Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 97 (2006)
Heft: 11

Artikel: Neutronen-Imaging
Autor: Lehmann, Eberhard H. / Dangendorf, Volker
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857690

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neutronen-Imaging

Eine Alternative zum normalen Röntgen

Das Röntgen hat sich in der Medizin etabliert und wird zunehmend in der Elektronikfertigung eingesetzt. Die Röntgenstrahlen werden aber durch Metall absorbiert und zeigen Wasser kaum an. Wer also das Wasser in einer Brennstoffzelle oder das Schmieröl im laufenden Motor untersuchen will, braucht eine Alternative. Dies könnte die Neutronenradiografie sein: Neutronen durchdringen Metall und zeigen die Verteilung von Feuchte, Klebstoff und anderen organischen Substanzen mit einem hohen Kontrast.

Der Traum, in massive Objekte hineinzusehen und ihre inneren Strukturen zu erkunden, machte Wilhelm Conrad Röntgen mit der Entdeckung der nach ihm benannten Strahlung möglich. Dies gilt besonders für den menschlichen Körper – das medizinische Röntgen zählt bis heute zu den wichtigsten Diagnosemethoden. Grössere Mengen Metall überfordern aber die Röntgenstrahlen, sie werden

Eberhard H. Lehmann,
Volker Dangendorf

abgeblockt. Hier bieten sich Neutronenstrahlen an: Sie durchdringen Metall und bilden organische, insbesondere wasserstoffhaltige Materialien in geringen Mengen ab. Ein typisches Beispiel ist die Inspektion eines dünnen Klebefilmes innerhalb einer Metallkonstruktion (Bild 1).

Dieser Artikel beschreibt in anschaulicher Form die Methode der Neutronenradiografie (Neudeutsch: Neutronen-Imaging), die an verschiedenen Orten in Europa etabliert ist und für interessierte Nutzer bereitsteht.[1)]

Woher kommen die Neutronen?

Obwohl ein Grossteil der Materie aus Neutronen besteht (mehr als die Hälfte jedes Atomkerns), sind freie Neutronen selten. Denn nur Kernreaktionen befreien sie aus dem Verband des Atomkerns, entweder Kernspaltungen oder so genannte Spallationen (durch den Beschuss energiereicher Teilchen). Den Prozess der Kernspaltung entdeckten Hahn und Meitner 1938, was in der Folge leider direkt zu kriegerischen Anwendungen führte: den Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki.

Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts begannen die Forscher, die Kernspaltung für die Erzeugung freier Neutronen zu nutzen. Forschungsreaktoren liefern seither Neutronenstrahlen, womit Material untersucht (Neutronenstreuung, Aktivierungsanalytik) und sogar behandelt wird (Isotopenproduktion, Siliziumdotierung). Der Bauboom von Forschungsreaktoren in den 60er- und 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts ist inzwischen Vergangenheit, und nur noch die leistungsfähigsten Anlagen werden – mit grossem Erfolg – betrieben. Die neueste dieser Grossanlagen, die Forschungsneutronenquelle «Meier-Leibnitz» FRM-2 in München/Garching, ging 2005 in Betrieb und lädt seither Forscher aus aller Welt für gezielte Untersuchungen ein.

Ein Problem der Neutronenproduktion durch Kernspaltung ist die Verwendung des Urans, das prinzipiell auch für militärische Zwecke eingesetzt werden könnte. Allerdings wird dieses Risiko durch eine niedrige Anreicherung des Isotops U-235 und ein intensives Überwachungssystem der IAEA gering gehalten. Es verbleibt das Problem der Entsorgung des nuklearen Abfalls, dessen Menge jedoch bei einem Forschungsreaktor um Grössenordnung geringer ist als bei den Kernkraftwerken. Dies lässt sich bereits beim Vergleich der Leistung eines Forschungsreaktors ablesen, die im Bereich einiger Megawatt liegt, während Kernkraftwerke bis zu einem Gigawatt leisten.

Dennoch wird weltweit nach Alternativen gesucht, wie Neutronen freigesetzt werden können. Die Ansätze basieren auf Kernreaktionen mit Protonen, Elektronen oder gar Lasern. Um aber die Leistung eines Forschungsreaktors zu erreichen, sind gewaltige Beschleunigeranlagen notwendig. Die einzige konkurrenzfähige Alternative sind Protonenbeschleuniger in der Megawattklasse, von denen es weltweit bisher nur wenige gibt. Diese so genannten Spallationsneutronenquellen werden allerdings als so zukunftsträchtig für eine Vielzahl von Forschungsthemen angesehen, dass Beträge von einigen Milliarden Euro dafür ausgegeben werden (USA, Japan, Europa[2)]).

Von der Strahlung zum Bild

Sowohl Röntgen- als auch Neutronenstrahlung ist für den Menschen unsichtbar. Das Innenleben der Untersuchungsgegenstände bildet der Röntgenfilm ab: Silberhaltige Schichten werden durch die Strahlung angeregt und dann chemisch so umgewandelt, dass sichtbare Schwarz-Weiss-Kontraste entstehen.

Der Aufbau der Durchstrahlungseinrichtung (Bild 2) ist bei der Röntgen- und Neutronendiagnostik ähnlich: Von der Quelle ausgehend, werden die Strah-

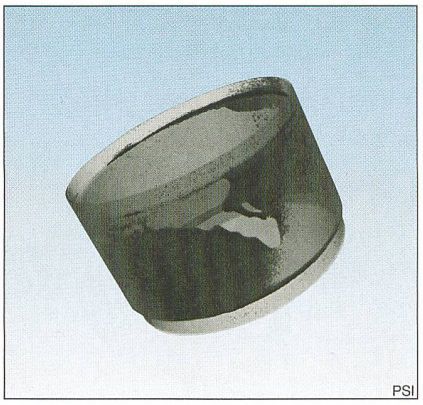


Bild 1 Kleber in Metall
Der Ausschnitt aus einer Kupferrohrverbindung mit einem Durchmesser von 15 mm zeigt, wie inhomogen der Klebstoff im Spalt verteilt ist: Im hinteren Bereich auf dem Bild ist praktisch kein Klebstoff. Neutronentomografische Methoden können bereits geringe Mengen an Klebstoffen nachweisen.

len durch einen Kollimator zum Untersuchungsobjekt geleitet, hinter dem ein Flächendetektor, der mindestens so gross ist wie das Objekt, das Schattenbild erfasst. Die Qualität beziehungsweise die Information des Bildes wird somit von allen vier Komponenten beeinflusst:

- Quelle: Im Wesentlichen ist die Energieverteilung der emittierten Strahlung von Bedeutung.
- Kollimator: Er bestimmt die Strahlrichtung bzw. -bündelung und beeinflusst massgeblich die erreichbare Bildschärfe.
- Objekt: Sowohl die Zusammensetzung als auch die Dicke in Strahlrichtung beeinflussen die Bildeigenschaften.
- Detektor: Er liefert das Resultat – die Bilddaten – und ist durch neuere Entwicklungen in gewissem Masse beeinflussbar.

