

Die weitere Verbesserung dieser Algorithmen ist auch heute noch Gegenstand der mathematischen Forschung.

Das rekonstruierte 3D-Bild, das Tomogramm, stellt dabei die räumliche Ver-

teilung des lokalen Abschwächungsfaktors innerhalb des untersuchten Objekts dar. Je nach Materialart und Materialdichte ist dieser Faktor entsprechend größer oder kleiner.

Man erhält so ein vollständiges, dreidimensionales Bild der gesamten inneren Struktur.

Dieses virtuelle Abbild lässt sich nun mit entsprechender Software visualisieren und nach Belieben im virtuellen Raum zerschneiden, auseinander nehmen oder auf strukturelle oder chemische Veränderungen untersuchen, ganz so als hätte man das reale Objekt vor sich.

Da letzteres unbeschädigt bleibt, lässt es sich seinem Verwendungszweck entsprechend weiterverwenden und danach jederzeit wieder untersuchen. Auf diese Weise können zeitliche Veränderungen bestimmt werden, wie sie durch Nutzung oder Beanspruchung eines Bauteils/Materials entstehen. Das können z.B. die Entwicklung eines Risses, einer Deformation oder eines chemischen Prozesses oder auch der Transport von festen oder flüssigen Stoffen innerhalb des Objekts sein.

Aufgrund der großen Unterschiede zwischen der Synchrotron- und der Neutronentomographie werden diese im Folgenden getrennt dargestellt.

### Tomographie und Radiographie mit Synchrotronstrahlung

Die Synchrotron-Tomographie konnte durch die technischen Verbesserungen der letzten Jahre zunehmend an Be-

deutung gewinnen und neue Maßstäbe bei der Detailtreue und Wiedergabequalität setzen.

Das HMI nutzt am BESSY als Kooperationspartner der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) eine Anlage zur Synchrotrontomographie und -radiographie für ein breites Spektrum an Anwendungen. Aufgrund der hohen Brillanz der Strahlung (s. oben) ist eine sehr hohe räumliche Auflösung möglich. Diese beträgt zurzeit in der höchsten Einstellung 3,5 µm. Eine Erweiterung für Auflösungen von 1 µm befindet sich in Vorbereitung.

Neben der hohen räumlichen Auflösung ergeben sich noch weitere Vorteile gegenüber der herkömmlichen Röntgentomographie:

- Die sehr hohe Intensität liefert sehr rauscharme Bilder in relativ kurzer Zeit.
- Da die Synchrotronstrahlung über einen weiten Energiebereich kontinuierlich ist, kann der Strahl bei unterschiedlichen Energien monochromatisiert werden, was es erlaubt, auch die Elementzusammensetzung räumlich aufgelöst zu bestimmen.
- Die Energie der Strahlung kann variiert werden, was eine gezielte Anpassung an die unterschiedlichen Abschwächungskoeffizienten der untersuchten Objekte ermöglicht.

Das Anwendungsfeld der Synchrotrontomographie ist sehr vielfältig und reicht von der rein strukturellen (z.B. Risse, Hohlräume, Einschlüsse in ei-

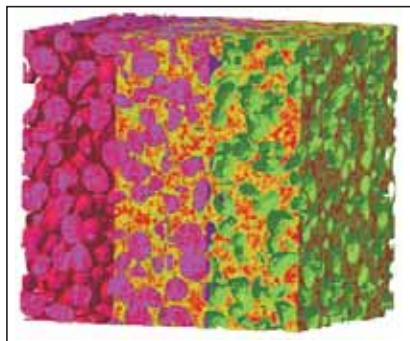


Bild 8: Tomogramm eines Aluminiumschaums. Im linken Bereich sind nur die Hohlräume, im rechten nur das Aluminium und im mittleren Bereich beides dargestellt

nem Material) bis hin zur chemischen Analyse (z.B. Verteilung unterschiedlicher chemischer Bestandteile). Im Folgenden sollen hierfür einige Beispiele gezeigt werden.

Bild 8 zeigt einen Metallschaum, bei dem sich je nach Wunsch entweder nur die Poren oder nur die Umrandungen sichtbar machen lassen [4,5].

Als Beispiel für die Separation einzelner chemischer Bestandteile ist in Bild 9 ein Ausschnitt aus einem Metallblock zu sehen, in dem das Wirtsmaterial transparent geschaltet wurde, um die Verteilung darin enthaltener Einlagerungen aus  $TiH_2$  und SiC zu untersuchen.

Für mikroelektronische Komponenten wie in Bild 10 ist es oft von Bedeutung herauszufinden, ob eine elektrische Leitung unterbrochen ist oder wie bestimmte Materialien, wie z.B. Bleilot, an den Kontaktstellen verteilt sind. Dabei ist die hohe räumliche Auflösung von großem Nutzen. Dies gilt im gleichen Maße für den in Bild 11 dargestellten Papierkondensator, bei dem die einzelnen Schichten räumlich sehr detailliert aufgelöst sind und z.B. auf ihre Fehlerfreiheit untersucht werden können.

Oftmals entwickeln sich im Material kleine Risse an verschiedenen Stellen im Volumen. Für die Qualitätsprüfung von Bauteilen ist daher das Aufspüren und die zeitliche Analyse der Entwicklung solcher Risse im Materialinneren von großer Bedeutung (Bild 12).

