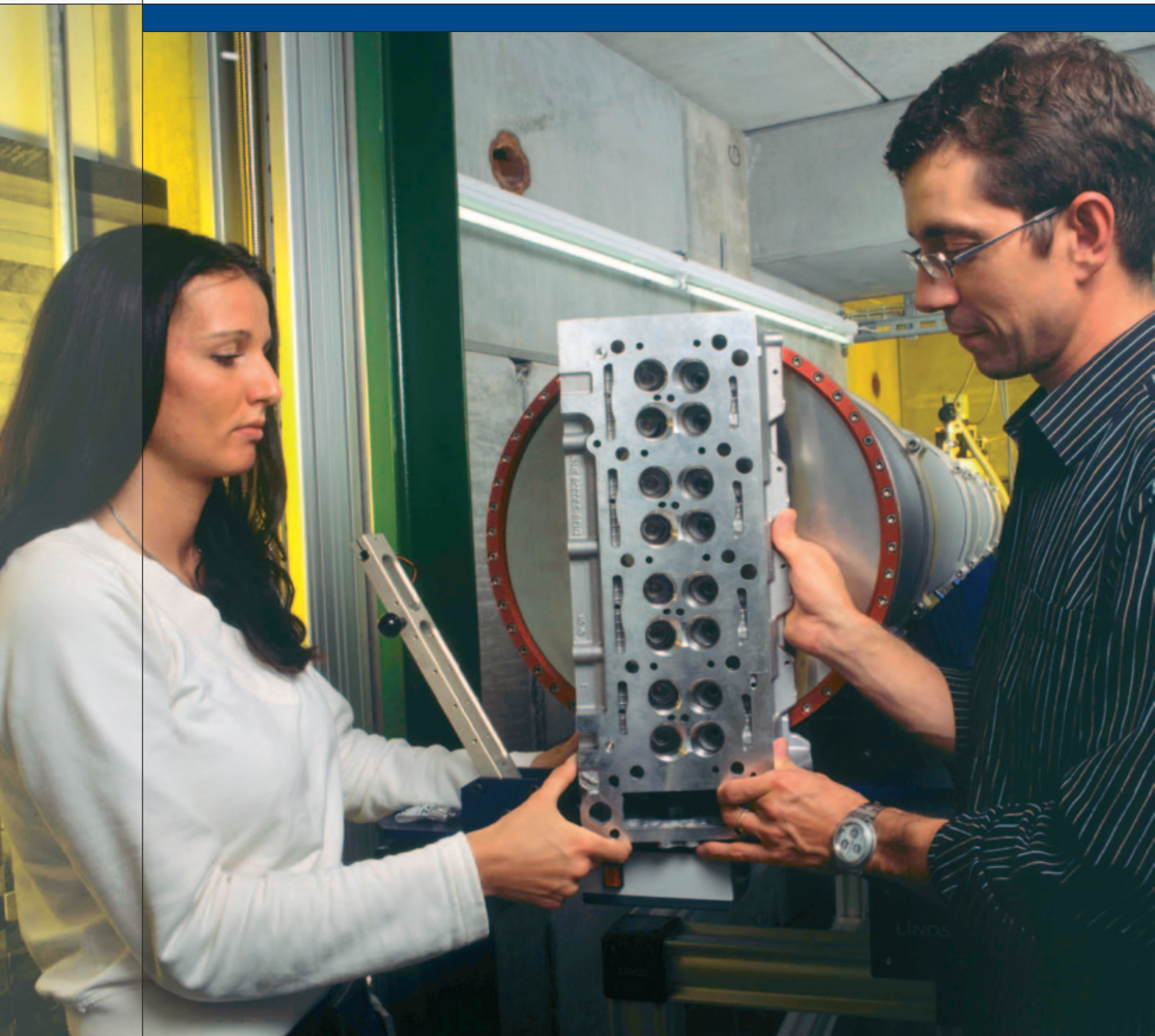
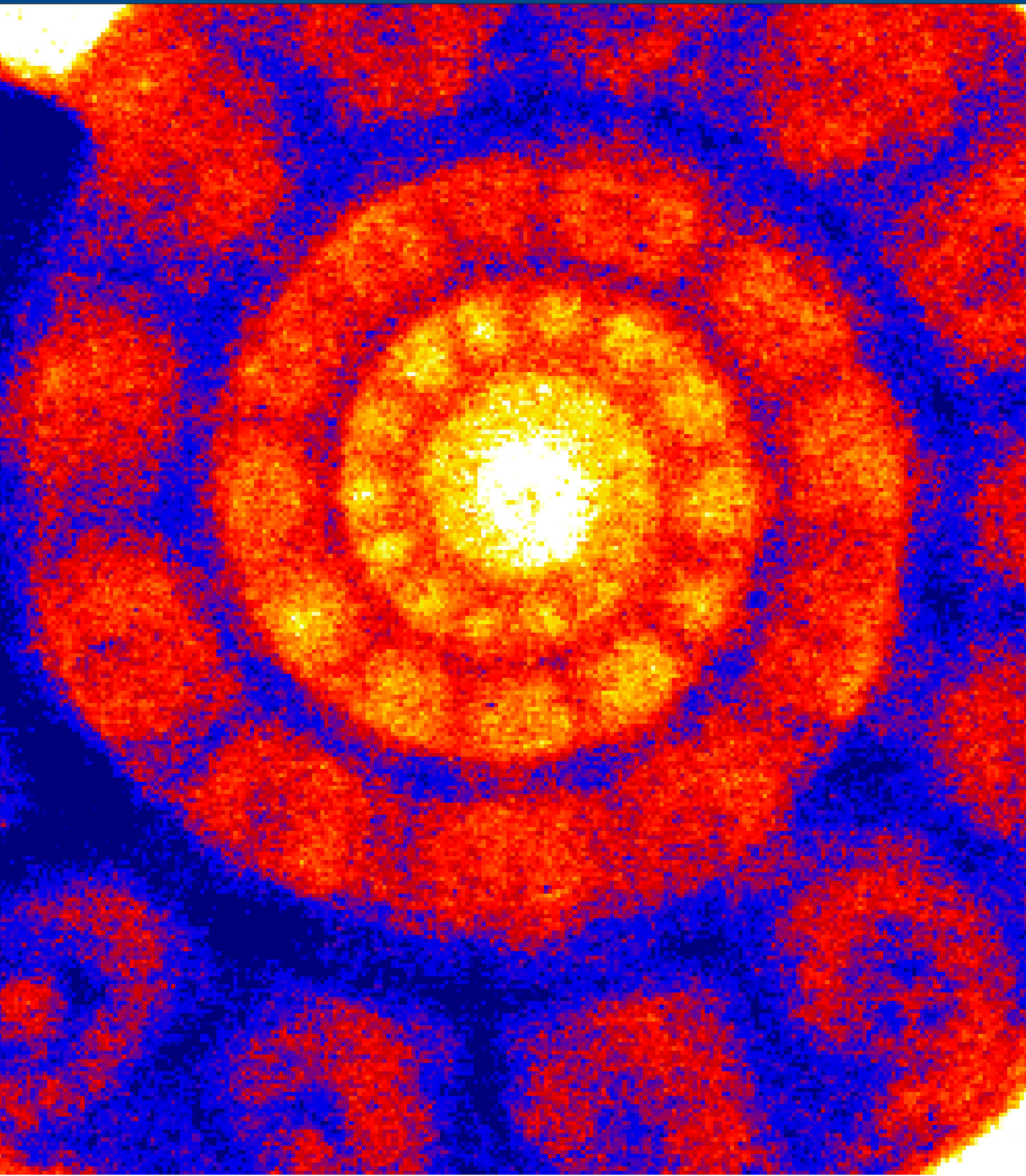


Neutron Imaging

Wie Neutronen Bilder machen



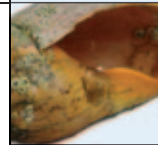
Mit Neutronen durchleuchtet: spiralförmige Versteinerung eines winzigen Ammoniten (Durchmesser 20 mm).



