

Neutronen sehen, was Röntgenstrahlen verborgen bleibt

B. Schillinger und T. Bücherl, Technische Universität München

Neutronen durchdringen Metalle gut und reagieren dabei äußerst empfindlich auf Wasserstoff, sodass Kunststoffe, Klebstoffe, Schmiermittel und Dichtungen oder Feuchtigkeit auch im Inneren von massiven metallischen Objekten, wie z. B. Motoren oder anderen Maschinenteilen sichtbar gemacht werden können.

Mit der diesjährigen Inbetriebnahme des neuen Forschungsreaktors FRM-II in Garching bei München und den dort verfügbaren Neutronen-Radiographie- und Tomographie-Anlagen stehen für die zerstörungsfreie Untersuchung die weltweit wohl leistungsfähigsten Systeme dieser Art zur Verfügung. Das ist ein ausreichender Grund, dieses in zunehmendem Maße von der Industrie genutzte Verfahren vorzustellen und hierbei speziell auf seine Abgrenzungen zu Röntgen-Systemen einzugehen.

Einführung

Die ersten Neutronen-Radiographien entstanden 1935, knapp 40 Jahre nachdem die ersten Röntgen-Radiographien aufgenommen wurden. Zu Beginn der 80er Jahre wurde das Verfahren der Neutronen-Radiographie und Tomographie erstmals auch am Forschungsreaktor FRM der TU München eingesetzt. Die ersten Messungen wurden unter Verwendung von schnellen Neutronen durchgeführt [1], bald folgte der Aufbau eines heute gebräuchlichen Systems mit thermischen Neutronen [2]. Obwohl sehr rasch gezeigt werden konnte, dass dieses Verfahren ergänzende oder komplementäre Informationen gegenüber dem Einsatz von Röntgenstrahlen liefert, war seine industrielle Anwendung auf vereinzelte Fragestellungen und Aufträge beschränkt, hauptsächlich auf die Untersuchung von Kühlkanälen in Turbinenschaufeln. Dies war vor allem in der zu geringen Leistungsfähigkeit der damals verfügbaren Detektorsysteme begründet.

In der Regel wurde die Filmmethode eingesetzt, die vor einer Weiterverarbeitung eine zeitaufwändige Digitalisierung der auf dem Film gespeicherten Transmissionsdaten erforderte, oder die Untersuchungsprobe wurde zeitaufwändig mit einem Einzelstrahldetektor abgerastert. Ein weiteres Problem stellte die für damalige Verhältnisse enorme Rechenleistung dar, die für die Auswertung der Daten und Berechnung von Tomographien erforderlich war. Seither wurde das Verfahren an der TU München ständig weiterentwickelt. Dies gilt speziell für den Bereich zweidimensional ortsauflösender Detektoren. Neben den mittels Laserstimulation auslesbaren Image Plates [3] wurden vor allem im Bereich der elektronischen Detektoren zusammen mit dem Paul-Scherrer-Institut (PSI), Schweiz, entscheidende Weiterentwicklungen getätigt [4].

Inzwischen sind entsprechende leistungsfähige digitale Systeme auch an mehreren anderen europäischen Forschungseinrichtungen verfügbar, wie z. B. dem Paul-Scherrer-Institut

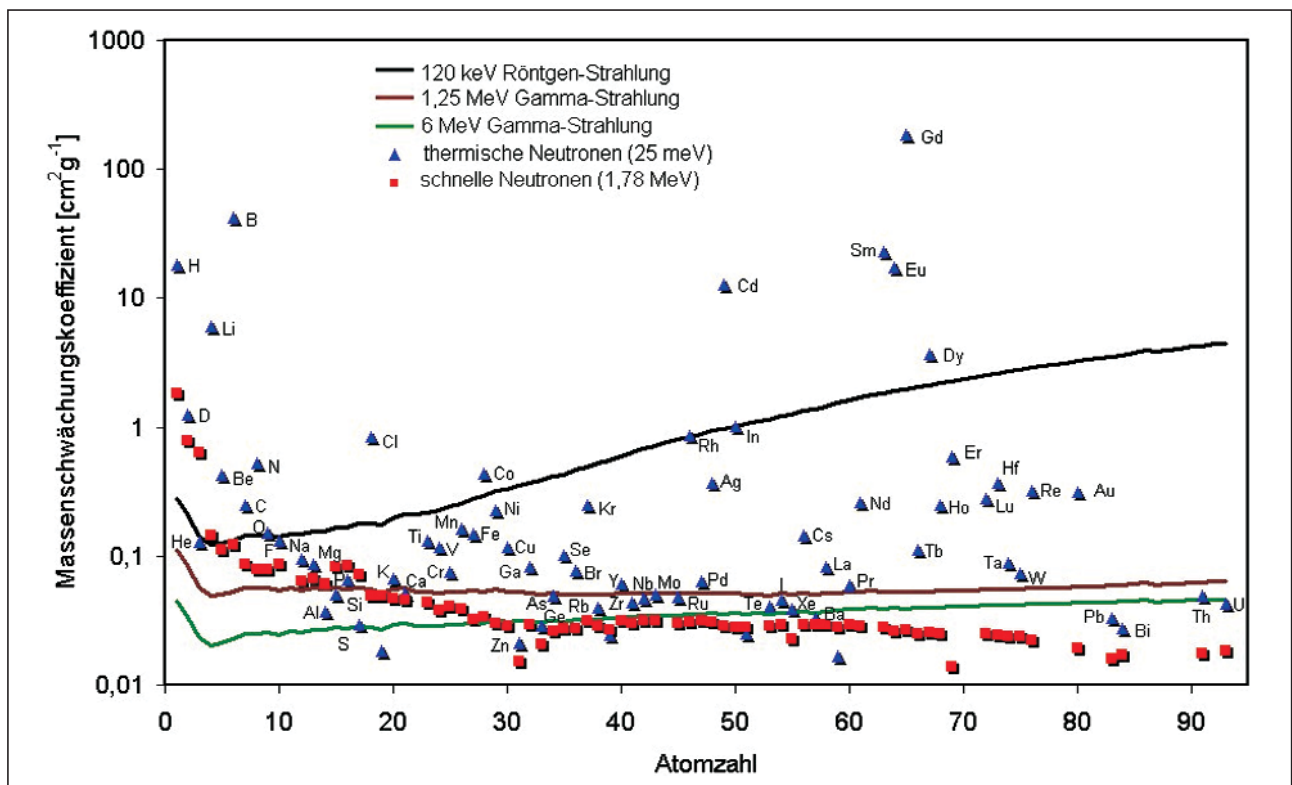


Bild 1: Abhängigkeit des Massenschwächungskoeffizienten für Röntgen- und Gamma-Strahlen sowie von thermischen und Spalt-Neutronen von der Kernladungszahl.