Ein klassisches Einsatzfeld der Tomographie ist seit langem auch der Bereich der biologischen Materialien. Bei dem in Bild 13 dargestellten Gewebe

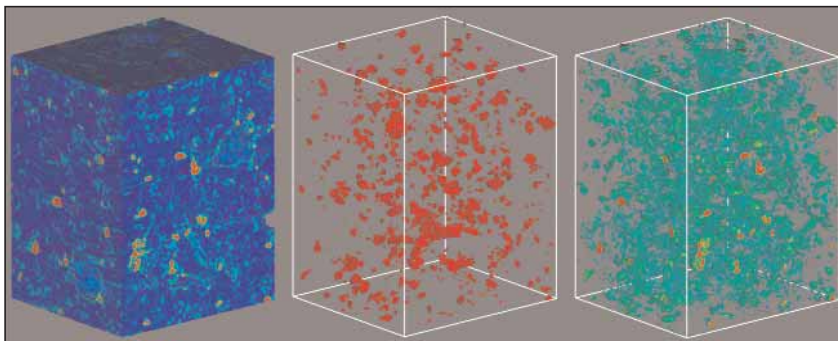


Bild 9: Tomogramm einer Aluminiumlegierung mit eingebetteten SiC- und  $TiH_2$ -Partikeln. Das linke Bild zeigt die Gesamtdarstellung. Im mittleren sind nur die SiC-Partikel zu sehen und im rechten sind nur die  $TiH_2$ -Partikel zu sehen

einer Maus ist vor allem die Zink-Verteilung von Interesse [6].

### Tomographie und Radiographie mit Neutronen

Die große Eindringtiefe von Neutronen in vielen Materialien, insbesondere auch in den meisten Metallen, eröffnen der Neutronentomographie und -radiographie ein weites Feld an Anwendungen gerade im Bereich industriell gefertigter Produkte.

Am Hahn-Meitner-Institut in Berlin steht dazu eine neu entwickelte Anlage mit extrem hohem Neutronenfluss zur Verfügung. Die hohe Intensität der Neutronenstrahlung wird durch eine hochwertige „kalte“ Quelle in Verbindung mit einem Neutronenleiter am Forschungsreaktor BER II ermöglicht und beträgt  $3 \cdot 10^9$  Neutronen pro Quadratcentimeter und Sekunde. Darüber hinaus handelt es sich hierbei um so genannte kalte, d.h. niederenergetische, Neutronen, die einen besonders hohen Kontrast zwischen verschiedenen Materialien erzeugen [7].

So können die Neutronen selbst zentimeterdicke Metallteile durchdringen und gleichzeitig sehr empfindlich auf die Anwesenheit darin enthaltener bestimmter leichter Elemente, wie z.B. Wasserstoff oder Lithium, reagieren (s. Bild 5). Insbesondere Materialien und Substanzen, die Wasserstoff enthalten, heben sich entsprechend gut von einer Umgebung aus einem weniger stark abschwächenden Material wie Metall ab.

Zu diesen gehört eine große Zahl von industriell wichtigen Materialien, wie zum Beispiel:

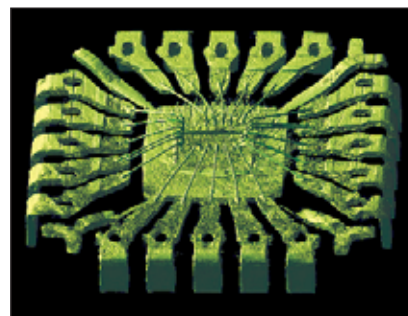


Bild 10: Tomogramm eines Mikrochips

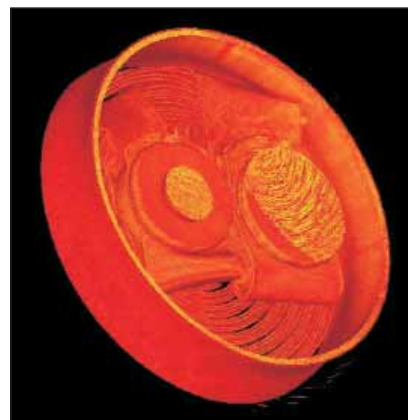


Bild 11: Kondensator mit Wicklungen aus Papier

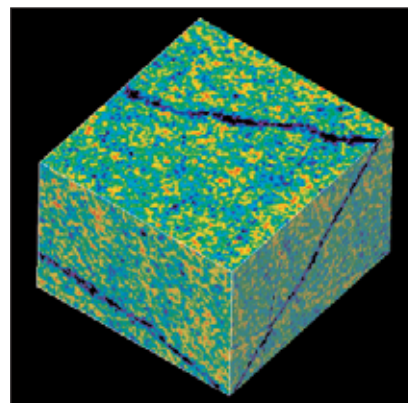


Bild 12: Dreidimensionaler Verlauf eines Risses in einem Material

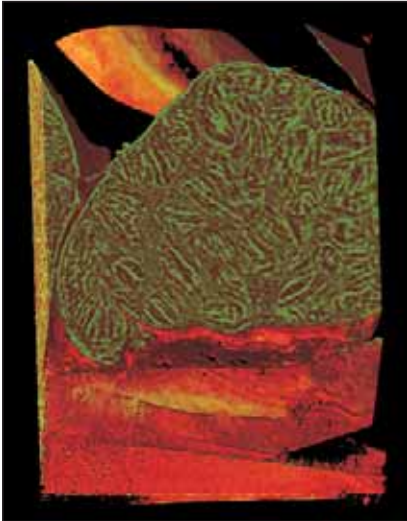


Bild 13: Biologisches Gewebe einer Maus [6]

- Öle und Schmiermittel
- Treibstoffe
- Lacke
- Klebstoffe
- Biologisches Material
- Wasser etc.