Die Röntgendiagnostik, besonders aber das Neutronen-Imaging, entwickelte sich in den letzten Jahren weg vom Röntgenfilm hin zu elektronischen Detektionssystemen, die wesentliche Vorteile liefern, wie die Anwendungen einige Abschnitte weiter unten zeigen.

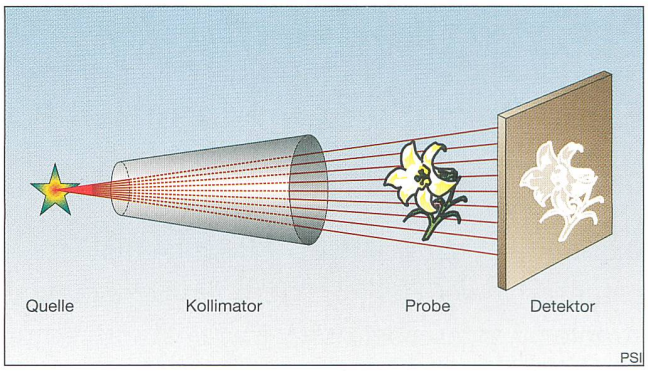


Bild 2 Durchstrahlungsprinzip
Die von der Quelle ausgehende Strahlung wird über einen Kollimator, der die Strahleigenschaften definiert, zum Untersuchungsobjekt geleitet, dessen Schattenbild der Detektor zweidimensional erfasst.

Was ist anders bei den Neutronen?

Die beiden Durchstrahlungstechniken Röntgendiagnostik und Neutronen-Imaging unterscheiden sich bei der Wechselwirkung mit der Materie. Trifft Röntgenstrahlung auf ein Objekt, reagiert diese mit den Elektronen der Atome. Folgende Reaktionen finden statt: Compton-Streuung, Fotoeffekt oder Paarbildung. Die jeweiligen Reaktionsanteile hängen von der Energie der Röntgenstrahlung ab. Es ist klar, dass die Anzahl Elektronen in der Hülle der Atome direkt die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung bestimmt. Daher sind schwere Elemente undurchsichtig, während leichte Materialien für Röntgenstrahlung kaum einen Kontrast liefern.

Neutronen dagegen ignorieren die Elektronenhülle und reagieren mit den Atomkernen der Untersuchungsobjekte. Sie können entweder absorbiert oder gestreut werden und fehlen dann im Bild hinter der Probe. Die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung ist für verschiedene Materialien weniger systematisch als bei Röntgenstrahlung – oft sogar isotopenspezifisch.

Genau hier ist die Alternative zur Röntgenstrahlung zu sehen, nämlich die komplementäre Kontrastgebung bei der Durchstrahlung, wie es Bild 3 für das Beispiel eines Tankzapfhahns zeigt. Es wird deutlich, dass leichte, insbesondere wasserstoffhaltige Materialien (Plastik, Kleber, Öl, Benzin, Wasser ...) gegenüber den Metallteilen wesentlich besser sichtbar sind, wenn Neutronen genutzt werden.

Die in Bild 4 gezeigten Periodensysteme der Elemente sollen durch die jeweiligen Grauwerte anzeigen, für welche Elemente die jeweils grösseren Kontraste bei den beiden Strahlungsarten zu erwarten sind. Es ist zu beachten, dass diese Darstellung für die so genannten thermischen Neutronen gilt. Auf andere Neutronenenergien wie die schnellen Neutronen geht das letzte Kapitel ein.

Die Anlagen für Neutronen-Imaging

Während Röntgenanlagen weit verbreitet sind (vor allem in Krankenhäusern und Arztpraxen), beschränken sich Neutronenradiografiestationen auf wenige Plätze an einigen Neutronenquellen. Es hat sich gezeigt, dass nur leistungsfähige Neutronenquellen eine Bildqualität erreichen, die mit Röntgenmethoden mithält. Schätzungsweise gibt es nur etwa 50 Anlagen weltweit [1].

Sowohl Spalt- als auch Spallationsquellen erzeugen zunächst schnelle Neutronen, die Energien im Bereich einiger MeV aufweisen (siehe Tabelle I zu den Energien). Nur selten eignen sich diese Neutronen direkt für die Bildgebung. Im Abschnitt über schnelle Neutronenradiografie weiter unten werden einige dieser Anwendungen beschrieben.

Für die Neutronendiagnostik sind die langsameren Neutronen von Bedeutung, die in einem Moderator[3)] durch Streustösse abgebremst werden, bis sie sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Moderatormaterial befinden, also durch Streustösse genau so viel Energie aufnehmen wie abgeben. Dann beträgt die mittlere Energie nur noch 25 meV[4)], also etwa neun Grössenordnungen weniger als ihre

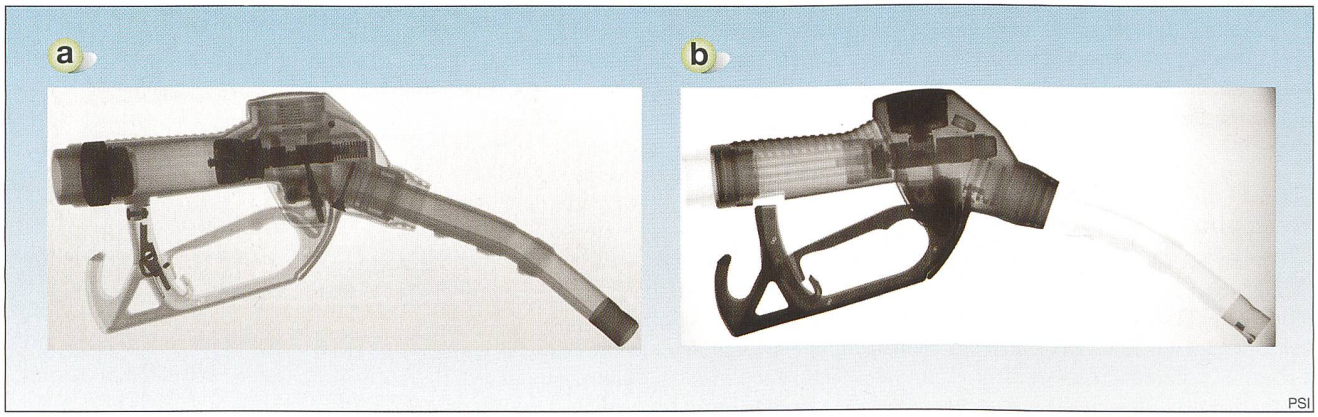


Bild 3 Tankzapfhahn
Die Aufnahmen mit 150-kV-Röntgenstrahlung (links, Bild 3a) und thermischen Neutronen (rechts, Bild 3b) zeigen die unterschiedlichen Kontrastmechanismen: Während das Röntgen die Metalle zeigt, machen die Neutronen die Plastikteile, Dichtungen und Ölreste sichtbar.