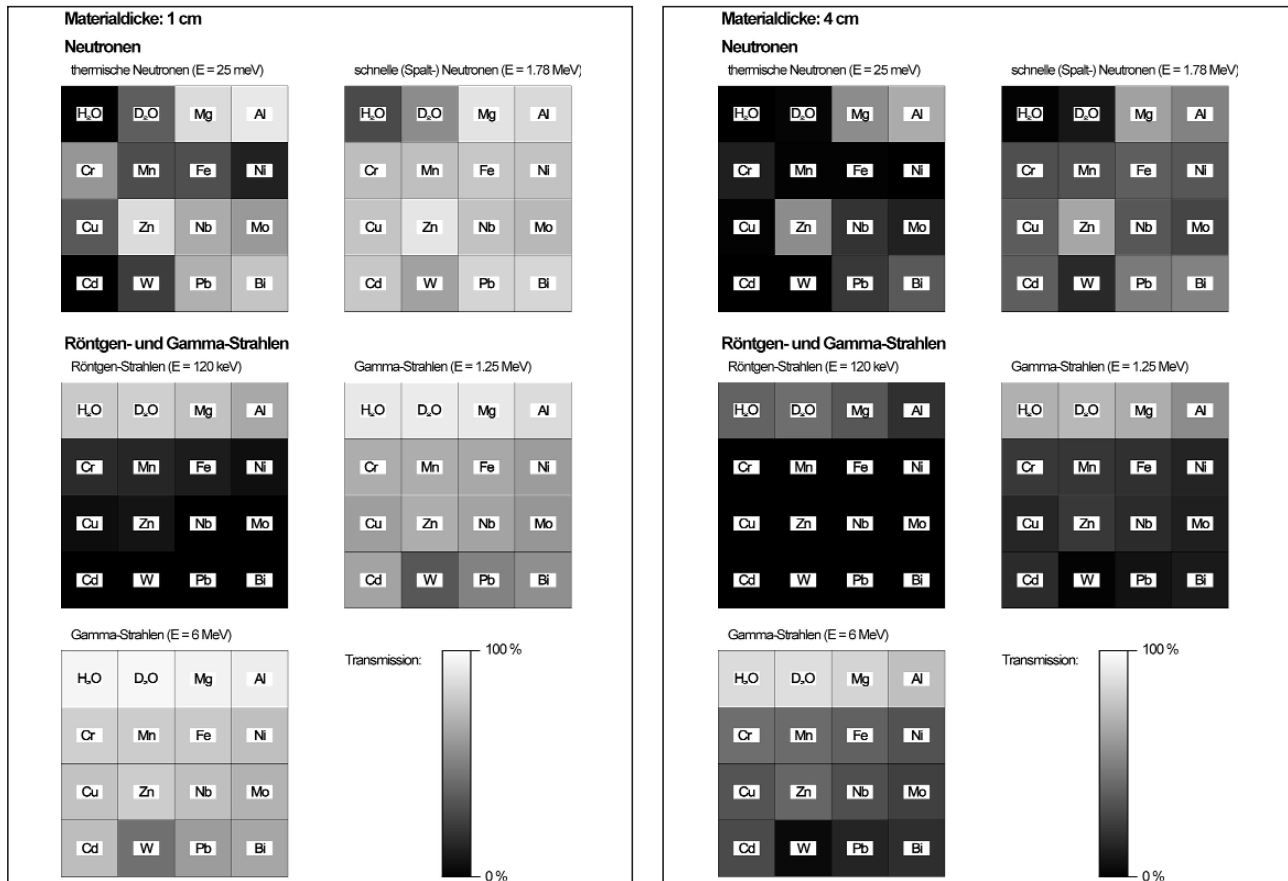


Bild 2 und 3: Durchdringungseigenschaften von Röntgen- und Gamma-Strahlen sowie thermischen und Spalt-Neutronen für verschiedene Materialien. Die Kernladungszahl nimmt in den jeweiligen Feldern von links nach rechts und von oben nach unten zu, d. h. das schwerste Material befindet sich immer rechts unten. Je dunkler ein Feld ist, desto geringer ist seine Transmission

(PSI), Schweiz, dem Institut Laue Langevin (ILL), Grenoble (F), CEA Saclay (F), dem Hahn-Meitner-Institut in Berlin (D), der GKSS Geesthacht (D), dem KFKI Budapest (HU) und dem Atominstytut Wien (A).

Bereits an dieser Vielzahl europäischer Forschungseinrichtungen, die sich mit dem Verfahren der Neutronen-Radiographie und Tomographie intensiv auseinandersetzen, wird das zunehmende Interesse aus Wissenschaft, Entwicklung und Industrie an diesem Verfahren als Ergänzung zu konventionellen Röntgen-Untersuchungen deutlich.

Nicht zuletzt der Beginn des Routinebetriebs am FRM-II war der Anlass, dass das in vierjährigem Abstand nun zum fünften Mal stattfindende „5th International Topical Meeting on Neutron Radiography (ITMNR-5)“ mit dem diesmaligen Titel „Electronic Neutron Imaging Systems and their Applications“ vom 26. bis 30. Juli 2004 in Garching durchgeführt wird (nähere Informationen unter www.isnr.de oder bei den Autoren). Forscher, Entwickler und Anwender aus mehr als 20 Ländern treffen sich in Garching, um die neuesten Entwicklungen und Anwendungen zu diskutieren.