In speziellen Fällen können durch Austausch von Wasserstoff durch das Isotop Deuterium bei der Herstellung (z.B. Tausch von leichtem gegen schweres Wasser) gezielt die extrem unterschiedlichen Abschwächungskoeffizienten der beiden Isotope zur Analyse genutzt werden.

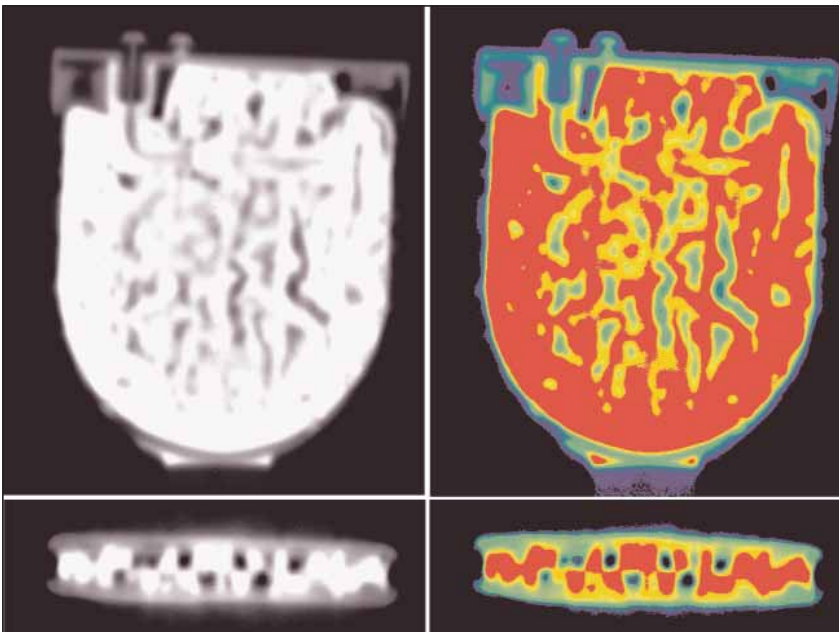


Bild 14: a) und b): Querschnitte durch das Tomogramm einer Lithium-Batterie. Hell sind die Bereiche mit großem Abschwächungskoeffizienten dargestellt und dunkel die mit kleinem. Daneben sind dieselben Bilder mit Falschfarben zu sehen

Auch Lithium gehört zu den Elementen mit großem Abschwächungskoeffizienten.

In den Bildern 14 und 15 sind Ausschnitte eines Neutronentomogramms einer Li-Batterie zu sehen. Das Lithium ist sehr gut von den restlichen Inhaltsstoffen sowie von dem Gehäuse trennbar, weil das im natürlich vorkommenden Lithium zu etwa 7,5 % enthaltene Isotop Li-6 sehr stark Neutronen absorbiert, während die anderen Materialien in der Batterie deutlich kleinere Abschwächungskoeffizienten aufweisen. So lässt sich die Verteilung des Lithiums in dieser zum Teil verbrauchten Batterie analysieren.

Bild 14 stellt dabei ein typisches Falschfarbenbild dar, bei dem jedem Bereich mit einem bestimmten Abschwächungskoeffizienten eine Farbe zugewiesen wird. Dieselbe Batterie ist in Bild 15 noch einmal dreidimensional dargestellt.

Einige weitere Beispiele aus der Vielfalt an Anwendungsmöglichkeiten der Neutronentomographie sind:

- die Visualisierung von Rissen und Hohlräumen in einem Material
- die Prüfung der Qualität von Schweißnähten
- die Materialsegmentierung in Objekten aus Metallen und Kunststoffen

- Untersuchung der dreidimensionalen Verteilung eines Klebstoffs an einer Klebestelle
- die Qualitätskontrolle von Lack-schichten, Ölen etc.

Anwendungsbeispiele für zeitlich veränderliche Prozesse sind:

- die Öl-Verteilung in einem Motor oder einer Pumpe abhängig von der Betriebsdauer
- Diffusion von Wasser im Mauerwerk, in einer Wasserstoff-Zelle oder in einem Schwamm
- Wassertransport in biologischen Materialien
- chemische Veränderungen in einem Bauteil bei Gebrauch etc.

#### Radiographie und Tomographie mittels Stroboskopie

Mit der ebenfalls neu installierten Anlage für stroboskopische Radiographie/Tomographie lassen sich, dank

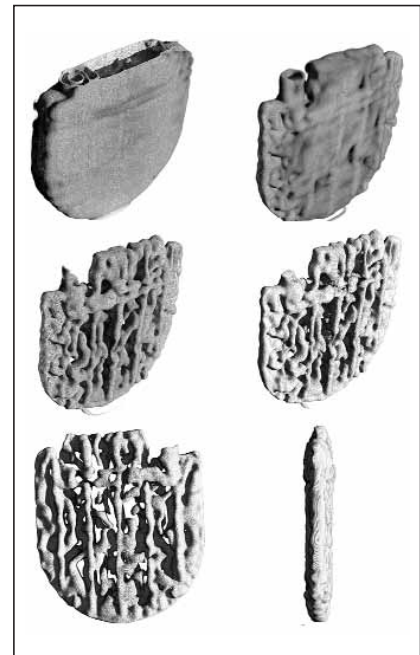


Bild 15: Separation einzelner Bereiche und chemischer Spezies im Neutronentomogramm einer Li-Batterie. Es werden nur Bereiche mit einem bestimmten Abschwächungskoeffizienten dargestellt, beginnend mit kleinem Koeffizienten im Bild links oben. Die anderen Bereiche sind jeweils transparent gestellt. So ist im ersten Bild nur die Außenhülle aus Metall mit kleinem Abschwächungskoeffizienten zu sehen und in den letzten Bildern nur das Lithium im Innenbereich, welches sehr stark absorbiert. Zusätzlich sind ganz unten noch zwei Bilder aus verschiedenen Blickwinkeln gezeigt