Inhalt

5 Bilder der besonderen Art

- 5 Viel Know-how ist nötig
- 7 Zerstörungsfreie Prüfung



9 Radiografie – das Prinzip

- 9 Neutronen als Infolieferanten
- 10 Eigenschaften des Neutrons
- 10 Unterschiede zur Röntgenstrahlung
- 11 Grosser Unterschied bei Blei



13 Brennstoffzellen und Bronzeskulpturen

- 13 Wie sich Feuchte ausbreitet
- 14 Bronzeskulpturen aus der Renaissance
- 14 Effizientere Brennstoffzellen
- 14 Klebefehlstellen sichtbar machen
- 15 Erkenntnisse in der Paläontologie
- 15 Untersuchung von Kernbrennstoff



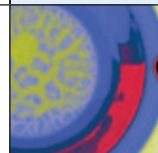
17 Eine Quelle, zwei Möglichkeiten

- 17 Ohne spaltbares Material
- 18 Strahllinie ICON – neue Möglichkeiten
- 20 Die Strahllinie NEUTRA – der Klassiker
- 21 NEUTRA und ICON ergänzen und unterscheiden sich



23 Schwierig abzubildende Strahlungen

- 23 Anwendung bestimmt den Typ
- 25 Von der Radiografie zur Tomografie
- 26 Wenn Radiografie mit der Zeit geht
- 27 Aus dem vollen schöpfen
- 27 Phasenkontrast verstärkt die Kanten und vergrössert das Objekt



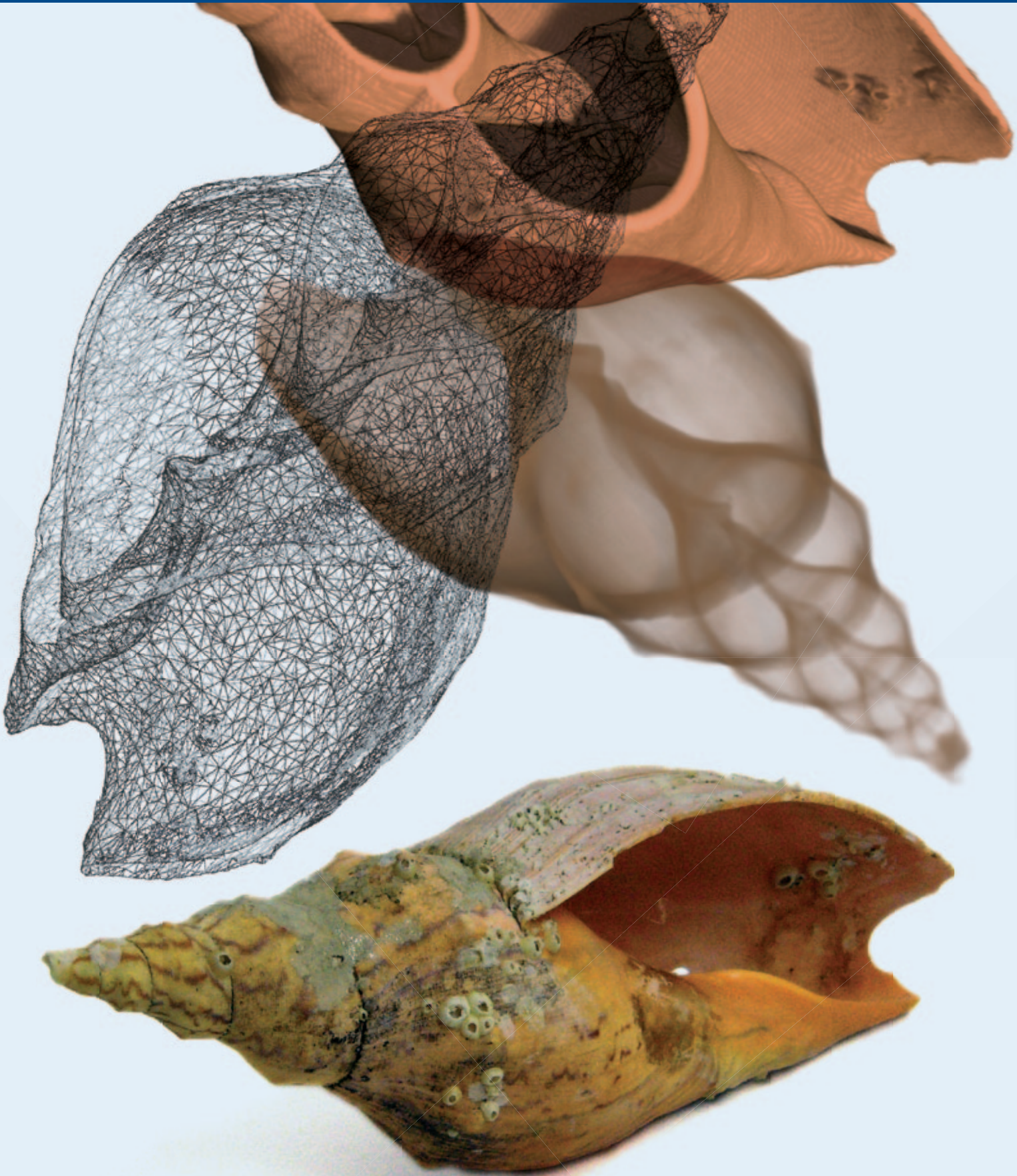
29 Methoden weiter verfeinern

- 29 Bekanntheitsgrad steigern



Umschlagbild: Einrichten eines Messobjekts (Motorblock) an der ICON-Anlage, die für Messungen mit kalten Neutronen ausgelegt ist.

Mit den Tomografiedaten einer Muschel kann ihre dreidimensionale Struktur erfasst und ein numerisches Oberflächenmodell erstellt werden.



Bilder der besonderen Art

Neutronen ermöglichen Blick ins Innere

Neutron Imaging ist ein Verfahren, um Bilder der besonderen Art herzustellen. Mit dieser Methode können Forscher zum Beispiel einen Blick in einen Fotoapparat werfen, ohne diesen zu öffnen.

Es gibt verschiedene Methoden, die es erlauben, ins Innere von Objekten zu blicken, ohne diese zu zerstören. Röntgenstrahlen, die oft für medizinische Zwecke eingesetzt werden, sind eine bekannte Methode. Eine weniger bekannte, aber nicht minder aussagekräftige Methode ist die Bildgebung mit Hilfe von Neutronen (Neutron Imaging, früher Neutronenradiografie).

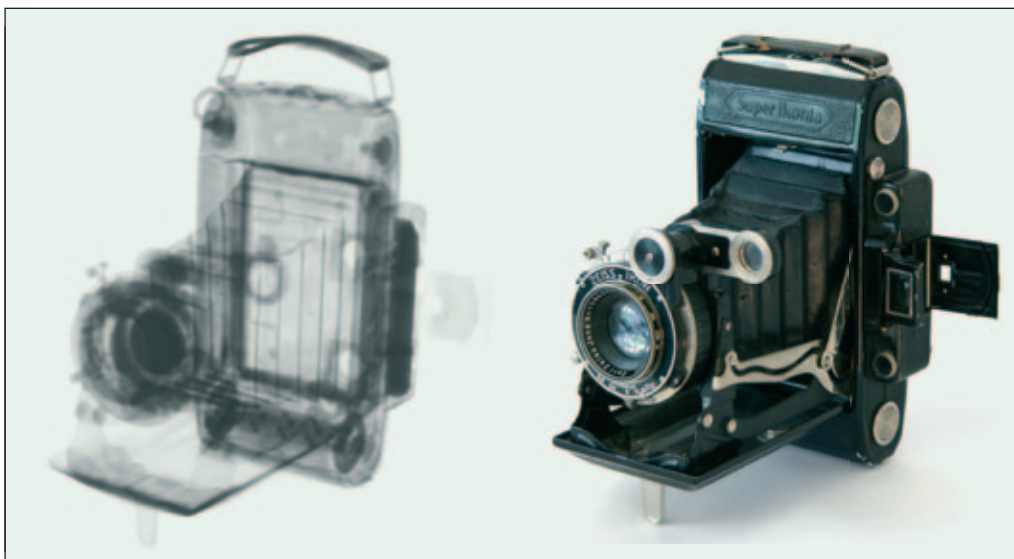
Im Gegensatz zu Röntgenstrahlen vermögen Neutronen schwere Metalle wie Blei oder Uran zu durchleuchten. Der Neutronenstrahl hat weitere Vorteile: Auch bei feinen organischen Stoffen oder bei Wasser ist er der Strahl der Wahl. Es kommt daher auf das Material an, ob Neutronen vorteilhafter sind oder das konventionelle Röntgen. Neutron Imaging stellt eine hochwertige Ergänzung und Alternative zur konventionellen Röntgentechnik dar. Dank dieser Methode können Forscher

Bilder vom Inneren von Objekten anfertigen, wenn andere Methoden versagen.