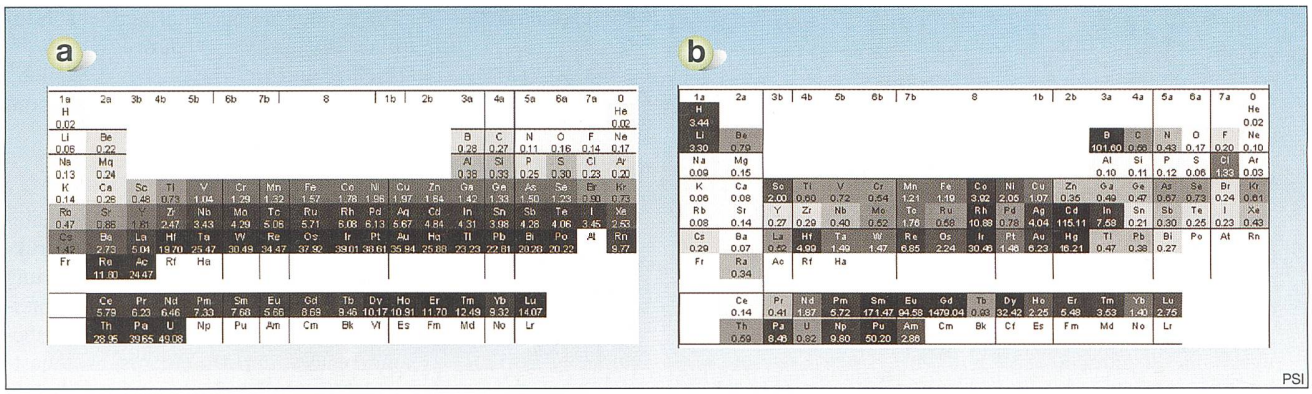


Bild 4 Periodensystem

Periodisches System der Elemente in der Kontrastgebung der jeweiligen Strahlungsart: Bei Röntgenstrahlung liefern schwerere Elemente zunehmend höhere Kontraste (links, Bild 4a), während eine solche Systematik bei thermischen Neutronen (rechts, Bild 4b) nicht zu finden ist. Hier sind vor allem einige leichte Elemente kontrastgebend.

Energie [eV]		*Geschwindigkeit [m/s]*	*Wellenlänge [m]*
5 000 000	(5 MeV)	$3{,}10 \cdot 10^{7}$	$1{,}28 \cdot 10^{-14}$
1 000 000	(1 MeV)	$1{,}38 \cdot 10^{7}$	$2{,}86 \cdot 10^{-14}$
1000	(1 keV)	$1{,}38 \cdot 10^{6}$	$2{,}86 \cdot 10^{-13}$
1	(1 eV)	$4{,}38 \cdot 10^{4}$	$9{,}04 \cdot 10^{-12}$
0,025	(25 meV)	$2{,}20 \cdot 10^{3}$	$1{,}80 \cdot 10^{-10}$
0,001	(1 meV)	$1{,}38 \cdot 10^{3}$	$2{,}86 \cdot 10^{-10}$

Tabelle I Energie, Geschwindigkeit und Wellenlänge der Neutronen

primäre Freisetzungsenergie. Sowohl die hohen Kontraste der thermischen Neutronen im Probenmaterial als auch ihre hohe Reaktionswahrscheinlichkeit im Detektor bedingen ihre intensive Nutzung in der Forschung und Industrie. In Ausnahmefällen werden auch kalte Neutronen verwendet, deren Energien noch geringer sind (siehe Ausblick).

Wegen des Fehlens einer Ladung lassen sich Neutronen durch elektromagnetische Felder nicht beeinflussen, sondern fliegen unbeirrt in die eingeschlagene Richtung. Daher kann ein gerichteter Neutronenstrahl nur durch die Auswahl geeigneter Neutronen gebildet werden, indem alle anderen Neutronen mit unerwünschter Richtung (und Energie) ausgeblendet werden.

In Bild 5 ist die Anlage ICON beispielhaft für eine Radiografiestation gezeigt. Sie befindet sich an der Spallationsneutronenquelle des Paul-Scherrer-Instituts [2] und ist seit 2005 in Betrieb. Alle Komponenten befinden sich innerhalb eines gut abgeschirmten Raumes, da Neutronen ähnlich der Röntgenstrahlung auf den Menschen wirken. Dennoch sind der Zugang zur Anlage sowie der Aufbau einer geeigneten Messtechnik ohne Probleme möglich. Den wesentlichen Teil der Anlage nimmt ein Flugrohr, der Kollimator, ein. Er ist notwendig, damit ein quasiparalleler Strahl entsteht, der eine hohe Bildschärfe ermöglicht. Am Ende der Flugstrecke steht ein homogen ausgeleuchteter Bereich mit etwa 40 cm Durchmesser. Objekte dieser Grösse können mit einem Bild erfasst werden. Grössere Probenflächen werden durch Verschiebung der Probe erreicht. Die Einzelbilder lassen sich später problemlos zusammensetzen.

Die neuen Messsysteme

Auch beim Neutronen-Imaging lieferten in der Anfangszeit Filme die Bildinformationen. Im Gegensatz zum Röntgen regen die Neutronen das Material auf dem Film aber kaum direkt an (wegen fehlender Ladung und Ionisationswirkung), sondern müssen mittels Kernreaktionen in einem Neutronenabsorber «sichtbar» gemacht werden. Typische Konvertermaterialien sind Gd, B-10, Li-6 und Cd.

In einem Strahl thermischer Neutronen, dessen Intensität beispielsweise bei 10^6 Neutronen pro Quadratzentimeter und Sekunde liegen soll, benötigte man etwa 30 Minuten für eine Filmexposition. So war es früher kaum möglich, mehr als 10 Untersuchungen pro Tag durchzuführen – recht ineffizient. Ausserdem besteht bei einer so langen Expositionszeit mit Neutronen die Gefahr, dass die Probe ak-