Physikalische Grundlagen

Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen, die nur sehr schwach mit Materie wechselwirken. Während Röntgenstrahlen hauptsächlich mit der Elektronenhülle der Atome wechselwirken und abhängig von der Kernladungszahl und damit der Anzahl der Elektronen in der Atomhülle geschwächt werden, wechselwirken Neutronen nur mit den

Atomkernen selbst. Kalte und thermische Neutronen, die eine Energie zwischen 0,5 meV und etwa 100 meV besitzen, folgen dabei keiner einfachen Regelmäßigkeit über das Periodensystem, schnelle (Spalt-) Neutronen (Energie im 1 MeV-Bereich) verhalten sich nahezu invers zu Röntgen- und Gamma-Strahlen. Das unterschiedliche Verhalten wird durch den Massenschwächungskoeffizienten (μ/ρ) beschrieben (Bild 1). Dieser geht als ein wesentlicher Bestandteil in die Berechnung der Intensität I ein, die nach dem Durchdringen eines Materials der Dichte ρ und der Dicke d noch vorhanden ist, wenn die ursprüngliche Intensität I_0 war.

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d\right)$$

Der Unterschied zwischen der Information, die Röntgen- und Gamma-Strahlen bzw. Neutronen beim Durchgang durch Material liefern, d. h. die Auswirkung der unterschiedlichen Massenschwächungskoeffizienten, kann am besten anhand der Bilder 2 und 3 verdeutlicht werden. Gezeigt ist grafisch, wie stark unterschiedliche Materialien die jeweilige Strahlung durchlassen, wenn diese 1 cm (Bild 2) bzw. 4 cm (Bild 3) dick sind. Helle Felder bedeuten, dass dieses Material von der jeweiligen Strahlenart leicht durchdrungen werden kann (d. h. hohe Transmission), dunkle Felder, dass die Strahlung das Material nicht oder kaum durchdringen kann.

Gut zu erkennen ist das bezüglich der Kernladungszahl stark unregelmäßige Durchdringungsvermögen thermischer Neutronen. Somit sind Materialien, die im Periodensystem benachbart sind, sehr oft gut unterscheidbar. Als besondere Eigenschaft sei speziell auf die starke Wechselwirkung mit wasserstoffhaltigen Materialien hingewiesen. Röntgen- und Gamma-Strahlen hingegen zeigen ein mit zunehmender Kernladungszahl abnehmendes Durchdringungsvermögen. Schnelle (Spalt-) Neutronen ergänzen die oben genannten Durchstrahlungsquellen auf ideale Weise. Einerseits können dickere, dichte Materialien, wie z. B. Eisen, Wismut und Blei relativ leicht durchdrungen werden, andererseits zeigen sie eine starke Wechselwirkung mit wasserstoffhaltigen Materialien.

Aus diesen Darstellungen wird deutlich, dass die Verwendung von Neutronen in der Radiographie und Tomographie kein Ersatz ist für die etablierten Verfahren mit Röntgen- und Gamma-Strahlen, sondern diese im Bedarfsfall auf ideale Weise ergänzen.

Methodik

Das Grundprinzip der Radiographie und Tomographie wurde bereits in der Ausgabe 88 der ZfP-Zeitung beschrieben [5] und wird deshalb als bekannt vorausgesetzt. Im weiteren wird auf die speziellen Anforderungen eingegangen, die durch die Verwendung von Neutronen entstehen.

Quelle

Als Quelle für Neutronen ausreichender Stärke und Brillanz kommen ausschließlich Forschungsreaktoren und Spallationsquellen in Frage.

Andere Quellen sind für Routineuntersuchungen im Allgemeinen nicht geeignet. So können mit Beschleunigern über die Deuterium-Tritium-Fusionsreaktion Neutronen mit einer Energie von etwa 14 MeV erzeugt werden, die aber für die meisten Untersuchungen aufgrund ihrer hohen Energie wenig geeignet sind. Durch Abbremsen (Moderation) auf geringere Energien (z. B. mit Hilfe von Polyethylen-Blöcken) reduziert sich die verfügbare restliche Strahlintensität so stark, dass sie für qualitativ hochwertige Aufnahmen (Radiographien) nur sehr bedingt geeignet ist. Ein weiterer Nachteil ist ihre stark divergente, d. h. nicht gerichtete Strahlgeometrie, die die mögliche Auflösung stark beschränkt. Die Argumente der geringen Strahlintensität und großen Divergenz gelten auch für andere Quellen, wie z. B. Radioisotopen-Quellen.

Im praktischen Einsatz werden meistens kalte und thermische Neutronen eingesetzt, wie sie aus dem Moderatorgefäß eines Forschungsreaktors oder einer Spallationsquelle über Strahlrohre extrahiert werden. Am FRM-II stehen zusätzlich schnelle (Spalt-) Neutronen mit Energien um 1 MeV zur Verfügung.

Strahlgeometrie

Da anders als bei Röntgenröhren an Forschungsreaktoren und Spallationsquellen keine Punktquellen realisierbar sind, wird der Neutronenstrahl durch eine kleine Blende (typischer Durchmesser 2-4 cm) bzw. für schnelle Neutronen durch einen zylindrischen oder konischen Kollimator und ein daran anschließendes langes, evakuiertes Flugrohr zum Messplatz geführt. Entscheidend für die erzielbare Bildqualität ist wie bei einer Lochkamera das Verhältnis des Ab-

stands Blende-Untersuchungsobjekt zum Blendendurchmesser, dem so genannten L/D-Wert. Diese Beschreibung ist analog der Beschreibung bei einer Röntgenröhre. Dort wird sie durch das Verhältnis des Abstands Brennfleck-Untersuchungsobjekt zum Brennfleckdurchmesser definiert.