Viel Know-how ist nötig

Neutron Imaging hat jedoch auch einen Nachteil: Die Herstellung von Neutronen ist nicht trivial. Um hinreichend starke und qualitativ hochwertige Neutronenstrahlen zur Verfügung zu haben, sind eine Grossanlage und viel Know-how nötig. Die Technik eignet sich daher nicht für alltägliche Tests. Alle Untersuchungen mit Neutronen müssen vor Ort durchgeführt werden.

Am PSI liefert die Grossforschungsanlage SINQ die Neutronen, die für die Experimente benötigt werden. Die SINQ wurde 1996 in Betrieb genommen und löste den 1957 fertiggestellten Forschungsreaktor SAPHIR ab. Die exzellente Infrastruktur rund um die SINQ ermöglicht es, bei Untersuchungen nicht nur Einzelproben, sondern auch ganze Abläufe und Strukturveränderungen zu studieren.



Reale Welt (Foto rechts) und transparente virtuelle Realität (links) eines Fotoapparats. Mit Neutronen können innere Strukturen erfasst und dargestellt werden.

Eine Brennstoffzelle wird zur Untersuchung an der neuen Neutronenradiografie-Anlage ICON installiert.



Zerstörungsfreie Prüfung

Die möglichen Anwendungen von Neutron Imaging liegen auf der Hand. Zerstörungsfreie Methoden werden benötigt, wenn die Funktionsfähigkeit und das Äussere von Gegenständen durch die Untersuchungen nicht verändert werden dürfen. Neutron Imaging kann mögliche innere Fehlstellen und Materialveränderungen direkt sichtbar machen. Dies trifft in erster Linie für sicherheitsrelevante, teure oder einmalige Objekte zu. Deshalb kommt Neutron Imaging vor allem in der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz, im Automobilbau, aber auch bei der Untersuchung von Museumsobjekten.

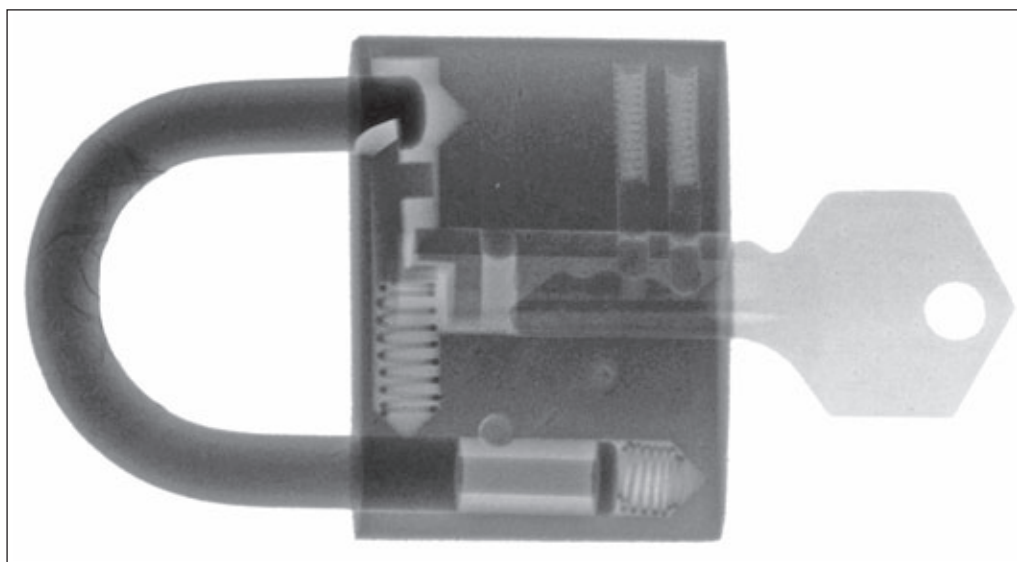
Die Neutronen, die bei einer solchen Untersuchung auf das Objekt treffen, können dessen Materialschichten durchdringen, ohne diese zu zerstören oder anzugreifen. Wie im Bild unten gezeigt, liefert die unterschiedlich starke Abschwächung des Neutronenstrahls die Möglichkeit, Aussagen über das Objekt zu machen und im besten Falle Eigenschaften wie Qualität bzw. innere Funktionalität zu bewerten.

Was sind Neutronen?

Neutronen sind elementare Bestandteile der Materie; alle Atomkerne ausser jene von Wasserstoff bestehen aus Protonen und Neutronen. Neutronen können nur durch eine Kernreaktion freigesetzt werden. Als freie Teilchen und in Form gerichteter Strahlen können verschiedenartige Experimente mit ihnen durchgeführt werden. So entstehen z. B. Bilder, wie sie in dieser Broschüre zu sehen sind.

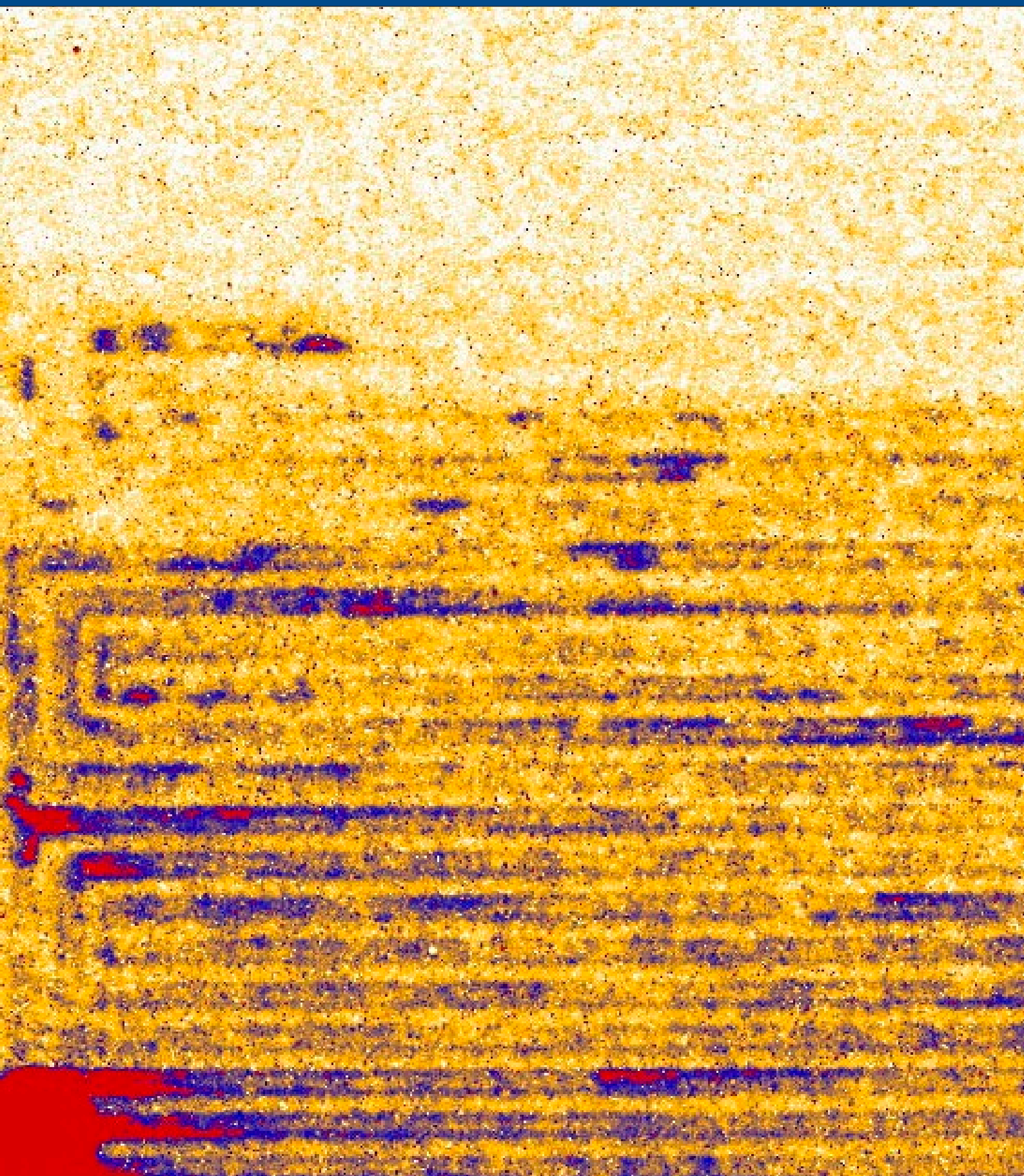
Was sind bildgebende Verfahren?