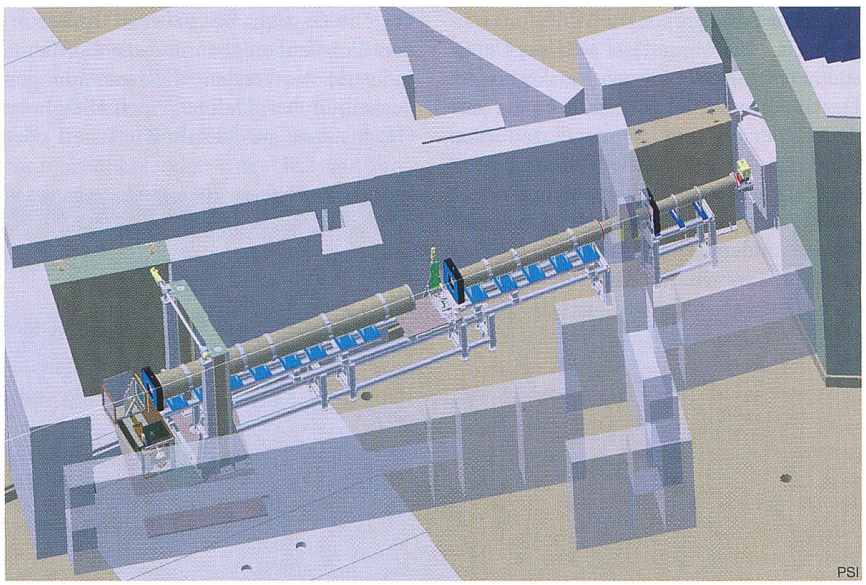


Bild 5 ICON-Anlage

Die ICON-Anlage für das Neutronen-Imaging wurde an der Spallationsneutronenquelle SINQ am Paul-Scherrer-Institut (PSI, Schweiz) Mitte 2005 in Betrieb genommen und ist für verschiedene Anwendungen mit kalten Neutronen (Mikrotomografie, Phasenkontrastmethoden) sehr effizient einsetzbar. Im Strahlkanal wird an zwei verschiedenen Positionen gemessen, je nach Grösse des Objekts: in der Mitte zur Mikrotomografie, links zur Untersuchung von grösseren Objekten bis 500 kg. Rechts ausserhalb des Bildes ist die Neutronenquelle.

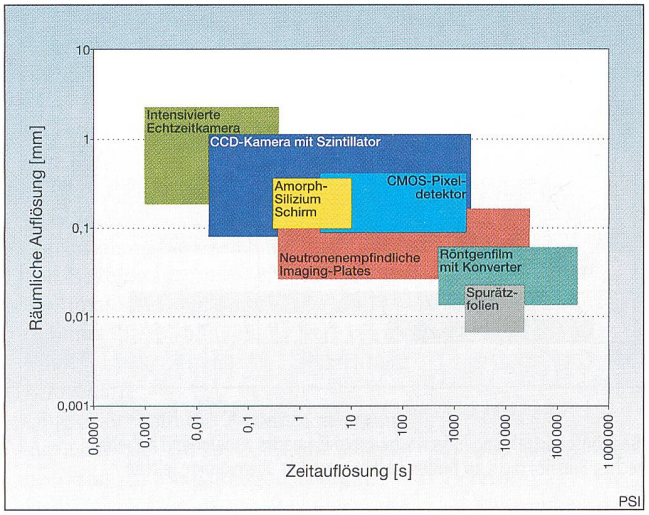


Bild 6 Übersicht Detektoren

Die Übersicht zeigt moderne Detektoren, die für das Neutronen-Imaging eingesetzt werden. Elektronische Detektoren sind wesentlich schneller als die früher üblichen Röntgenfilme – statt einer halben Stunde dauert die Messung nur noch Sekunden. Leider ist die Ortsauflösung aber noch etwas schlechter.

tiviert wird. Dies zieht eine längere Phase der abgeschirmten Lagerung des Probenmaterials nach sich.

Die Suche nach leistungsfähigeren Verfahren, die nur kurze Expositionszeiten benötigen, führte zur Entwicklung elektronischer Systeme, die die Bildinformation direkt in digitaler Form liefern. Die Übersicht in Bild 6 zeigt, dass sich die Empfindlichkeit gegenüber dem Film um Grössenordnungen verbessert hat. Gleichzeitig ist der dynamische Bereich deutlich grösser (bis zu 16 Bit), wobei die neuen Messsysteme eine hohe Linearität aufweisen. Nur in Bezug auf die Ortsauflösung müssen noch Kompromisse gemacht werden.

Mit den digitalen Bildsystemen für das Neutronen-Imaging ergeben sich wiederum neue Möglichkeiten: Mithilfe tomografischer Verfahren lässt sich ein Untersuchungsobjekt dreidimensional erfassen. Durch virtuelle Werkzeuge können aus den Bilddaten Teile segmentiert werden (Bild 7). Die erforderliche Rechnerleistung ist heute kein Problem mehr.

Die effizienten digitalen Systeme erlauben zudem zeitabhängige Untersuchungen. So wurden laufende Verbrennungsmotoren untersucht, um die Verteilung des Motorenöls unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu zeigen (Bild 8).

Schliesslich bestimmt Neutronen-Imaging Materialschichten und -konzentrationen invasionsfrei und mit hoher Präzision.

Wo sind die Neutronen nützlich?

Schon wegen der hohen Kosten für die Neutronenquellen ist Neutronenradiografie kein Routinegeschäft für jedermann. Die Anlagen befinden sich in der Regel in der Obhut von Forschungsinstituten und werden daher zu einem Grossteil für Forschungszwecke eingesetzt. Tabelle II gibt eine Übersicht über aktuelle Themen.

Dennoch besteht ein Potenzial für industrienahe Forschungen und Anwendungen, wenn traditionelle Verfahren keine Lösung geben. Dabei handelt es sich oft um gezielte Untersuchungen, um Prinzipien aufzuzeigen oder andere Messverfahren zu validieren. Insbesondere ist es die Materialkombination, die das Mass an Durchdringbarkeit und Kontrastgebung in geeigneter Weise liefern muss. Aus der Vielfalt bisheriger Anwendungen einige Beispiele[5]:

Klebverbindungen

Kleber lassen sich leicht verarbeiten und beeinflussen das Material kaum – im Gegensatz zum Schweissen. Insbesondere der Fahrzeugbau und die Luftfahrtindustrie verwenden Klebverbindungen deshalb immer häufiger. Auch alltägliche Gegenstände aus Metall, Kunststoff oder Holz werden immer öfter verklebt. Neutronen-Imaging zeigt dünne Klebstoffschichten in ihrer räumlichen Verteilung invasionsfrei und mit einem hohen Kontrast (Bild 1).

Verbundwerkstoffe

Dies gilt analog für Leichtbaumaterialien (Metallschäume, Wabenkernstrukturen), deren Aufbau, Zusammensetzung und Funktionalität mit Neutronen untersucht werden können. Ihr Einsatz insbesondere bei der Raumfahrt (Nutzlastverkleidungen) erfordert einen hohen Qualitätsstandard bei Klebe- und Fügeverbindungen.

Elektrische Brennstoffzellen

Als Alternative zu Verbrennungsmotoren (Diesel, Benzin) bieten sich Fahrzeuge, beziehungsweise Generatoren, an, die auf dem elektrochemischen Prinzip der Brennstoffzelle basieren. Neutronen-Imaging zeigt das Wasser in der Zelle (Polymer-Elektrolyt-Membran-Zellen) oder die Verdrängung des Methanols durch das entstehende CO_2 (in Direkt-Methanol-Zellen).

Isolatoren

Neutronen zeigen Defekte, Risse oder Leerstellen in Keramiken, die als Hochspannungsisolatoren dienen. Auch dicke Strukturen im Bereich einiger 10 cm können so inspiziert werden. Dabei können auch Glasierungen und Klebverbindungen analysiert werden, wie Bild 9 für einen Abschnitt zeigt. Das vergleichbare Röntgenbild enthält keine Information über die Kleberverteilung.