Durch den großen Abstand bei Neutronen-Radiographie-Anlagen, der typischerweise zwischen 5 und 15 Metern beträgt, wird am Ort des Messplatzes ein Quasi-Parallelstrahl erzeugt. Röntgenröhren arbeiten im Gegensatz hierzu mit einem Fächer- oder Kegelstrahl. Ein Vorteil dieser Parallelstrahlgeometrie liegt in der wesentlich einfacheren Berechnung von 3-dimensionalen Tomographien, da diese aus Schichten von einzelnen zweidimensionalen Tomographien zusammengesetzt werden können und Messwerte nur über einen Winkelbereich von 180° benötigt werden.

Bei Röntgen-Kegelstrahlen muss das gesamte dreidimensionale Volumen auf einmal berechnet werden (Feldkamp-Algorithmus) und erfordert den vollen Winkelbereich von 360°.

Ein Nachteil der Parallelstrahlgeometrie ist die fehlende implizite Vergrößerung des Abbildes, wie sie mit einer Röntgenröhre durch die Fächer- oder Kegelstrahlgeometrie entsteht, d. h. die Bildauflösung wird in der Neutronen-Radiographie und Tomographie durch die Detektorauflösung begrenzt.

Detektion

Die Intensitätsverteilung der Neutronen nach dem Durchgang durch das Messobjekt wird vorzugsweise mit einem zweidimensional ortsauflösenden Detektor nachgewiesen. Da Neutronen elektrisch neutral sind, erfolgt ihr Nachweis indirekt, z. B. über eine Kernreaktion in einem Szintillator. Ein sehr gebräuchliches Material hierfür ist Zinksulfid (ZnS), das mit dem Neutronenabsorber Lithium (in Form von Lithiumfluorid) vermischt wird. Nach Absorption eines kalten oder thermischen Neutrons durch einen Li-Kern zerplatzt dieser in einen Helium-Kern oder Alpha-Teilchen und in einen Tritium-Kern, die zusammen eine Energie von 4,7 MeV mit sich tragen. Diese Reaktionsprodukte erzeugen durch Stoßionisation im ZnS Szintillationslicht, das mit einer geeigneten Kamera orts aufgelöst nachgewiesen wird.

Der aus der mittleren Reichweite dieser emittierten Kerne resultierende Leuchtfleck hat einen Durchmesser von ca. 0,1 mm und begrenzt damit die erzielbare Bildauflösung.

Im Fall von schnellen Neutronen erfolgt der Nachweis überwiegend über Rückstoßprotonen aus dem Bindeharz in dem die ZnS-Teilchen eingebettet sind. Das Neutron trifft auf ein Proton. Das durch den hierbei stattfindenden Energieübertrag beschleunigte Proton erzeugt wie oben bereits beschrieben durch Stoßionisation im ZnS Szintillationslicht, das nachgewiesen wird. Die Nachweiswahrscheinlichkeit ist für schnelle Neutronen allerdings deutlich geringer als für thermische Neutronen. Deshalb wird meist ein dickerer Szintillator eingesetzt. Zusammen mit der Tatsache, dass schnelle Neutronen vorwiegend unter kleinen Winkeln in Flugrichtung gestreut werden, beeinträchtigt dies die erzielbare Bildqualität, die im Bereich von ca. 1 mm liegt.

Neben diesen kamerabasierenden Detektorsystemen werden speziell für die Neutronen-Radiographie häufig auch Speicherfolien (Image Plates) eingesetzt.

Anmerkungen

Zu erwähnen ist, dass durch die Bestrahlung des Untersuchungsobjekts mit Neutronen eine Aktivierung desselben erfolgt, d. h. dieses bis zu einem gewissen Maße radioaktiv wird. Für nahezu alle technischen Materialien, mit Ausnahme von Silber und Kobalt, ist diese Aktivität aber so kurzlebig, dass die Untersuchungsobjekte bereits nach wenigen Stunden oder Tagen wieder freigegeben werden können.

Messsysteme am FRM-II

Am neuen Forschungsreaktor München II stehen nach Inbetriebnahme zwei Radiographie-/Tomographie-Anlagen zur Verfügung. Beide sind für Probengrößen bis ca. 1 m Durchmesser und 1 m Höhe ausgelegt. Das Probengewicht kann bis zu 400 kg betragen.

Die beiden Anlagen unterscheiden sich hinsichtlich der Energien der zur Durchstrahlung eingesetzten Neutronen. ANTARES (Advanced Neutron Tomography and Radiography Experimental System) verwendet hierfür kalte bzw. thermische Neutronen, NECTAR (Neutron Computed Tomography and Radiography Facility) schnelle (Spalt-) Neutronen.

Eine weitere Anlage, speziell für die Untersuchung kleiner Objekte bis zu 1 cm Durchmesser, ist geplant.

ANTARES

An der Anlage ANTARES (Bild 4) existiert ein thermisches bis kaltes Neutronenspektrum mit zwei wählbaren Kollimationen von $L/D=400$ und $L/D=800$. Dabei steht auf einer Fläche von max. $40 \times 40 \text{ cm}^2$ ein ebener Fluss von $1,2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. $3 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ zur Verfügung.

Als Detektorsysteme kommen eine gekühlte Slow-Scan-CCD-Kamera mit 2048×2048 Bildpunkten für statische Radiographie und Tomographie sowie eine gekühlte Kamera (1024×1024 Bildpunkte) mit vorgeschaltetem, gatebaren Bildverstärker für stroboskopische Radiographien periodischer Vorgänge zum Einsatz. Dabei können die Kameras auf variable Bildgrößen bis zur oben genannten Maximalgröße eingestellt werden.

Die Messzeit für Radiographien liegt im Sekundenbereich, für Tomographien beträgt sie je nach Anzahl der benötigten Winkelpositionen zwischen einer und drei Stunden.