Als bildgebende Verfahren bezeichnet man die Gesamtheit aller Techniken, mit denen beispielsweise medizinische Befunde sowie physikalische und chemische Phänomene visualisiert werden. Dazu gehören etwa Fotografie, Röntgentomografie, Positronen-Emissions-Tomografie (PET), Magnetresonanztomografie (MRT) oder Neutron Imaging.



Die verschiedenen Metallteile des Schlosses lassen sich in voller Funktionalität analysieren.

Neutronenradiografie einer Brennstoffzelle: Zu viel Wasser (violett-rote Bereiche) beeinträchtigt den Antransport von Sauerstoff und damit die Leistungsfähigkeit.



Radiografie – das Prinzip

Von der Quelle zum Detektor

Unter dem Begriff «Radiografie» versteht man die Erzeugung von Bildern auf Film oder digitalen Datenträgern mittels Durchstrahlung von Objekten. Die wohl bekannteste Radiografie ist die Röntgen-Radiografie: Dazu gehören Röntgenuntersuchungen beim Zahnarzt oder bei Knochenbrüchen sowie Computer-Tomografien (CT), die Bilder aus dem Körperinneren liefern (Radiografien sind zweidimensional, Tomografien dreidimensional).

Die Röntgen-Radiografie wird aber nicht nur in der Medizin verwendet, sondern hat ein breites Anwendungsfeld in der Industrie gefunden. Weitere wichtige bildgebende Verfahren, die sowohl in der Medizin als auch für die zerstörungsfreie Untersuchung von Werkstoffen Verwendung finden, sind Ultraschall und Magnetresonanz.

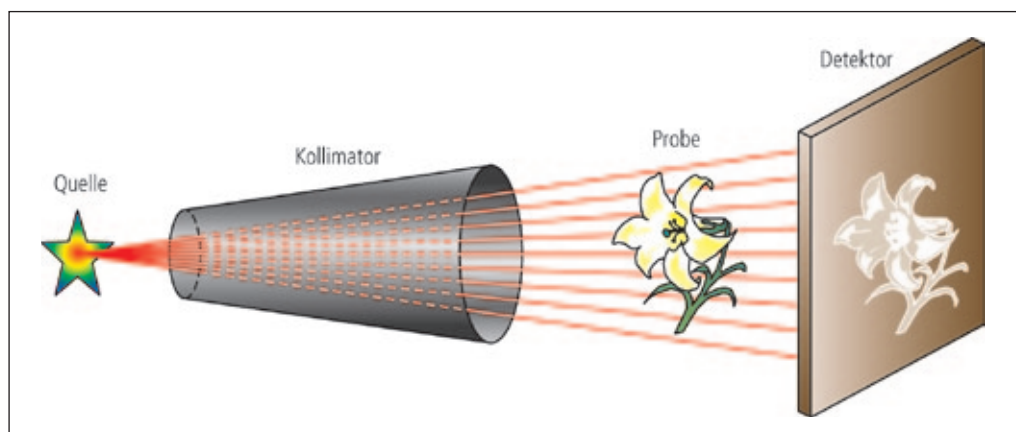
Neutronen als Infolieferanten

Immer mehr etabliert sich auch das Neutron Imaging für die zerstörungsfreie Materialuntersuchung – sei es als Ergänzung zur Röntgen-Radiografie oder als die einzige Möglichkeit überhaupt. Das Neutron Imaging funktioniert im Prinzip gleich wie die Röntgenradiografie, es gibt aber ein paar wesent-

liche physikalische Unterschiede, die ausmachen, dass Neutron Imaging Informationen liefern kann, die mit Röntgenstrahlen nicht gewonnen werden können.

Das Prinzip einer Radiografie-Anlage ist im Bild unten dargestellt. Neben der Strahlungsquelle (Röntgenanlage oder Neutronenquelle SINQ) braucht es speziell für Neutronen einen evakuierten Kollimator, durch den die Neutronen geleitet werden, bevor sie auf das zu untersuchende Objekt treffen. Der Detektor hinter der Probe liefert eine zweidimensionale Darstellung der in der Probe mehr oder weniger stark abgeschwächten Strahlung. Auf diese Weise gelingt es, Informationen über innere Eigenschaften bzw. Strukturen der Probe zerstörungsfrei zu gewinnen. Wird die Probe im Strahlungsfeld Schritt für Schritt gedreht, kann durch spezielle Rekonstruktionsverfahren im Computer eine Tomografie, also eine dreidimensionale Darstellung, erzeugt werden.

Das vereinfachte Schema im Bild unten ist in der Realität eine komplexe Anlage (Seite 19), da für optimale Bildqualität eine möglichst starke Strahlungsquelle benötigt wird. Deshalb muss den Anforderungen des Strahlenschutzes Rechnung getragen werden, indem die Anlage in einem Raum



Prinzip der Radiografieanlage: Ein Flächendetektor, der hinter der Probe angeordnet ist, erfasst die von der Quelle ausgehende Strahlung und ermittelt so die Abschwächung in der Probe.

untergebracht wird, der speziell gesichert und gegen die verwendete Art der Strahlung abgeschirmt ist.

Eigenschaften des Neutrons

- Neutronen sind neutrale, d. h. ungeladene Teilchen, die zusammen mit den positiv geladenen Protonen den Kern aller Atome bilden (ausser bei Wasserstoff).
- Ein freies Neutron ist nicht stabil, d.h. es ist radioaktiv. Es zerfällt mit einer mittleren Lebensdauer von rund 15 Minuten in ein Proton unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos.
- Da Neutronen elektrisch neutral sind, reagieren sie nicht mit den Elektronen, die jeden Atomkern umgeben. Deshalb können sie tief in Materie eindringen. Sie reagieren nur mit dem Atomkern, und zwar je nach Art des Atomkerns und der Energie des Neutrons ganz unterschiedlich. Es gibt Atomkerne, die Neutronen einfangen, wenn die Neutronen in ihre Nähe kommen und eine nicht allzu grosse Energie besitzen. Man spricht in diesem Fall von der Absorption von Neutronen. Materialien, die solche Atomkerne enthalten, eignen sich gut für die Abschirmung oder für die Detektion von Neutronen (z.B. Bor, Lithium, Cadmium, Gadolinium).

Andere Atomkerne reagieren praktisch nicht mit Neutronen, sie sind quasi durchsichtig für

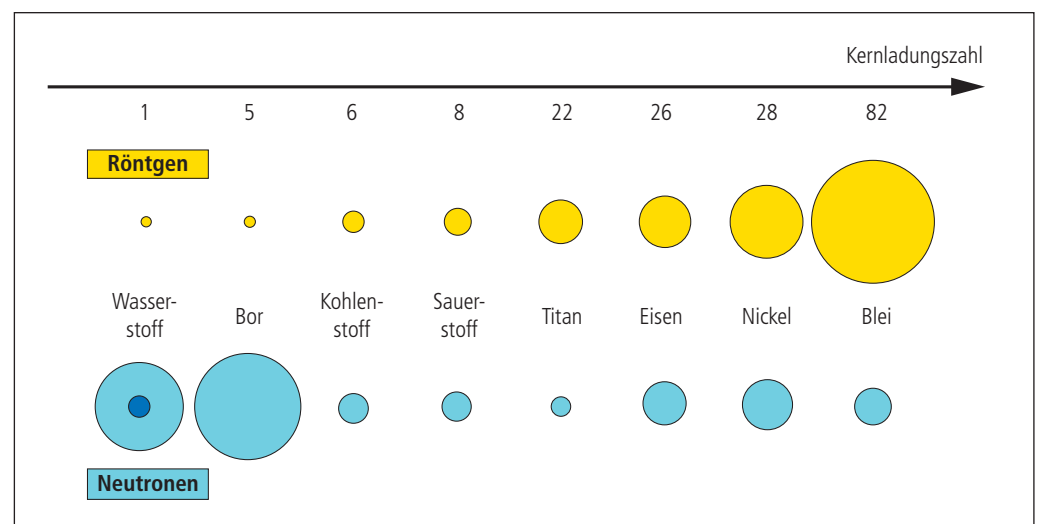
Neutronen, wichtige Beispiele sind Aluminium und Blei. Es gibt eine weitere Sorte von Materialien, welche die Neutronen mehr oder weniger stark aus ihrer Flugbahn ablenken (v.a. wasserstoffhaltige Substanzen). Man spricht dann von der Streuung von Neutronen.