Sprengstoff und nukleares Material

Sowohl Sprengstoff als auch nukleares Material sind politisch hoch relevant.

Forschungsgebiet	*Untersuchungsgegenstand*	*Erwartetes Resultat*
Bodenphysik	Definierte Strukturen (Sand, Ton, Boden)	Feuchteverteilung
Holzforschung	Jahrringe, Holzverbünde, Prozesse	Holzdichte, Holzfeuchte, Imprägnierung
Geologie	Verschiedenste Gesteine	Analyse von Dichte, Einschlüssen, Wasseraufnahme
Paläonthologie	Knochenversteinerungen	Materialverteilungen in 3D (Tomografie)
Archäologie	Metallobjekte, Ausgrabungen	Innere Strukturen, Fehlstellen, Fälschungen
Materialforschung	Schweissungen, Hydrierungen	Materialverteilungen, insbesondere von Wasserstoff
Nukleartechnik	Brennstäbe, Hüllrohre, Absorber	Materialveränderungen infolge Bestrahlungen

Tabelle II Anwendungen von Neutronen-Imaging in der Forschung

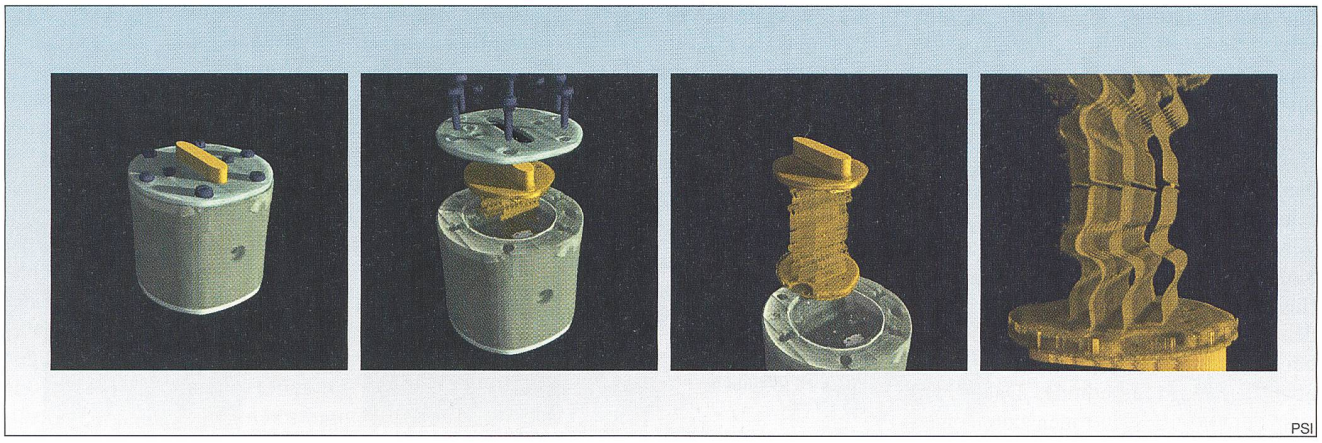


Bild 7 Tomografisches Bild einer Hochstromsicherung

Der Computer berechnet mit den Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln das Innere der Hochstromsicherung. In der Animation wird die Sicherung in ihre Einzelteile zerlegt. Deutlich sichtbar ist die Kugel von geschmolzenem Metall zwischen den Kontakten im Bild ganz rechts.

Wegen der hohen Empfindlichkeit für Wasserstoff, der in fast allen Explosionsstoffen zu finden ist, entdeckt Neutronen-Imaging bereits geringe Mengen. Dies ist auch nützlich für Inspektionen von Airbags und Sprenginitiatoren, wie sie die Raumfahrt verwendet.

Da Kernmaterialien wie Uran eine hohe Massenzahl tragen, sind sie für Röntgenmethoden undurchdringbar. Anders sieht das für Neutronen aus, die sogar die Anreicherungen in den verschiedenen Isotopen unterscheiden [3].

Für alle Anwendungen müssen allerdings Proben zur Neutronenradiografiestation gebracht werden. Eine Vor-Ort-Inspektion (zum Beispiel am Flughafen) ist wegen der Grösse der Neutronenquelle nicht möglich.

Diese Beispiele sind nur ein geringer Ausschnitt aus den möglichen Anwendungen. Im Bereich der Elektrotechnik sind vor allem Kontakte, Isolationen, Feuchteinflüsse sowie die Funktionalität von speziellen Sensoren potenzielle Untersuchungsgegenstände.

Wenn thermische Neutronen zu langsam sind

Für bestimmte Anwendungen, wie die Untersuchung von Strukturen aus leichten Elementen hinter schweren Abschirmungen aus Metall oder das Aufspüren von Sprengstoff und Drogen in Reisegepäck und Luftcargo, sind schnelle Neutronen mit Energien von 1 bis 10 MeV[4)] besser geeignet. Im Gegensatz zu den Radiografieverfahren mit thermischen Neutronen sind die Anlagen für schnelle Neutronen aber alle noch im Entwicklungsstadium.

Schnelle Neutronen besitzen, ebenso wie energiereiche Gammastrahlung, ein hohes Durchdringungsvermögen. Sie durchstrahlen selbst dicke Metallabschirmungen und machen dahinter verborgene Objekte aus leichten Materialien sichtbar. Eine Anwendung ist zum Beispiel die Untersuchung von Lithiumhydrid-Strukturen hinter dicken Schwermetallschichten [4]. Am Forschungsreaktor der TU-München ist eine Radiografiestation für universelle Anwendungen aufgebaut worden, bei der schnelle Spaltneutronen zur Durchleuchtung schwerer Objekte eingesetzt werden sollen [5].

Die Wechselwirkung schneller Neutronen mit Materie ist zudem stark abhängig von der Energie der Neutronen. Es bilden sich Resonanzen, die quasi einen Fingerabdruck eines bestimmen Elements darstellen (Bild 10). Wer also eine Probe mit Neutronen unterschiedlicher Energien untersucht, kann die Verteilung bestimmter Elemente (z.B. C, N, O) innerhalb des Probenvolumens, eines Luftcargobehälters oder eines Reisekoffers, bestimmen. Diese Anwendungen werden zurzeit von Arbeitsgruppen an der PTB (Deutschland), NRC Soreq (Israel) und dem MIT (USA) untersucht. Das Verfahren nennt sich Resonanzradiografie. Neben der bereits erwähnten Anwendung zum Aufspüren von illegalen Stoffen (Drogen und Sprengstoff) verwendet eine Arbeitsgruppe der Firma De Beers das Verfahren zum Auffinden von kleinsten Mengen kristallinem Kohlenstoff (Diamanten) in Kimberlit (einem schweren, hochdichten Mineral). In diesem Fall reichen Radiografien bei zwei Energien im Bereich 6–8,5 MeV (Bild 10a für Kohlenstoff).

Woher kommen die schnellen Neutronen?