NECTAR

NECTAR ist an der Konverteranlage des FRM-II aufgebaut (Bild 5). In zwei Konverterplatten aus Uran, die sich im Moderatortank des FRM-II befinden, werden durch Kernspaltung schnelle (Spalt-) Neutronen erzeugt. Diese gelangen über ein unmittelbar vor den Platten angebrachtes evakuiertes Strahlrohr in die sogenannte Beckenwandnische der Abschirmburg (Bild 6) und von dort weiter durch Öffnungen in den beiden Trennwänden sowie durch den Raum für medizinische Anwendungen zum eigentlichen Messplatz. Dieser befindet sich in etwa 10 m Abstand von den Konverterplatten.

Die gewünschte Strahlqualität kann mittels zweier Blenden, die sich auf der Filterbank in der Beckenwandnische befinden, eingestellt werden.

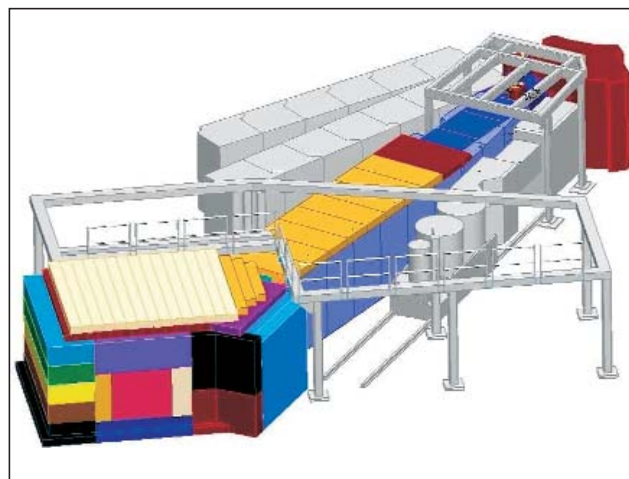


Bild 4: Tomographie-Anlage ANTARES, umgeben von anderen Messinstrumenten

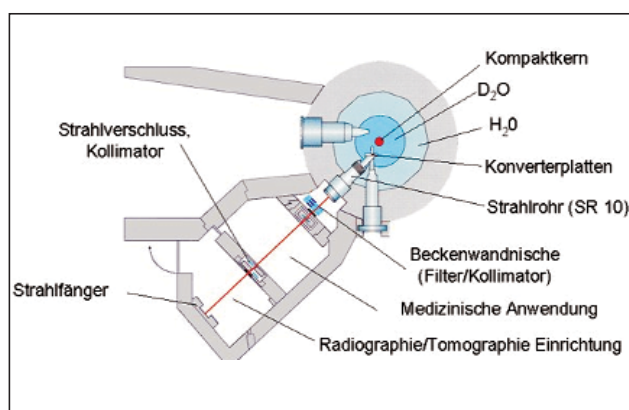


Bild 5: Grundriss der an der Konverteranlage aufgebauten Radiographie- und Tomographie-Anlage NECTAR



Bild 6: Blick auf die Abschirmburg bei leicht geöffneter Rückwand, in der sich NECTAR befindet

Derzeit sind L/D Werte von 100 und 300 möglich. Dies entspricht schnellen Neutronenflüssen von $6,4 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ und $7,2 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bei Strahldurchmessern (FWHM) von 37 cm und 31 cm.



Bild 7: Blick in den Messraum von NECTAR. Links ist der Manipulator für das Messobjekt zu erkennen (der Manipulator von ANTARES ist nahezu baugleich), im Hintergrund die Vorrichtung für die Positionierung des zweidimensional ortsauflösenden Detektorsystems auf der Basis einer stickstoffgekühlten CCD-Kamera

Im eigentlichen Messraum wird das auf dem Probenmanipulator befindliche Messobjekt von den schnellen Neutronen durchleuchtet und anschließend von einem Detektorsystem nachgewiesen (Bild 7).

Derzeit stehen zwei Systeme zur Verfügung: Ein zweidimensional ortsauflösendes System auf der Basis einer CCD-Kamera sowie ein System aus vier kollimierten Einzelstrahldetektoren, das speziell bei Untersuchungen Anwendung findet, bei denen die Bildqualität durch zu starke Streuteile oder zu hohen Gamma-Strahlungsuntergrund beeinträchtigt wird.

Da schnelle (Spalt-) Neutronen nur an einem Strahlrohr am FRM-II verfügbar sind, muss die verfügbare Messzeit mit der medizinischen Anwendung, hauptsächlich handelt es sich hierbei um die Tumorthherapie, die ebenfalls Neutronen dieser Energie verwenden, geteilt werden.

Vergleich mit anderen Anlagen

Um die Qualität der beiden am FRM-II aufgebauten Anlagen besser einschätzen zu können, sind nachfolgend die wichtigsten Kenndaten der beiden zur Zeit leistungsfähigsten Anlagen der Welt zusammengefasst.

Die derzeit bestauflösende Anlage steht am PSI, mit Kollimationsraten von $L/D=150$ bis $L/D=550$ bei thermischen Flüssen von $2,5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $3,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bei einem Strahldurchmesser von 15 bis 30 cm. Die derzeit größte Strahlintensität ist am ILL verfügbar, wo bei einer Kollimationsrate von $L/D=140$ und einer Strahlfläche von 20 cm x 20 cm ein thermischer Fluss von $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ verfügbar ist. Durch Einbauten eines vorgelagerten Experiments im Strahlengang kann die Bildqualität hier jedoch nicht weiter gesteigert werden.