- Neutronen können ganz unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen, je nachdem wie stark sie nach der Erzeugung abgebremst werden. Von ganz speziellem Interesse sind für die PSI-Forscher die sogenannten thermischen und die kalten Neutronen, weil sie sich besonders gut für Materialuntersuchungen eignen. Thermische und kalte Neutronen unterscheiden sich voneinander durch Energie oder Wellenlänge und reagieren deshalb unterschiedlich stark mit den Atomkernen der Probe und des Detektors. Je nachdem, ob man mit kalten oder thermischen Neutronen arbeitet, ändert sich dadurch der Kontrast der Bilder.

Unterschiede zur Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung ist elektromagnetische Strahlung und unterscheidet sich damit grundsätzlich von der Neutronenstrahlung. Röntgenstrahlung reagiert mit den Elektronen in der Elektronenhülle des Atomkerns. Somit steigt die Reaktionswahrscheinlichkeit von Röntgenstrahlen, je grösser die Atome sind, aus denen die zu untersuchende Probe besteht. Denn je grösser das Atom, umso mehr

Die Abbildung zeigt für verschiedene Materialien, wie stark die Wahrscheinlichkeit ist, dass sie mit Röntgen- oder Neutronenstrahlung wechselwirken.

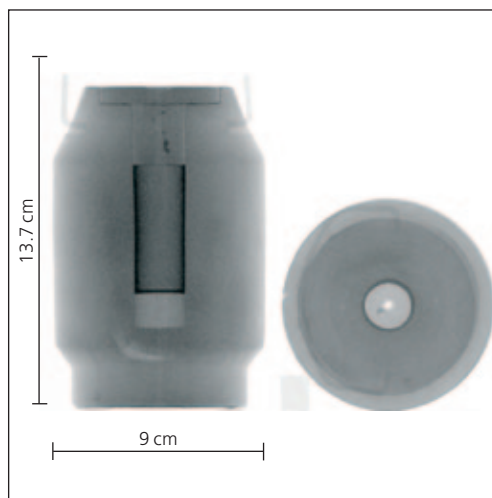


Elektronen besitzt es. Mit Röntgenstrahlen kann daher kein Bleibehälter untersucht werden, denn Blei ist ein relativ schweres Atom mit vielen Elektronen. Dies im Unterschied zur Reaktionswahrscheinlichkeit von Neutronen, welche keine solche Gesetzmässigkeit aufweist.

Grosser Unterschied bei Blei

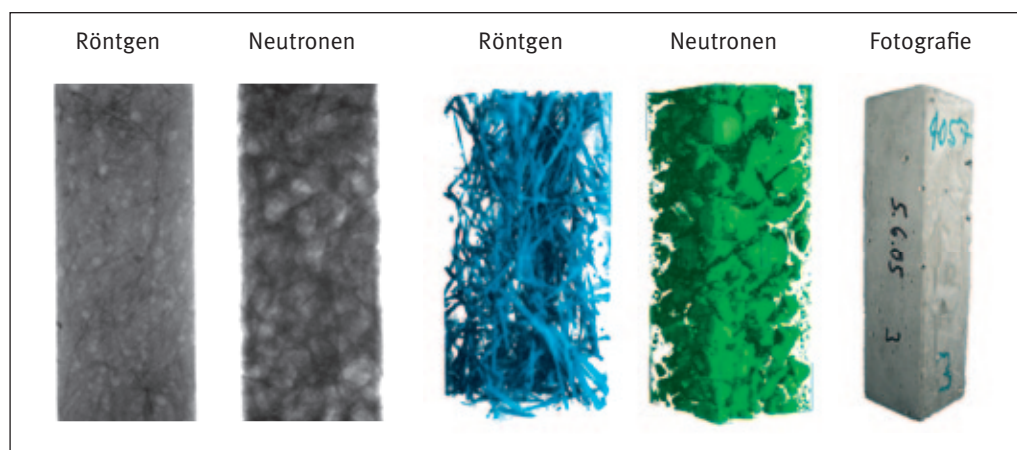
Im Bild links unten ist der Unterschied zwischen den Reaktionswahrscheinlichkeiten von Neutronen und Röntgenstrahlen grafisch dargestellt. Grosse Flächen bedeuten grosse Wahrscheinlichkeit für eine Reaktion. Besonders auffällig ist der Unterschied für Blei. Während Blei für Röntgenstrahlung als sehr wirksame Abschirmung verwendet wird, ist die Reaktionswahrscheinlichkeit für Neutronen sehr klein. Für Neutronen ist Blei fast «durchsichtig», wie das Bild rechts oben zeigt. Ein Bleibehälter mit vorerst unbekanntem Inhalt wurde mit Neutronen radiografiert. Die Aufnahme ergab, dass sich eine leere Plastikdose im Bleibehälter befand und dieser somit ohne Gefährdung geöffnet werden kann. Diese Plastikdose liefert wegen ihres Wasserstoffanteils einen viel stärkeren Kontrast als der Bleibehälter.

Neutronen- und Röntgenradiografie von demselben Objekt ergeben oft auch einander ergänzende Informationen, wie im Bild unten zu sehen ist. Eine Betonprobe mit Armierung zeigt die unterschiedlichen Effekte von Neutronen- und Röntgen-



Blei durchsichtig gemacht: Neutronen können ohne Mühe einen Bleibehälter durchdringen und einen leeren Plastikdose im Inneren abbilden.

strahlung besonders eindrücklich. Das grüne Bild zeigt eine Tomografie, die mit Neutronen erzeugt wurde. Man erkennt die wasserstoffhaltigen Bestandteile des Betons (Sand, Kies u.a.), während man von der Struktur des Armierungseisens nichts sieht. Im blauen Bild hingegen erkennt man praktisch nur die Verteilung des Armierungseisens. Dies ist eine Röntgen-Tomografie. Die beiden Bilder ganz links sind Radiografien desselben Objektes. Auch wenn in diesen Aufnahmen Unterschiede zu erkennen sind, können die tomografischen Aufnahmen strukturelle Unterschiede besser darstellen.