Ebenso wie thermische Neutronen müssen schnelle Neutronen zunächst aus dem Atomkern befreit werden. Dies erfolgt durch eine spezifische Kernreaktion: durch eine Kernspaltung oder den Stoss eines beschleunigten Ions mit einem ruhenden Atom. Im letzteren Fall lässt sich durch die geeignete Auswahl der Ionenenergie und der Projektil- und Targetisotope die Neutronenenergie gezielt einstel-

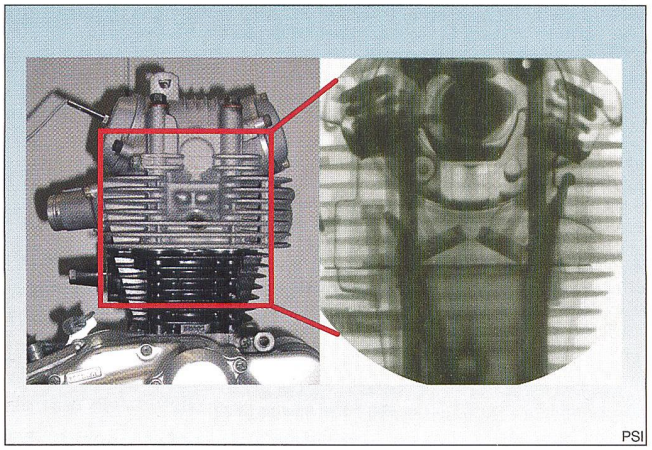


Bild 8 Bilder vom laufenden Motorradmotor

Wenn der Neutronendetektor mit dem laufenden Motor synchronisiert wird und die einfallenden Neutronen von mehreren Zyklen aufsummiert werden, zeigen die Bilder einzelne Phasen des Verbrennungsmotors mit interessanten Details wie der Verteilung des Schmiermittels. Links der Motor auf einem normalen Foto.

len. Zudem vergisst das schnelle Neutron seine Herkunft nicht (Entstehungsort, Energie, ursprüngliche Flugrichtung) – im Gegensatz zum thermalisierten Neutron. Damit lassen sich fast punktförmige Neutronenquellen mit extrem kurzen Neutronenpulsen im Nanosekundenbereich realisieren. Durch die Punktquelle wird das aufwendige und verlustreiche Kollimieren des Neutronenstrahls überflüssig. Die Pulsung ermöglicht ausserdem eine simultane Messung von Bildern bei verschiedenen Neutronenenergien über die Flugzeitmethode. Dabei wird ausgenutzt, dass Neutronen unterschiedlicher Energie, die gleichzeitig am Neutronen erzeugenden Target gestartet sind, zu unterschiedlichen Zeiten im Detektor auftreffen.

Während Reaktor- und Beschleunigerquellen nur stationäre Anwendungen ermöglichen, soll der Vollständigkeit halber erwähnt werden, dass auch tragbare oder mobile Systeme auf der Basis von Neutronengeneratoren oder radioaktiven Quellen im Einsatz sind – allerdings aufgrund ihrer geringen Neutronenausbeute keine hohe Abbildungsqualität erlauben. Weiterhin arbeiten die Entwickler an neuen Methoden der Neutronenerzeugung: kompakte, leistungsfähige Neutronengeneratoren oder Neutronen aus Ionenstrahlen, die von Hochleistungslasern erzeugt und beschleunigt wurden.

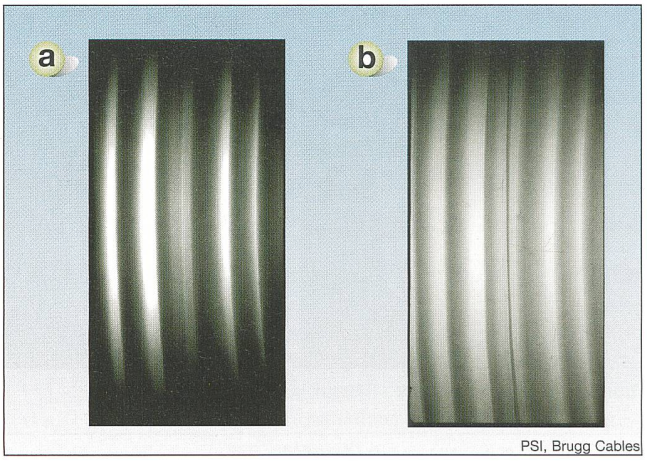


Bild 9 Geklebter Isolator
Moderne Bauteile wie Keramikisolatoren werden immer häufiger geklebt. Da Ultraschall und Röntgenstrahlen (Bild 9a) den Klebstoff aber nicht zeigen, lässt sich schwer beweisen, dass die Klebstelle zuverlässig halten wird. Das Neutronen-Imaging (rechts, Bild 9b) zeigt die Verteilung des Klebers gut sichtbar an – die Bilddaten lassen sich sogar quantitativ auswerten.

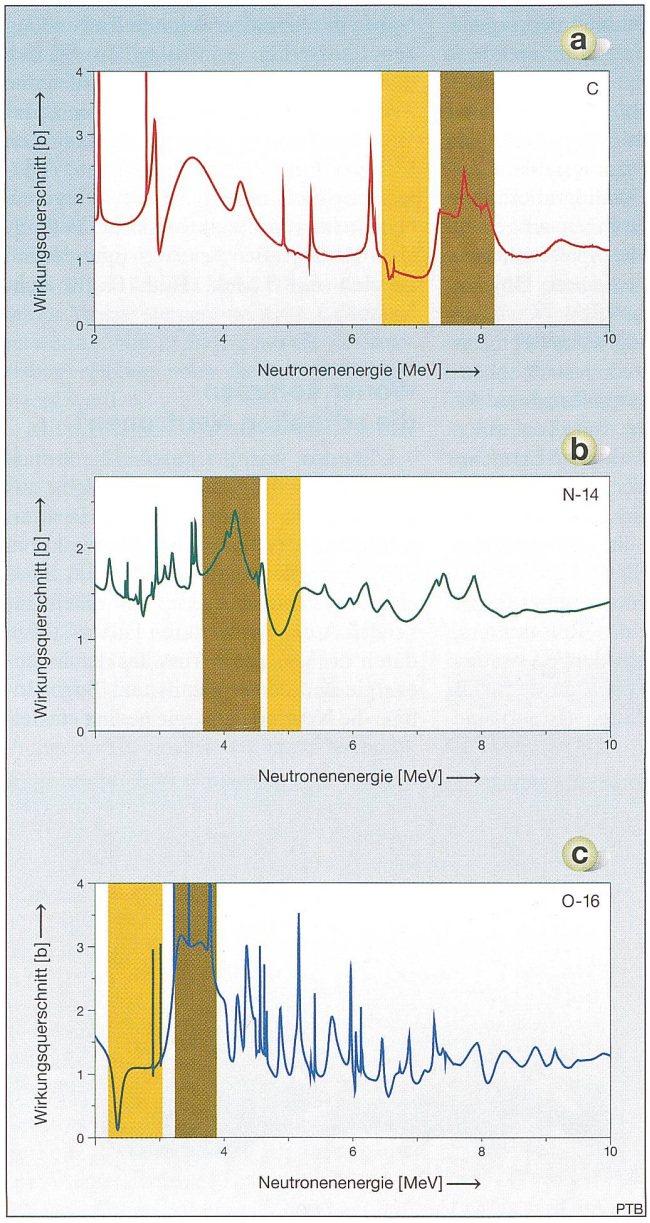


Bild 10 Energieabhängigkeit des totalen Neutronenwirkungsquerschnittes für Kohlenstoff (C12), Stickstoff (N14) und Sauerstoff (O16)