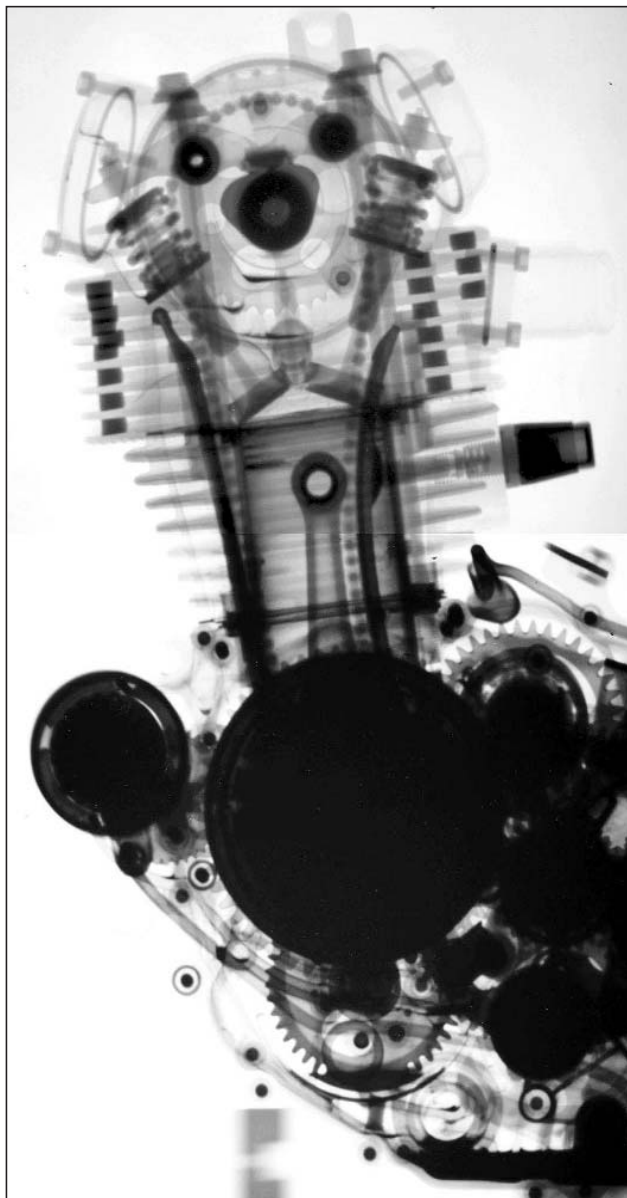


Bild 8: Radiographie eines Motorrad-Motors (PSI). Das Öl wurde für diese Aufnahme teilweise abgelassen, Reste sind unten im Kurbelgehäuse zu sehen. Dieser Motor wurde im elektrisch geschleppten Betrieb mit einer Zeitauflösung von 200 μs am ILL gemessen

Eine Radiographie- und Tomographie-Anlage mit schnellen (Spalt-) Neutronen, die auch für die industrielle Nutzung eingesetzt wird, ist den Autoren nicht bekannt.

Anwendungsbeispiele

Da die Systeme am FRM-II noch nicht im Routinebetrieb sind, wurden nachfolgende Beispiele an Messplätzen am Paul-Scherrer-Institut (PSI) und am Institut Laue Langevin (ILL) aufgenommen.

Wie oben dargelegt, werden die erzielbaren Ergebnisse am FRM-II von zumindest vergleichbarer Qualität, voraussichtlich aber deutlich besser sein. Dies liegt zum einen an der gegenüber dem PSI deutlich größeren Quellstärke, zum anderen an der wesentlich besseren Strahlgeometrie gegenüber dem ILL.

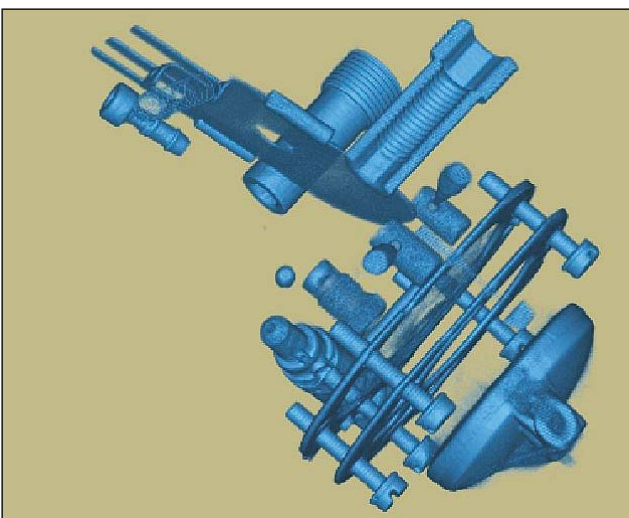
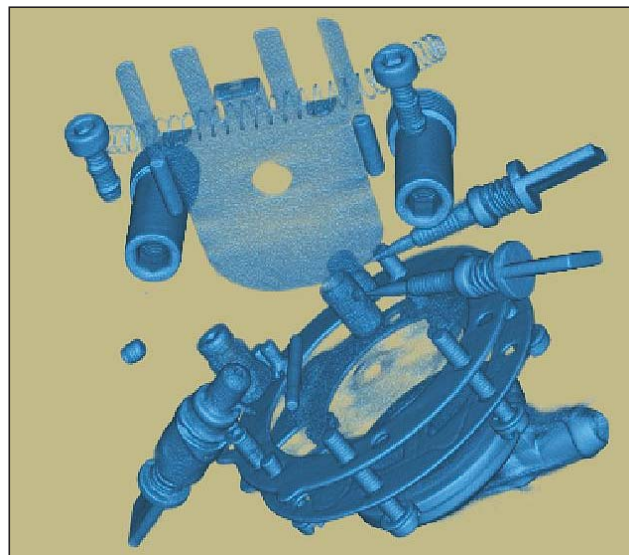
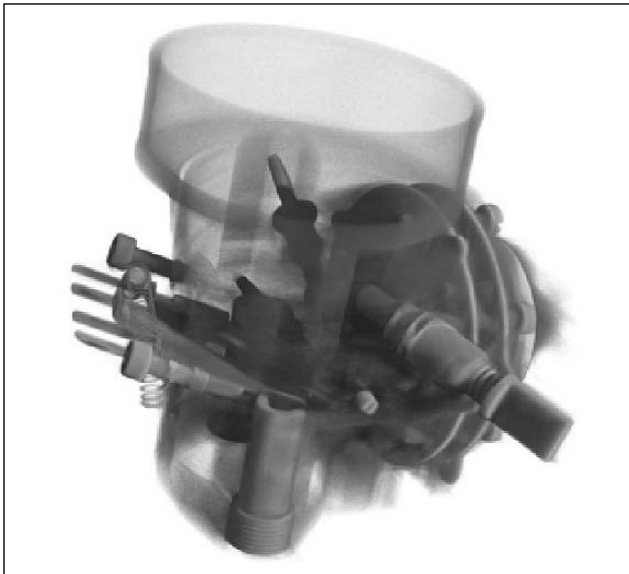