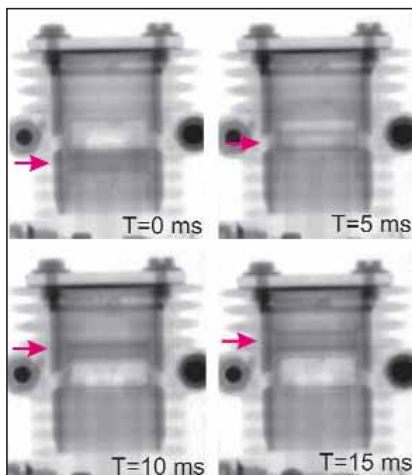


Bild 16: Stroboskopische Radiographie eines Modellflugzeugmotors bei 550 Umdrehungen pro Minute. Vier verschiedene Phasen für die Stellung des Kolbens sind dargestellt

des hohen Neutronenflusses, auch zeitlich schnell ablaufende Prozesse, wie z.B. ein laufender Motor, untersuchen. Als Beispiel dazu sind in Bild 16 die Radiogramme eines einzylindrigen Modellflugzeugmotors dargestellt. Durch Phasenabgleich wurden jeweils zu einer bestimmten Stellung des Motorkolbens Bilder gemessen und aufaddiert. So lässt sich die Bewegung des Kolbens im Motor und z.B. auch der Einspritzvorgang für den Treibstoff analysieren [8].

### Phasen-Kontrast-Tomographie

Eine Möglichkeit, den Kontrast in einem Tomogramm zu erhöhen, ist die Phasenkontrast-Tomographie, bei der Interferenz-Effekte an den Kanten bei

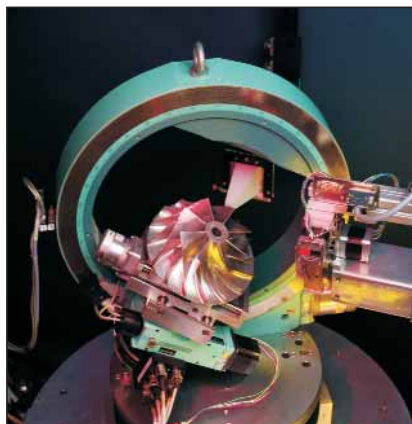


Bild 17: Verdichterrad auf dem Messstand. Neutronen können Werkstoffe bis zu einer Dicke von mehreren Zentimetern durchdringen und ermöglichen damit die Analyse von Spannungszuständen tief unterhalb der Bauteiloberfläche

### Synchrotrontomographie - Technische Parameter:

- Doppelmultilayer-Monochromator mit:
  - 150 W/Si-Schichten ( $d = 2,8 \text{ nm}$ )
  - einer Energieauflösung von ca.  $10^{-2}$
- Photonenflussdichte: bis  $10^{12}$  Photonen/( $\text{mm}^2\text{s}$ )
- Röntgenenergien: 6 - 60 keV
- Auflösung: bis zu  $3,5 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m}$  in Vorbereitung)
- Probendimension hängt von der Auflösung ab:
  - 6 mm im Querschnitt bei  $3,5 \mu\text{m}$  Auflösung
  - 12mm im Querschnitt bei  $7,5 \mu\text{m}$  Auflösung

### Neutronentomographie - Technische Parameter:

- Neutronenflussdichte:  $3 \cdot 10^9$  Neutronen/( $\text{cm}^2\text{s}$ )
- Auflösung: z. Z.:  $250 \mu\text{m}$ , in Vorbereitung:  $100 \mu\text{m}$
- Max. Probengröße: z. Z.:  $2,5 \times 2,5 \times 5 \text{ cm}^3$ , in Vorbereitung:  $8 \times 8 \times 20 \text{ cm}^3$

Verwendung kohärenter Synchrotron- oder Neutronenstrahlung genutzt werden. So sind noch filigrane Strukturen erkennbar, die sonst mangels Kontrast mit der Umgebung verschwimmen würden [9].

### Zerstörungsfreie Analyse von Eigenspannungen mit Diffraktometrie

Eine Methode, die insbesondere von der Automobil-, Luftfahrt- und Energiewirtschaft stark nachgefragt wird, ist die diffraktometrische Eigenspannungsanalyse (Bild 17).