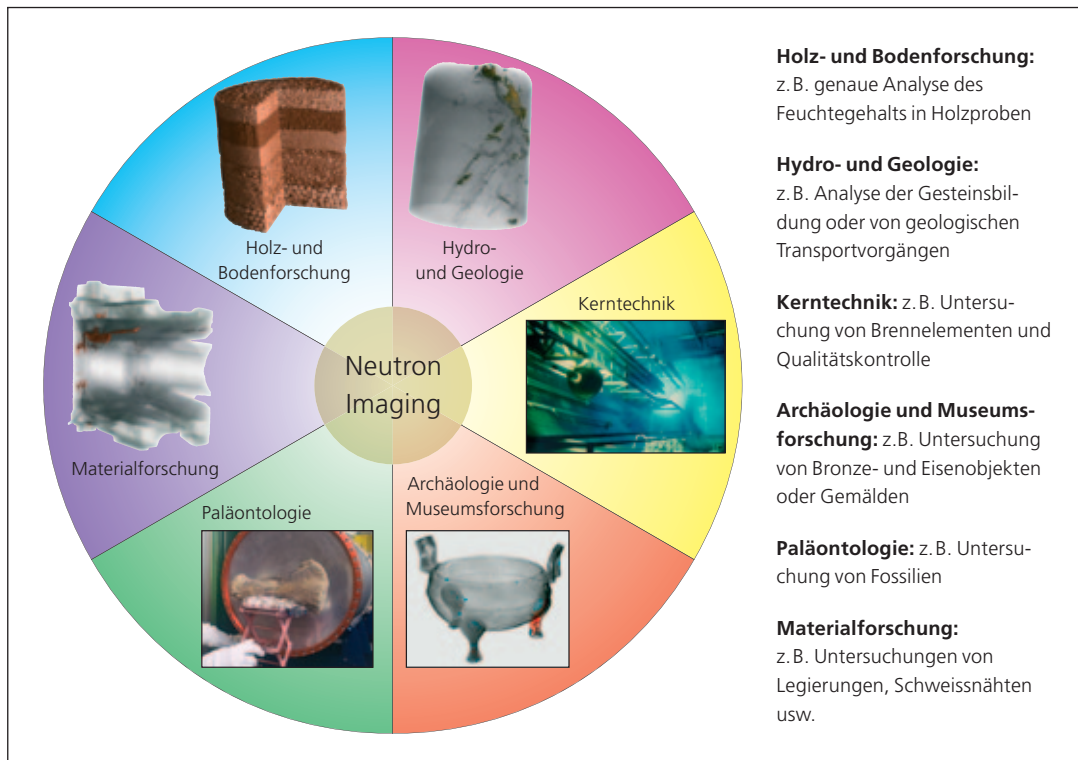
Die beiden Bilder links sind Radiografien einer armierten Betonprobe (Foto rechts). Das blaue und grüne Bild sind Tomografien.

Ein Einfüllstutzen für Benzin wird zur Untersuchung an der Neutronenradiografie-Anlage ICON montiert. Rechts die Radiografie.



Brennstoffzellen und Bronzeskulpturen

Anwendungen des Neutron Imaging



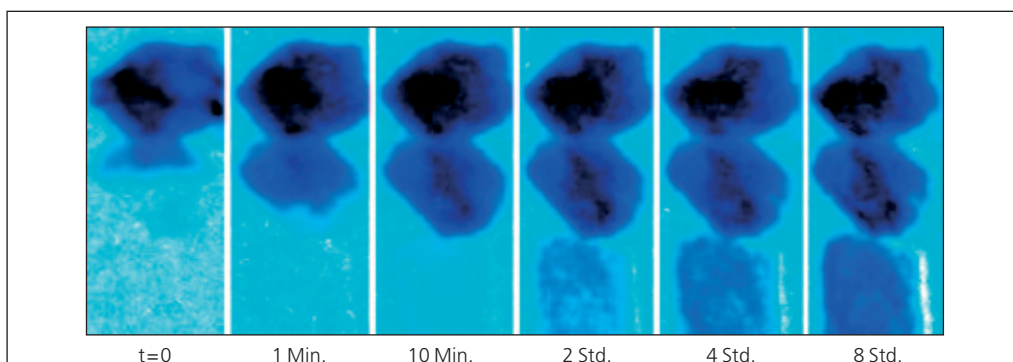
Breites Anwendungsspektrum in Wissenschaft und Technik.

Wie sich Feuchte ausbreitet

Wie und unter welchen Bedingungen sich Feuchte in Bodenstrukturen ausbreitet – dieses wichtige und drängende Problem wird immer noch nicht ganz verstanden. Mit Hilfe neutronischer Untersuchungen kann in einem zeitlichen Ablauf die Durchfeuchtung von Bodenkörnern (Agglomera-

ten) beobachtet und später mit Modellen verglichen werden (Bild unten).

Die Geschwindigkeit des Feuchteaustausches wird bestimmt durch die Benetzungsfläche: Je grösser die Benetzungsfläche, umso rascher fließt die Feuchte vom einen Korn zum anderen.

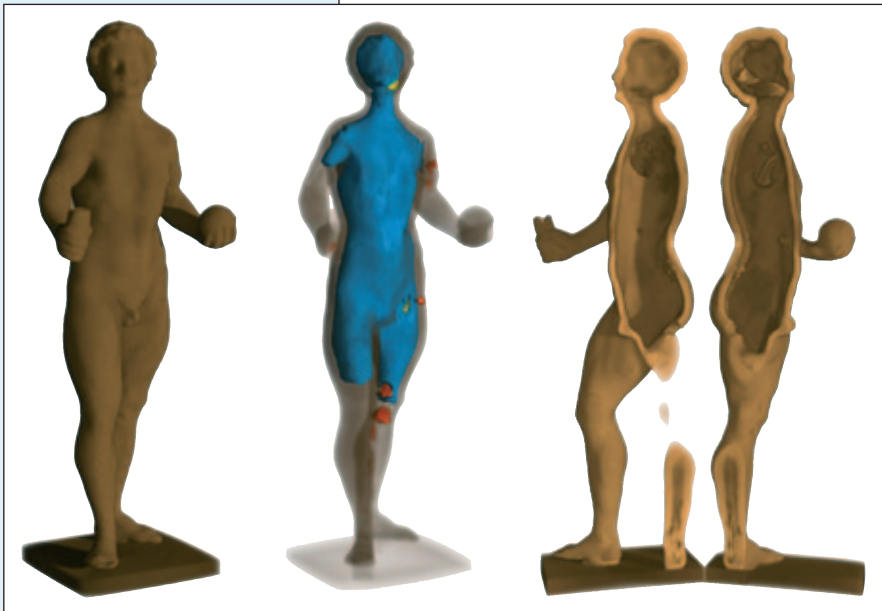


Durchfeuchtung von Bodenkörnern, aufgenommen mit Neutronen über einen Zeitraum von 8 Stunden; durch mathematische Extraktion der Bodenstruktur wird ausschliesslich die Feuchte veranschaulicht. Die Abmessungen dieser Körner in den Abbildungen betragen ca. 5 mm.

Bronzeskulpturen aus der Renaissance

In diesem gemeinsam mit dem Reichsmuseum Amsterdam durchgeführten Projekt wurde eine zerstörungsfreie Analyse von prominenten Bronze-Statuetten erstellt – mit dem Ziel, die Herstellungsmethoden und möglichen Herstellungsfehler zu beschreiben. Auf Basis der Tomografie-Datensätze lassen sich die Objekte nun mit Hilfe mathematischer Werkzeuge virtuell zerschneiden. Auch innere Hohlräume, das Negativ der Gussform, Defekte und Reparaturstellen können dabei analysiert werden. Neutronen sind hier besonders nützlich, weil sie eine gute Durchdringung für Metalle besitzen und organische Materialien (Klebstellen, Harze, Lacke) empfindlich nachweisen können.

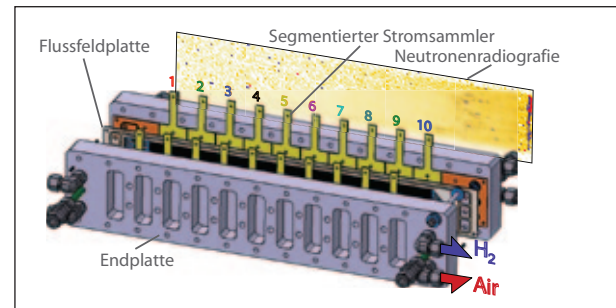
Tomografieansichten einer Skulptur: Schnitte können virtuell an beliebigen Stellen gemacht werden, ohne das Objekt zu beschädigen.



Effizientere Brennstoffzellen

Die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie erfolgt in einer Brennstoffzelle weitaus effizienter als in Verbrennungsprozessen. Weltweit wird intensiv geforscht, um die in der Zelle ablaufenden Prozesse im Detail zu verstehen und die Eigenschaften zu optimieren. Eine wichtige Anwendung von Brennstoffzellen kann der Einsatz in Automobilen sein.