Bild 9 - 11: 3D-Tomographie eines Vergasers, gemessen am PSI. Im ersten Bild ist das ganze Objekt teiltransparent dargestellt, in den anderen Bildern wurden einige Teile aus verschiedenen Materialien mittels Bildverarbeitung ausgeblendet

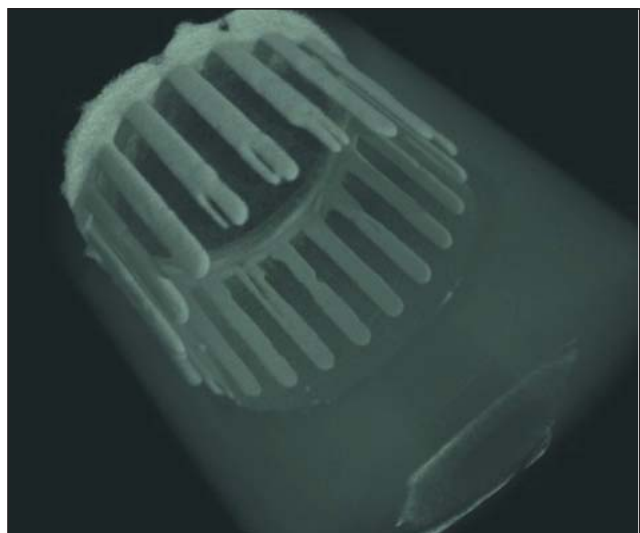
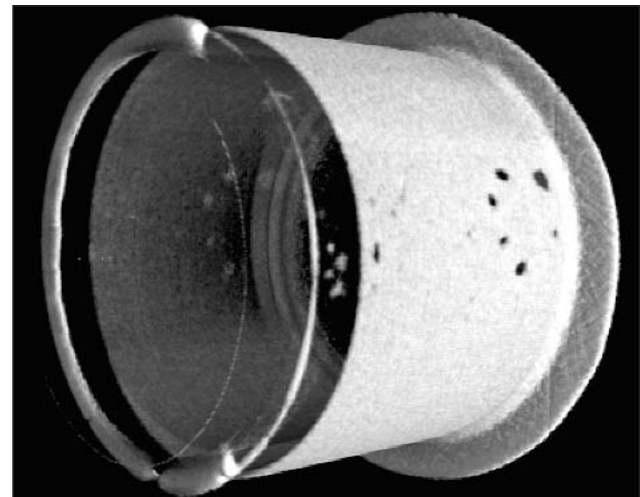


Bild 12-14: Prüfobjekt aus zwei ineinander verklebten Aluminiumzylindern, der erste Satz glatt, der zweite mit eingefrästen Rillen (gemessen am alten FRM). Per Bildverarbeitung wurde im ersten 3D-Datensatz das Aluminium vollständig ausgeblendet, im zweiten sehr transparent dargestellt. Am Boden sind Reste des Klebbandes zur Befestigung zu sehen. Nachweisbar sind mit der Neutronen-Tomographie Schichten von unter einem Zehntelmillimeter Klebstoff oder Lack

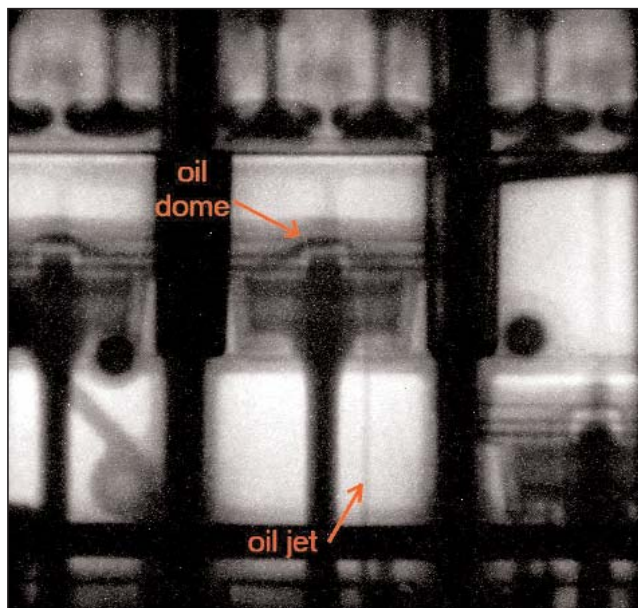


Bild 15: Stroboskopisch aufgenommene Radiographie eines bei 1000 U/min elektrisch geschleppten Automotors (ILL). Dazu wurde bei jeder zweiten Umdrehung (Viertakter!) für ein Zeitfenster von 200 μ s der Detektor geöffnet und die Bildinformation integriert, bis die Dynamik für diese Aufnahme ausreichend war. Gut zu sehen ist die Ölkühlung der Kolben: Durch eine Düse wird ein feiner Strahl an die Kolbenunterseite gespritzt, um dessen Temperatur zu senken. Der sich ausbildende „Dom“ ist nur bei Abwärtsbewegung des Kolbens so ausgeprägt

Messergebnisse mit schnellen (Spalt-) Neutronen können aufgrund der Einmaligkeit von NECTAR noch nicht gezeigt werden.

Anwendungen für Neutronen finden sich überall dort, wo Probleme mit Röntgenstrahlen nicht zu lösen sind. Typische Beispiele sind Flüssigkeitsstände in Prozesskammern, Sitz von Dichtungen, Verklebungen, Feuchte in Baustoffen und Verbundmaterialien wie zum Beispiel Hubschrauber-Rotorblättern, Schmiermittel in Getrieben, Gasblasen in Flüssigkeiten wie z. B. bei Direkt-Methanol-Brennstoffzellen, Kühlkanäle in Turbinenschaufeln, Verkokung von Brennerdüsen in Gasturbinen, pyrotechnische Elemente in der Raumfahrt (Sprengbolzen, Sprengstoffverteilung), archäologische Proben (Inhalt korrodierter Metallobjekte) und Verbunde verschiedener Metalle (z. B. Ventillführungen in Zylinderköpfen) sowie die Durchleuchtung von Bleibehältern.