Bei der Herstellung von mechanischen Bauteilen, wie Zahnrädern, Kurbelwellen oder Turbinenschaufeln, werden immer höhere Ansprüche an deren Eigenschaften, etwa die mechanische Belastbarkeit, gestellt. Diese Eigenschaften werden dabei sehr stark von dem eingesetzten Material und seiner Vorgeschichte bestimmt. Durch Produktionsprozesse, Materialbearbeitung



Bild 18: Auch schwere Bauteile, wie dieses etwa 250 kg schwere Verdichterrad eines Schiffsdiesels, lassen sich auf einem speziellen Messstand untersuchen

und thermische Belastungen entstehen innere Spannungen im Werkstoff, so genannte Eigenspannungen, die unter anderem für die Lebensdauer eines Bauteils entscheidend sind. Aus diesem Grund ist deren genaue Kenntnis von höchster Bedeutung für die Qualitätssicherung und Betriebssicherheit sowie die Leistungsfähigkeit der Bauteile.

Mit Hilfe der diffraktometrischen Methoden ist es möglich, orts aufgelöst die Verteilung der Eigenspannungen zu analysieren. Am HMI kommen dabei sowohl Neutronen-, wie auch Röntgen- und Synchrotronstrahlung zum Einsatz.

Das Prinzip der Eigenspannungsanalyse beruht auf der Beugung der verschiedenen Strahlungsarten am Kristallgitter des Werkstoffs. Durch entsprechende Blendsysteme wird dabei die gewünschte Ortsauflösung erzielt. Mit einer Positionierungseinrichtung werden die zu untersuchenden Proben verschoben und so zeilenweise abgerastert (s. Bild 17).

Aus den Beugungswinkeln der Neutronen- oder Röntgenstrahlung lässt sich mit großer Präzision die Gitterkonstante, also der Abstand zwischen den Atomen, im Material bestimmen. Innere Spannungen führen dabei zu geringfügigen Abweichungen. Aus diesen lässt sich dann bei Verwendung diverser Materialparameter über das Hook'sche Gesetz die dreidimensionale Verteilung der inneren Spannungen berechnen.

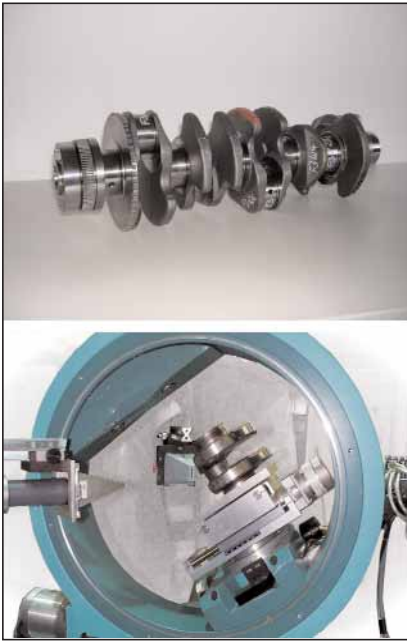


Bild 19: Oben: 50 g dieser etwa 25 kg schweren Kurbelwelle sind für ihre Lebensdauer verantwortlich. Unten: Kurbelwelle in der Messvorrichtung

Mit Neutronenstrahlung ist es möglich, die Eigenspannungen bei Stählen bis zu mehreren Zentimetern tief unterhalb der Oberfläche zu analysieren. Bei Aluminiumlegierungen sind es sogar 10 cm. Am Neutronenstreuzentrum des HMI befinden sich Messanlagen, mit denen Komponenten mit bis zu 300 kg Gewicht und Abmessungen von einem Meter im Durchmesser exakt positioniert und geprüft werden können (Bild 18). Es ist auch möglich, Bauelemente unter Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur, Belastung, Atmosphäre etc. zu untersuchen, die den realen Betriebsbedingungen entsprechen.

Aufgrund der zumeist sehr viel geringeren Eindringtiefe von Röntgenstrahlen in Metallen, die nur etwa einige hundert Mikrometer, je nach der Energie, beträgt, lassen sich gerade die Eigenspannungen an Oberflächen damit besonders gut bestimmen, in hervorragender Ergänzung zu der Neutronenstrahlung. Dies ist oft von großem Interesse, weil gerade die Randbereiche eines Bauteils während des betrieblichen Einsatzes besonders hoch belastet werden. Durch eine geeignete Oberflächenbehandlung, wie dem Kugelstrahlen oder Schleifen, dem Einsatzhärten oder Beschichten, lassen sich die Eigenschaften einer

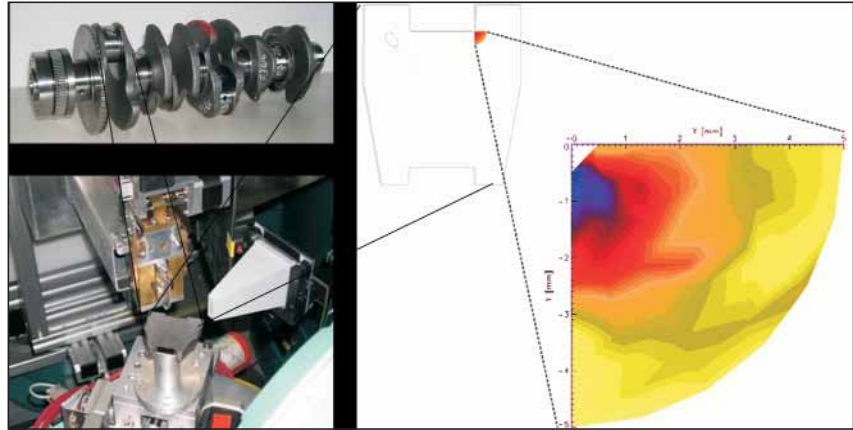


Bild 20: Sicherheitsrelevante kritische Kantenzone der Kurbelwelle aus Bild 19. Rechts ist die Verteilung der Eigenspannungen im Kantenbereich gezeigt

Oberfläche, z.B. hinsichtlich ihrer Härte oder Verschleißfestigkeit, entscheidend verbessern. So kann aber auch direkt auf die Eigenspannungen im Material Einfluss genommen werden und etwa einer möglichen Rissentwicklung gezielt entgegengewirkt werden.