Augen für schnelle Neutronen

Neben der Erzeugung ist das «Sehen» der schnellen Neutronen eine besondere Herausforderung. Dazu müssen sie zunächst mit einem geeigneten Material reagieren, so genannten Konvertern. Ein typisches Konvertermaterial ist Wasserstoff, der ein wesentlicher Bestandteil des Leuchtschirmes ist (wir sagen Szintillator), der durchfliegende Neutronen mit einem kleinen Lichtblitz anzeigt. Schnelle Neutronen reagieren aber vergleichsweise selten mit Materie. Deshalb sind dicke Konverterschichten erforderlich: Typischerweise benötigt man einen 5 cm dicken Plastikleuchtschirm, um 30–50% der Neutronen nachzuweisen.

Eine zusätzliche Herausforderung stellt die simultane Messung der Neutronenenergie durch das Imagingsystem bei der Resonanzradiografie über die Flugzeitmethode dar. Das System der PTB und dem NRC Soreq weist die MeV-Neutronen aus einer gepulsten Quelle in einem 3 cm dicken Leuchtschirm nach. Dieser besteht aus parallelen, 0,5 mm dicken Lichtleiterfasern aus Plastik, in denen die Neutronen durch Stösse mit dem Wasserstoff in energiereiche geladene Protonen konvertiert werden. Am Ende einer Faser wird diese Konversion durch einen kurzen, wenige Nanosekunden dauernden Lichtblitz signalisiert.

Die Lichtblitze vieler Neutronen werden über ein lichtstarkes Objektiv auf einem Bildverstärker abgebildet. Über

diesen Verstärker wiederum lässt sich die Belichtung sehr schnell steuern – bis hinunter zu wenigen Nanosekunden. Durch Wahl des Belichtungszeitpunkts und der Dauer kann ein Energiebereich gezielt aufgenommen werden. Das Bild im Ausgang des optischen Bildverstärkers wird über eine CCD-Kamera über viele Neutronenpulse integriert und dann ausgelesen. Bild 11 zeigt eine Bilderserie, bei der eine Probe sequenziell bei verschiedenen Energien durchleuchtet wurde. Anschliessend wurde die Verteilung des Stickstoffes (N) und des Kohlenstoffes (C) durch mathematische Verfahren bestimmt.

Das beschriebene Imagingsystem ist der Prototyp eines komplexeren Gerätes, das derzeit aufgebaut wird. Hier werden mehrere (6–8) optische Kanäle parallel auf den Leuchtschirm schauen und simultan Radiografien bei unterschiedlichen Energien aufnehmen. Damit sollen in einem Durchgang die Verteilungen der Elemente C, N und O in einer Probe erfasst werden.

Es ist unverkennbar, dass schnelle Neutronen in ihrer Erzeugung, ihrem Nachweis und den Anwendungen noch exotischer als die oben beschriebenen thermischen Neutronen sind. Jedoch hat die Sorge um terroristische Angriffe den Bedarf an grossvolumigen Inspektionen (ganze Container) bei der Suche nach Bombenmaterial und Rauschgiften stark ansteigen lassen. In diesem Bereich könnten schnelle Neutronen künftig eine grössere Rolle spielen.

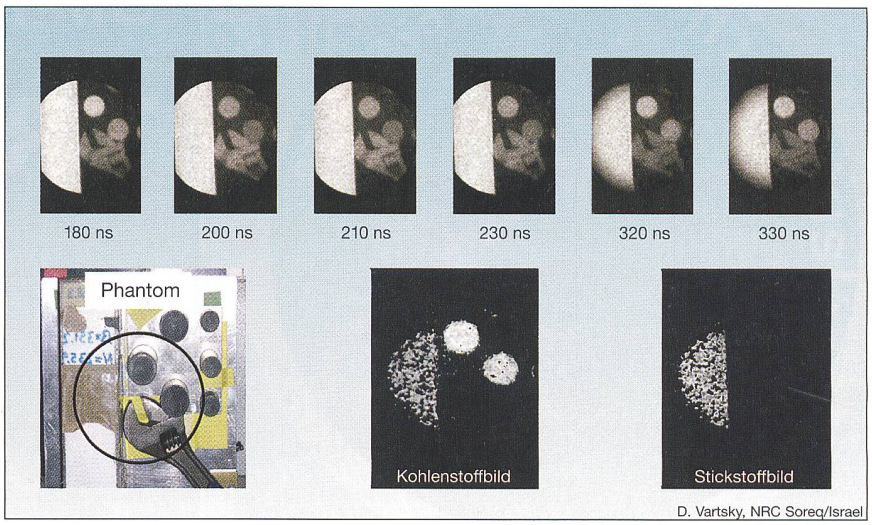


Bild 11 Radiografie bei unterschiedlichen Energien

Die Bilder zeigen Radiografien eines Phantoms zu verschiedenen Neutronenflugzeiten und damit bei unterschiedlichen Energien. Das Phantom besteht aus einem Melaminblock (Sprengstoffsimulant), einigen Kohlenstoffzylindern und einem Schraubenschlüssel aus Stahl (Foto unten links). Der Kreis zeigt den vom Imagingsystem gesehene Ausschnitt. Aus den Radiografien bei unterschiedlicher Neutronenenergie werden durch mathematische Verfahren die C- und N-Verteilungen in der Probe berechnet (Bilder unten rechts).

Und weiter ... ein Ausblick

Ähnlich wie die Röntgendiagnostik einen Schub durch die weltweiten Installationen von Synchrotronstrahlungsquellen[6] erhielt, hoffen Forscher im Bereich Neutronen-Imaging auf Fortschritte durch gepulste Spallationsquellen. Hier separiert die Zeitstruktur im Neutronenpuls mit höchster Intensität die Neutronenenergie noch besser, was sehr spezifische Untersuchungen von Materialeigenschaften und -veränderungen ermöglicht. Die Gefügeveränderungen an und in Schweissnähten können so beispielsweise direkt sichtbar gemacht werden.

Aber auch die bereits verfügbaren Anlagen haben ein grosses Potenzial für methodische Verbesserungen und Entwicklungen. Die kürzlich gezeigte Nutzung des Phasenkontrastes bei kalten Neutronen kann die Diagnostik massiv verbessern. In gleicher Weise erweitert die Erhöhung der räumlichen Auflösung bei Radiografie und Tomografie den Nutzerkreis. Eine Ortauflösung von 10 µm ist dabei eine wahre Herausforderung. Kalte Neutronen scheinen hierbei ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg.