Das bei der chemischen Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff entstehende Wasser spielt dabei eine wesentliche Rolle. Mit Hilfe von Neu-

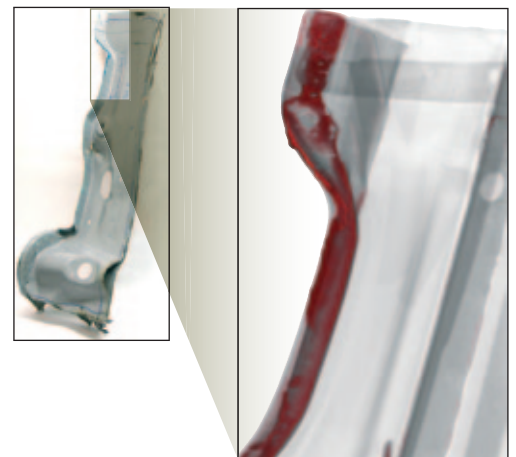


Das Leistungsvermögen einer PEM-Brennstoffzelle hängt stark vom Wassergehalt der Membran ab, was mit Hilfe von Neutronen innerhalb der äusseren Struktur gemessen werden kann.

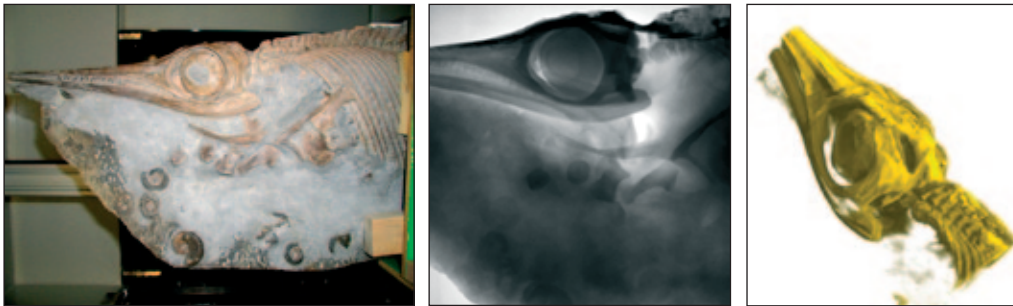
Neutronen lässt sich invasionsfrei und mit guter räumlicher und zeitlicher Auflösung die Wasserverteilung in der Brennstoffzelle analysieren.

Klebefehlstellen sichtbar machen

Wie im untenstehenden Beispiel aus dem Fahrzeugbau angedeutet (Bild unten), gelingt es mit Hilfe von Neutronen, die Verteilung von Klebstoff in Metallverbindungen sehr exakt zu bestimmen. Diese Untersuchungen wurden mit tomografischen Methoden durchgeführt, wobei die volle dreidimensionale Struktur erfasst wird. Sofern die Klebungen nur in ebenen Flächen vorliegen, ist eine Untersuchung mit einfacher Durchstrahlung (Radiografie)



Teil einer Auto-Karosserie, das eine Klebung enthält: Mit Neutronentomografie kann der Kleber innerhalb des Metalls dargestellt werden. Dadurch werden auch allfällige Fehlstellen sichtbar.



Versteinertes Skelett eines Fischechse (Ichthyosaurus), partiell freigelegt (Foto links). Ansicht des Bereichs des Auges in der Transmissionsansicht (Mitte) und der tomografischen Ansicht (rechts).
(Quelle: U. Oberli, St. Gallen)

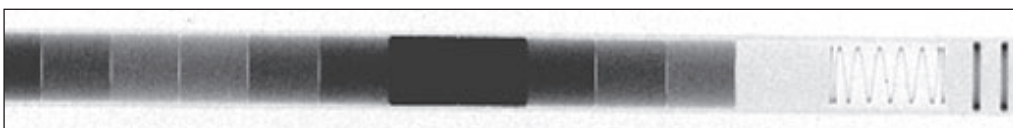
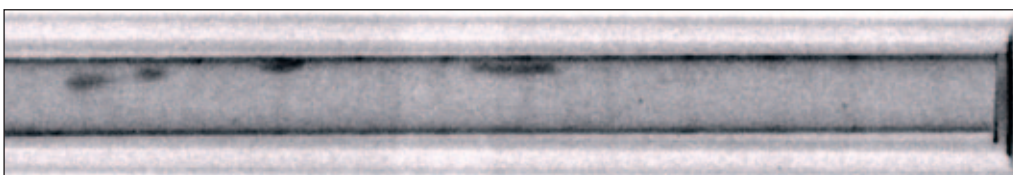
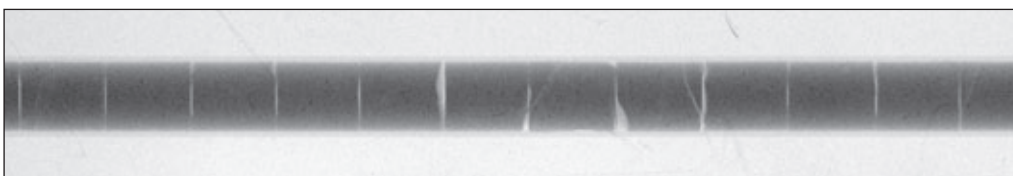
hinreichend und wesentlich weniger aufwendig. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Konstruktionen ist eine derartige Untersuchung erforderlich, um sicherzustellen, dass die Teile korrekt verklebt sind.

Erkenntnisse in der Paläontologie

Mit Neutron Imaging können auch grössere fossile Fundstücke zerstörungsfrei untersucht werden. Im Bild oben sieht man einen teilweise freigelegten Vorderteil einer Fischechse (Ichthyosaurus). In der Neutronentomografie, erzeugt von der Kopffregion, werden die versteinerten Knochen visuell vom Sediment getrennt. Daraus lassen sich Erkenntnisse über die Entwicklungsgeschichte solcher Saurier gewinnen oder das Vorgehen für eine weitergehende Präparation planen.