Ein Beispiel hierfür ist die in Bild 19 dargestellte Kurbelwelle. Hier sind nur 50 g Material an der Oberfläche entscheidend für die Lebensdauer dieses 25 kg schweren Bauteils. Durch spezielle Bearbeitungsprozesse wurden hier Druckspannungen eingebracht, welche die Ausbreitung von Mikrorissen an den am stärksten beanspruchten Zonen verhindern (Bild 20).

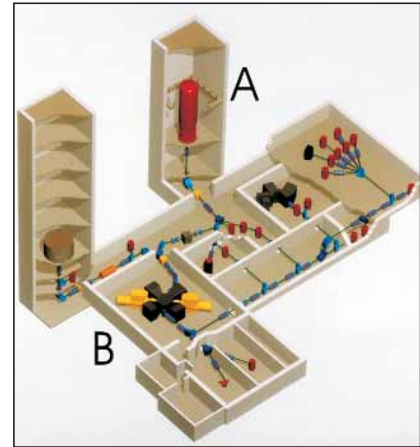


Bild 21: Das ISL-Labor am HMI: (A) Van-de-Graaff-Injektor, (B) Zyklotron.

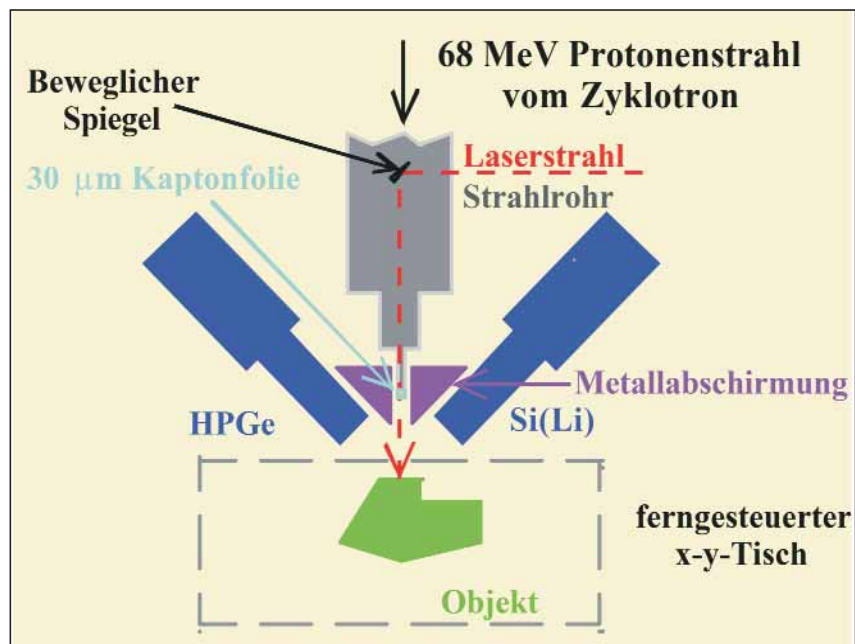


Bild 22: Prinzip der induzierten Röntgenemission mit hochenergetischen Protonen (PIXE)

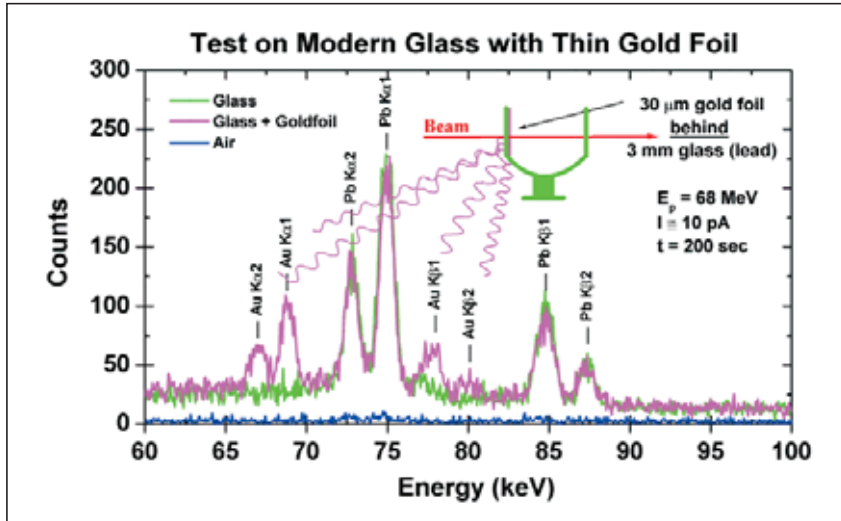


Bild 23: Typisches Hochenergie-PIXE-Spektrum. Im Spektrum sind die charakteristischen Röntgenlinien einer 30 μm dünnen Goldfolie (pink) selbst hinter 3 mm Bleiglas (grün) deutlich zu sehen



Bild 24: Eine 3600 Jahre alte ägyptische Sargmaske während der Hochenergie-PIXE-Untersuchung

Diffraktometrische Eigenspannungsanalysen mit Neutronen sind bei der Mehrzahl der industriell eingesetzten Werkstoffe wie Metallen, Legierungen, Keramiken sowie Kompositmaterialien möglich.