Referenzen

[1] http://www.isnr.de/home.php
[2] G. Kühne et al.: The New Facility for Cold Neutron Imaging at the Swiss Spallation Neutron Source SINQ, Swiss Neutron News 28, Dez. 2005, S. 20–29
[3] E.H. Lehmann, P. Vontobel, A. Hermann: Non-destructive Analysis of Nuclear Fuel by Means of Thermal and Cold Neutrons, Nucl. Instr. & Meth. in Physics Research A 515 (2003) 745–759
[4] Hall/LLNL: http://www.llnl.gov/str/May01/pdfs/05_01.1.pdf
[5] Nectar, TuM: http://www.new.frm2.tum.de/fileadmin/industrie/nectar.pdf und/oder http://www.radiochemie.de/main/instr/nectar/nectar.html

Angaben zu den Autoren

Dr. Eberhard H. Lehmann ist seit 2005 Leiter der Gruppe Neutron Imaging & Activation am Paul-Scherrer-Institut (PSI), 5232 Villigen. Neben der Nutzung von 4 Strahllinien an der Spallationsneutronenquelle SINQ stehen vor allem die methodische Weiterentwicklung sowie die vielfältige Nutzung von digitalen Imaging-Methoden im Fokus seines Interesses. Durch seine Vorkenntnisse in Reaktorphysik (schneller Brutreaktor) und neutronischen Messverfahren ist dafür eine perfekte Grundlage vorhanden.
Paul-Scherrer-Institut, Abt. Spallationsneutronenquelle, 5232 Villigen PSI, eberhard.lehmann@psi.ch

Dr. Volker Dangendorf hat an der Universität Frankfurt am Main und am Weizmann-Institut (Israel) studiert. Seit 1991 arbeitet er auf dem Gebiet der Mikrodosimetrie und der Neutronenmetrologie an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, D-38116 Braunschweig, volker.dangendorf@ptb.de

[1] Einfache Messungen kosten ab 300 Franken und sind auch für kleine Firmen zahlbar.
[2] In Europa steht das Projekt *European Spallation Source* an, das bis 2002 breite Unterstützung fand, heute aber weitgehend inaktiv ist – eine Entscheidung steht noch aus (http://neutron.neutron-eu.net/n_ess).
[3] Als Moderator wird zum Beispiel schweres Wasser eingesetzt (mit einem Deuterium- statt einem Wasserstoffatom zwischen den beiden Sauerstoffatomen; Deuterium ist ein Isotop von Wasserstoff mit einem zusätzlichen Neutron im Kern). Schweres Wasser absorbiert die Neutronen im Gegensatz zum normalen, leichten Wasser viel weniger.
[4] MeV/meV: Ein 5-MeV-Neutron hat eine Geschwindigkeit von ca. 30 000 km/s oder 10% Lichtgeschwindigkeit (Mev für Mega-eV). Die mittlere Geschwindigkeit eines thermischen Neutrons beträgt 25 meV (Milli-eV). Dies entspricht etwa der Austrittsgeschwindigkeit eines Artilleriegeschosses (2000 m/s) – siehe auch Tabelle I.
[5] Weitere Beispiele sind auf den Homepages der Autoren zu finden: http://neutra.web.psi.ch/ oder http://www.ptb.de/de/org/6/65/651/
[6] Spezielle Elektronenbeschleuniger, z.B. ESFR Grenoble, SLS Villigen …

Résumé

Radiographie neutronique

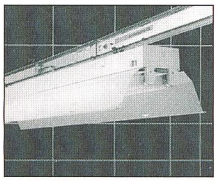
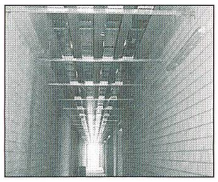
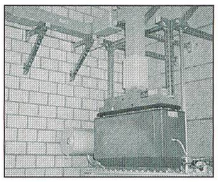
Une alternative à la radiographie normale. La radiographie aux rayons X s'est établie en médecine et est de plus en plus employée en électronique. Mais les rayons X sont absorbés par le métal et ne font guère apparaître l'eau. Si donc l'on souhaite examiner l'eau dans une pile à combustible ou le lubrifiant dans un moteur en marche, il faut une alternative. Ce pourrait être la radiographie neutronique: les neutrons traversent le métal et donnent une image hautement contrastée de la répartition de l'humidité, des adhésifs et autres substances organiques.

LEUTRON®

schützt vor Überspannungen
protége contre la surtension

LEUTRON GmbH - Grande Ferme 24 - CH-3280 Murten
Tel. +41 26 672 30 70 - Fax +41 26 672 30 71 - info@leutron.ch

■ LGD - Groundig products ■ LDS - Direct strike products
■ LEMD - Elektromechanical products ■ LFD - Fixation products

Ihre Sicherheit – CE

LANZ Stromschienen 25 A – 6000 A

- **LANZ EAE – metallgekapselt 25 A – 4000 A IP 55**
  für die änder- und erweiterbare Stromversorgung von Beleuchtungen, Anlagen und Maschinen in Labors, Fabriken, Fertigungsstrassen, etc. Abgangskästen steckbar.
- **LANZ HE – giessharzvergossen 400 A – 6000 A IP 68**
  Die weltbeste Stromschiene. 100% korrosionsfest. EN / IEC typengeprüft. Abschirmung für höchste EMV-Ansprüche. Auch mit 200% Neutralleiter. Anschlussköpfe nach Kundenspezifikationen. Abgangskästen steckbar.

Speziell empfohlen zur Verbindung Trafo-Hauptverteilung, zur Stockwerk-Erschliessung in Verwaltungsgebäuden, Rechenzentren und Spitälern, zum Einsatz in Kraftwerken, Kehrichtverbrennungs-, Abwasserreinigungs- und allen Aussenanlagen. Beratung, Offerte, rasche preisgünstige Lieferung weltweit von lanz oensingen ag 4702 Oensingen Tel. 062 388 21 21

☐ Mich interessieren Stromschienen. Senden Sie Unterlagen.
☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. _____

S2

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen
Telefon 062 388 21 21
www.lanz-oens.com
Südringstrasse 2
Fax 062 388 24 24
info@lanz-oens-com

Überspannungsschutz
TRABTECH

Variable Einbaurichtung

FLASHTRAB compact

Die Produktfamilie mit durchgängig steckbar und prüfbar aufgebauten AEC-Ableiterkombinationen für alle Stromversorgungssysteme besteht aus gekapselten und getriggerten Blitzstromableitern Typ-1 und Überspannungsableitern Typ-2. Funktionskontrolle am Stecker und zentraler Anschluss für die Fernsignalisierung sind Standard.

Mehr Informationen unter
Telefon 052 354 55 55 oder
www.phoenixcontact.ch

PHOENIX CONTACT
INSPIRING INNOVATIONS

© PHOENIX CONTACT 2005