Mit immer empfindlicheren Detektoren und stärkeren Quellen werden auch bewegte Vorgänge untersucht. So werden schon seit einiger Zeit mit Videogeschwindigkeit der Kühlmittelfluss in Kühlschränken und Motoren (KFKI) und das Verhalten von Schmelzen (CEA Saclay) untersucht.

Seit kurzem entwickeln die TU München, PSI, ILL und die Universität Heidelberg gemeinsam die stroboskopische Kurzzeit-Radiographie schneller periodischer Vorgänge mit Einzelbelichtungszeiten im Bereich von 100 Mikrosekunden und darunter. Mit elektrisch geschleppten Automotoren sowie einem selbstlaufenden Modellflugzeugmotor ist dies bereits erfolgreich durchgeführt worden. Ziel dieser Forschung ist es, den Einspritzvorgang und die Ölverteilung an selbstlaufenden Automotoren sichtbar zu machen.

Solche Untersuchungen sind nur an Hochflussreaktoren wie dem ILL Grenoble und künftig dem FRM-II möglich.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag soll einen Überblick der möglichen Einsatzgebiete der Radiographie und Tomographie mit Neutronen geben. Er soll aber auch verdeutlichen, dass der Einsatz von Neutronen in der Regel nur dann in Betracht kommt, wenn herkömmliche Methoden, wie z. B. die Röntgen-Radiographie und Tomographie nicht die gewünschten oder geforderten Informationen liefern können, d. h. wenn „Neutronen sehen, was Röntgenstrahlen verborgen bleibt“. Beispiele hierfür wurden im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt.

Industrielle Neutronenuntersuchungen sind schon jetzt etwa zum Preis von Röntgenuntersuchungen am PSI und am KFKI erhältlich. Mit Aufnahme des Routinebetriebs des FRM-II wird dieser Service auch hier möglich sein.

Interessierte Fachkollegen aus der Zerstörungsfreien Prüfung seien nochmals auf das „5th International Topical Meeting on Neutron Radiography (ITMNR-5)“ hingewiesen, das vom 26. bis 30. Juli in Garching abgehalten wird (www.isnr.de). Dort können sie sich vor Ort ein Bild von den Möglichkeiten dieser Prüfmethoden mit Neutronen machen.

Danksagung

An dieser Stelle sei recht herzlich den Kollegen am PSI und am ILL gedankt, die es uns völlig unkonventionell ermöglicht haben, auch in der in Garching „neutronenlosen“ Zeit weiterhin Radiographien und Tomographien mit Neutronen aufzunehmen. An erster Stelle seien hier vom PSI Dr. Eberhard Lehmann und sein Team genannt, mit dem wir seit Jahren eng zusammenarbeiten und der uns viele Messungen ermöglichte, weiterhin Dr. Roland Gähler (ILL) und die Gruppe Gildemeister et al. der Universität Heidelberg, mit denen wir zusammen am ILL die Messungen zur stroboskopischen Radiographie durchführen konnten.

Literatur

- [1] P. Maier, G. Pfister et al. (1986). Progress in Neutron Tomography for Non-Destructive Testing, Neutron Radiography, Proceedings of the Second World Conference, Paris.
- [2] T. Bücherl, E. Steichele (1989). Contrast Variation in Neutron Computer Tomography by Change of the Neutron Wavelength. Third World Conference on Neutron Radiography, Osaka, Japan, 14-18 May 1989, ISBN 0-7923-0832-8, Kluwer Academic Publishers.
- [3] T. Bücherl, C. Rausch, et al. (1993). Quantitative measurements on thermal neutron detectors based on storage phosphors. Nucl. Instr. Meth. Physics Research A 333: 502-506.
- [4] B. Schillinger: Neutron Tomography, in: Neutron Scattering in Novel Materials (Ed. A. Furrer), World Scientific, 2000.
- [5] I. Manke, N. Kardjilov et al. Zerstörungsfreie Messmethoden am Hahn-Meitner-Institut, ZfP-Zeitung, Februar 2004, Ausgabe 88, 31ff.

Dr. Burkhard Schillinger entwickelte während seiner Diplomarbeit den ersten großflächigen CCD-Detektor für Neutronen in Europa und entwickelte daraus während seiner Promotion die 3D-Neutronentomographie zur Anwendungsreife.

Zusammen mit dem PSI (Dr. Lehmann et al.) entwickelte und initiierte er viele der heute gängigen Methoden zur Neutronenradiographie und -tomographie.

1997 erhielt er dafür die Schiebold-Gedenk-Münze der DGZfP.

Derzeit ist er als Projektleiter für den Aufbau und Betrieb der Radiographie- und Tomographie-Anlage ANTARES für thermische und kalte Neutronen am FRM-II tätig.

Kontakt: E-Mail: Burkhard.Schillinger@frm2.tum.de

Dr. Thomas Bücherl studierte Physik an der Technischen Universität München. In seiner Diplomarbeit und während seiner Promotion arbeitete er auf dem Gebiet der Neutronen-Radiographie und Tomographie.

Seit 1993 ist er am Institut für Radiochemie der TU München tätig. Das Aufgabengebiet wechselte zu wissenschaftlichen Fragestellungen, die bei der zerstörungsfreien Charakterisierung radioaktiver Abfälle auftreten.

Seit einigen Jahren ist er auch wieder auf dem Gebiet der Neutronen-Radiographie und Tomographie tätig, vornehmlich als Projektleiter für den Aufbau und Betrieb der Radiographie- und Tomographie-Anlage NECTAR für schnelle (Spalt-) Neutronen am FRM-II.

Kontakt: E-Mail: Thomas.Buecherl@radiochemie.de