Es gibt nur wenige technische Materialien, die für die Neutronenprüfung wenig oder gar nicht geeignet sind. Hierzu zählen amorphe Materialien, wie nichtkristalline Gläser sowie Werkstoffe, die sehr stark absorbierende chemische Elemente enthalten.

### Ionenstrahlanalytik

Das Ionenstrahllabor ISL des HMI betreut und entwickelt modernste Ionenstrahltechniken, die sowohl internen als auch externen Nutzern zur Verfügung stehen. Die vom ISL betriebenen Beschleuniger und Ionenquellen sind speziell ausgebaut und zusammengestellt, um die verschiedenen Anwendungsgebiete optimal abzudecken (Bild 21).

Eine der zerstörungsfreien Messmethoden hier ist die Induzierte Röntgenemission mit hochenergetischen Protonen (PIXE). Dabei werden Objekte mit hochenergetischen Ionen bestrahlt und dadurch Atome zur Aussendung charakteristischer Röntgenstrahlung angeregt (Bilder 22 und 23).

Eine Besonderheit am ISL ist die Verwendung von Protonen mit einer Energie von 68 MeV, wodurch insbesondere schwere Elemente in sehr tiefen Schichten nachgewiesen werden können. Aufgrund der hohen Anregungswahrscheinlichkeit wird nur ein sehr geringer Strahlstrom, typischerweise 0,1 pA (Pico-Ampere) benötigt. Die geringe Strahlenbelastung und die Messung an Luft machen Hochenergie-PIXE zu einer zerstörungsfreien Analyseverfahren, die sich für empfindliche, wertvolle oder einzigartige Gegenstände eignet. Dazu gehören z.B. kunsthistorische Objekte, wie Gemälde oder die in Bild 24 gezeigte Pharaomask [10,11].

Die nebenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die am ISL eingesetzten Ionenstrahlanalysen und ihre Eigenschaften.

### Strahlenhärte tests

Die Zuverlässigkeit moderner industrieller Bauelemente hängt im steigen-

	ERDA	RBS	PIXE
Empfindlichkeit	Einige ppm für Wasserstoff, 10 ppm für andere Elemente, abhängig von Probenstruktur	Einige ppm für schwerste Elemente in leichter Matrix, abnehmend auf 0,1% für leichte Elemente	0,1% bis einige ppm, abhängig vom nachzuweisenden Element und der Probe
Tiefenaufösung	10 nm im oberflächennahen Bereich	10 nm im oberflächennahen Bereich	10 μm
Max. Analysetiefe	2 μm, abhängig vom Material	2 μm, abhängig vom Material	Bis einige cm
Elemente	Alle	Z > 10 für Schwerionen-RBS	Z > 15



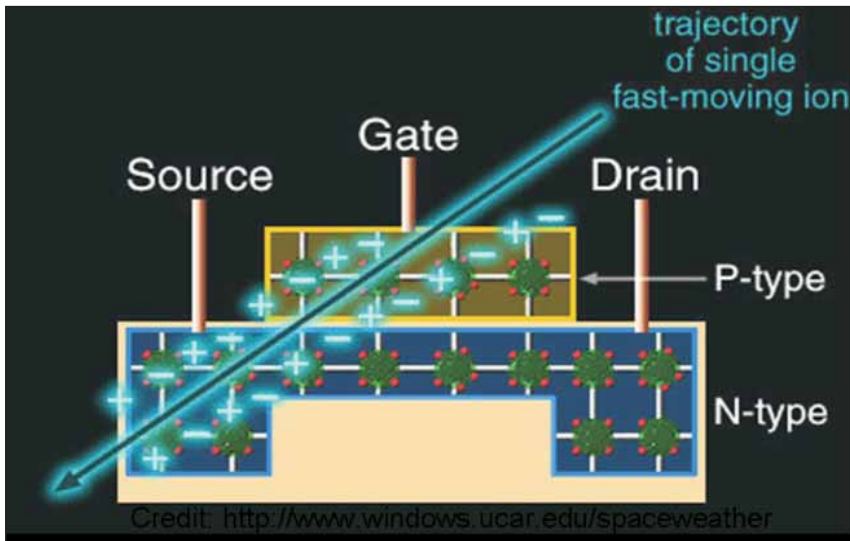


Bild 25: Einschlag eines Ions in ein mikroelektronisches Bauteil (Graphik aus „Windows to the Universe“, University Corporation for Atmospheric Research, [www.windows.ucar.edu](http://www.windows.ucar.edu))

den Maße von der Störanfälligkeit der mittlerweile nahezu allgegenwärtigen Mikroelektronik ab.

Deren zunehmende Komplexität führt auch zu einer zunehmenden Empfindlichkeit gegenüber einer Vielzahl äußerer Störungen. Dazu gehören auch Einschläge hochenergetischer Ionen, welche zu Fehlfunktionen oder gar dem völligen Ausfall einzelner elektronischer oder optischer Bauteile führen können (Bild 25).

Dies betrifft zum Teil alltägliche Gebrauchsgüter, wie z.B. die Leistungsnetzteile in ICE-Zügen, ganz besonders allerdings Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, da hochenergetische Ionen vor allem in den höher gelegenen atmosphärischen Schichten sowie im Weltraum vorkommen, weil sie Bestandteil der Kosmischen Strahlung, des Sonnenwindes und des Strahlungsgürtels der Erde sind.

Außerdem werden gerade hier sehr hohe Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit gestellt.

Auch in Bereichen erhöhter Ionenstrahlung, wie in medizinischen Einrichtungen oder Forschungsanlagen, ist die Betriebssicherheit ein wesentliches Kriterium.

Um elektronische oder optische Bauteile zu testen, werden sie gezielt unter Einsatzbedingungen mit Ionen der zu erwartenden Dosis und Energie beschossen und parallel dazu auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft (Bild 26).

### Schlusswort

Dieser Artikel soll nur einen kurzen Einblick in die Vielfalt an Möglichkeiten im Bereich der zerstörungsfreien Messmethoden am HMI geben. Diese Methoden stehen dabei auch ganz ausdrücklich externen Interessenten zur Verfügung.

Speziell zur Förderung von Kooperationen mit Partnern aus Industrie und Wirtschaft wurden unter dem Namen NIXE (Neutrons, Ions and X-rays for Engineering) unter anderem die hier gezeigten Methoden zu einem gebündelten Angebot zusammengefasst. So erhält jeder Interessent einen direkten Ansprechpartner, der ihn umfassend betreut und innerhalb des Instituts weitervermittelt. Weitere Informationen:

[www.hmi.de](http://www.hmi.de)  
[www.hmi.de/nixe](http://www.hmi.de/nixe)

### Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen ganz herzlich bedanken, die zu diesem Artikel beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt dabei Dr. Paul Piwnicki und Thomas Robertson für zahlreiche Verbesserungsvorschläge sowie Dr. Francisco Garcia Moreno, Markus Kühbacher und Prof. Dr. Wolfgang Treimer für ihre wertvollen wissenschaftlichen Beiträge.

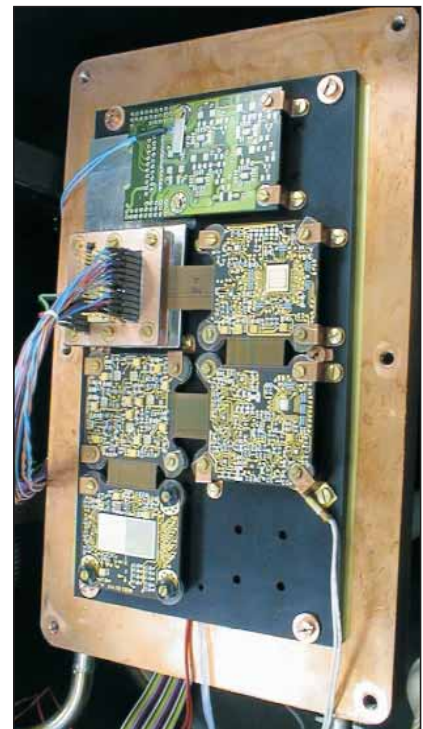


Bild 26: Moses Detektorelektronik des DLR Instituts für Weltraumsensorik und Planetenerkundung (Berlin), die vor dem Einsatz bei der Rosetta-Mission mit Protonen bestrahlt wurde (A. Denker)

### Literatur:

- [1] F. García Moreno, M. Fromme, and J. Banhart, *Real-time X-ray radioscopy on metallic foams using a compact micro-focus source*, Cellular Metals: Manufacture, Properties, Applications, International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam 2003), p. 89 - 94
- [2] A.C. Kak, M. Slaney, *Principals of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, New York, 1987
- [3] G. T. Herman, *Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography*, Academic Press, New York, 1980.
- [4] A. Haibel, J. Banhart, *Synchrotron Tomography on Metallic Foams*, Proceedings of the International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology (2003)

- [5] A. Rack, A. Haibel, B. Matijasevic and J. Banhart, *Synchrotron-Tomography on zinc and aluminium foams* Cellular Metals, Proceedings of the 3rd International conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam 2003)
- [6] M. Kühbacher: *Untersuchungen zur Identifizierung von metall- und metalloidhaltigen Proteinen im zentralen Nervensystem und männlichen Reproduktionssystem durch Kombination von elementanalytischen und biochemischen Verfahren*, Dissertation, Freie Universität Berlin, 2004.
- [7] N. Kardjilov, *Further developments and applications of radiography and tomography with thermal and cold neutrons*, Dissertationsschrift (2003), <http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/ph/2003/kardjilov.pdf>
- [8] A. Hilger, N. Kardjilov, I. Manke, *High flux neutron tomography investigation of a LiJ-battery*, BENSX Experimental Report (2003)
- [9] N. Kardjilov, E. Lehmann, E. Steichele, P. Vontobel, *Phase-contrast radiography with a polychromatic neutron beam*, to be published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A
- [10] A. Denker, K. H. Maier, *High Energy PIXE using 68 MeV Protons*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 150, (1999), p. 118-123
- [11] A. Denker, M.C. Blaich, *PIXE analysis of Middle Age objects using 68 MeV protons*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 189 (2002), p. 315-319

Der Verfasser:



Dr. Ingo Manke studierte Physik an der Freien Universität Berlin.

Anschließend arbeitete er an der Technischen Universität Berlin an

der Entwicklung von Rastersondenverfahren zur Analyse von Nanostrukturen sowie mit Anwendungen der Synchrotronstrahlung.

Nach Abschluss seiner Promotion in Experimentalphysik im Jahr 2002 schloss sich ein Aufenthalt am Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration an.

Seit Mai 2003 ist er im Bereich Technologietransfer an der TU Berlin und am Hahn-Meitner-Institut tätig.