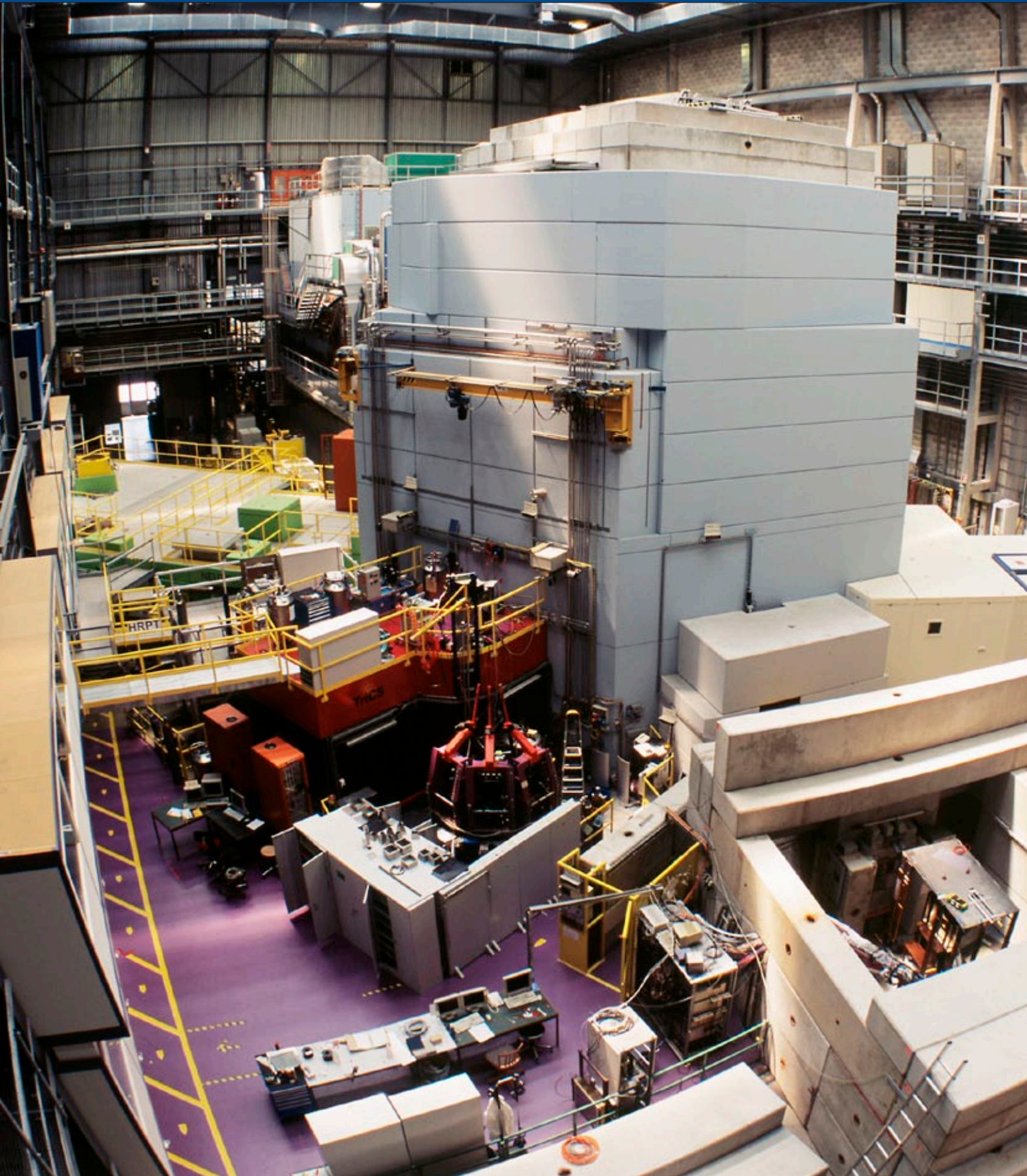
Untersuchung von Kernbrennstoff

Neutron Imaging ist aus zwei Gründen besonders geeignet, Kernbrennstoff zu untersuchen: Neutronen durchdringen Schwermetalle viel leichter als Röntgenstrahlen, und mit speziellen Neutronendetektoren lassen sich auch stark radioaktive Proben abbilden. Die Untersuchung von radioaktiven Segmenten von KKW-Brennstäben erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Hotlabor des PSI. Die Proben werden mit dem Abschirm- und Manipulatoraufbau NEURAP gemessen. Die Fragestellungen betreffen zum Beispiel die Struktur von Brennstoffpillen nach Langzeitbestrahlung oder die Korrosion von Zircaloy-Röhrchen, welche die Uranbrennstoffpillen einschliessen. Auf Grund der hohen Sensitivität der thermischen Neutronen auf den Gehalt an U-235, lässt sich auch die Urananreicherung bestimmen (Bilder unten).



Untersuchung von KKW-Elementen: Pellets aus Uran, die teilweise kleine Defekte aufweisen (oben), Ansammlung von Hydridlinsen im Zirkonium (Mitte), Pellets unterschiedlicher Anreicherung in einem neuen Brennelement (unten).

Die Spallations-Neutronenquelle SINQ mit dem Targetblock in der Mitte. Dort laufen die Spallationsreaktionen zur Freisetzung von Neutronen ab.



Eine Quelle, zwei Möglichkeiten

Begehrte Strahllinien NEUTRA und ICON

Neutronen können über eine Kernspaltung oder eine Spallationsreaktion erzeugt werden. Am PSI produziert die Spallationsquelle SINQ die nötigen Neutronen und liefert diese an die Anlagen NEUTRA und ICON weiter, wo die Experimente durchgeführt werden.

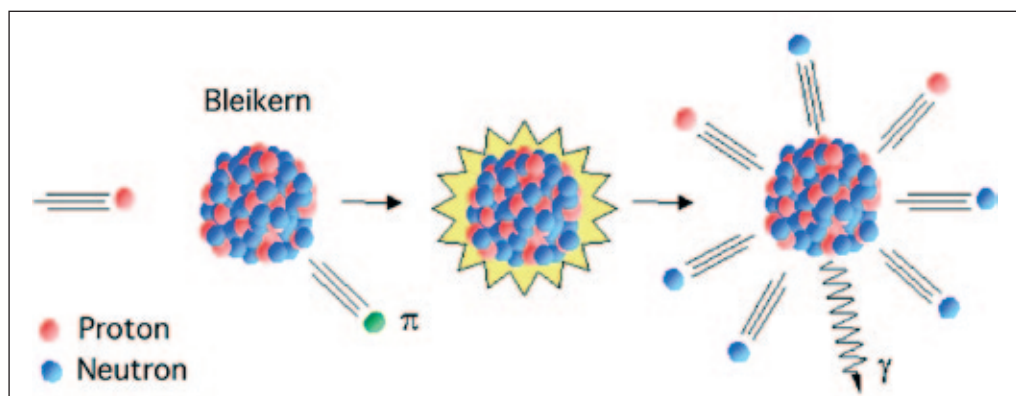
Neutronen können als freie Teilchen nur dadurch erzeugt werden, dass sie aus Atomkernen abgetrennt werden. Dies bedingt eine Kernreaktion und Aufspaltung des Kerns. Der Atomkern wird dazu in der Regel in einen angeregten Zustand versetzt. Er teilt sich und die Kernteile senden – um sich abzuregen – Neutronen, Protonen oder Strahlung aus.

Die beiden wichtigsten Möglichkeiten zur Erzeugung von Neutronen sind die Kernspaltung und die Spallationsreaktion. Im ersten Falle wird ein spaltbarer Kern (z.B. Uran-235) von einem Neutron getroffen, wodurch dieser in zwei Bruchstücke (Spaltprodukte) zerteilt wird und etwa zwei bis drei schnelle Neutronen freigesetzt werden. Durch eine Weiterführung des Prozesses mit Hilfe dieser freien Neutronen kann eine Kettenreaktion ausgelöst werden, wie sie in einem Kernreaktor üblich ist. Die meisten starken Neutronenquellen für Forschungszwecke weltweit basieren auf diesem Prinzip des Spaltreaktors.

Bei einer Spallation hingegen werden massenreiche Kerne mit hochenergetischen geladenen Teilchen beschossen, die von einem Beschleuniger stammen. Im Allgemeinen werden dafür Protonen verwendet, die beim Zusammenstoss mit Atomkernen diese in oftmals mehr als zwei Teile zerplatzen lassen, wodurch noch mehr Neutronen als bei der Kernspaltung freigesetzt werden können – nämlich etwa 10 bis 15 Neutronen, abhängig von der Masse des Zielkernes und der Energie des ankommenden Protons (Bild unten).

Ohne spaltbares Material

Der Gesamtkomplex einer Spallationsquelle besteht aus Beschleuniger, Protonenstrahlführung, Targetstation und umgebender Abschirmung (Bild linke Seite). Sie kann ähnliche Eigenschaften in Bezug auf die freigesetzten Neutronen wie ein Reaktor haben, nur muss kein spaltbares Material mehr verwendet werden. Allerdings sind die primären Spallationsneutronen viel zu schnell, das heisst zu energiereich, so dass sie in einem sogenannten Moderator durch Stösse an Atomkernen abgebremst werden müssen. Erst dann, nach dem Erreichen einer Geschwindigkeit im Bereich um 2200 m/s oder darunter, gelangen sie in grosser Zahl durch Strahlkanäle zu den Experimenten.

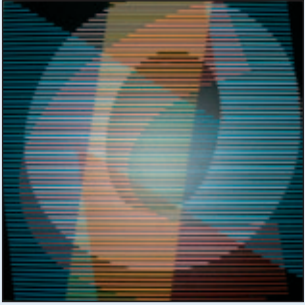


Bei der Spallation werden massenreiche Atomkerne (z. B. Blei) mit Protonen hoher Energie beschossen. In der Folge entstehen massenärmere Splitterkerne und freigesetzte Neutronen, die im Moderator der SINQ abgebremst werden.

Strahllinie ICON – neue Möglichkeiten

Forscher aus Universitäten und Privatwirtschaft kommen ans PSI, um ihre Proben an den beiden Strahllinien ICON und NEUTRA untersuchen zu lassen. Die Strahllinie ICON wurde im Jahre 2005

eröffnet. ICON arbeitet mit kalten Neutronen und eignet sich besonders, um Brennstoffzellen zu untersuchen und so deren Effizienz weiter zu verbessern.

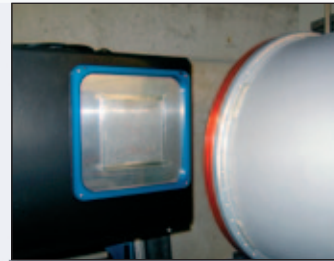


Zahlen, die Geschichten erzählen:
Speziell für die ICON-Anlage
gefertigte Bilder des wissenschaft-
lichen Künstlers Jürg Nänni.

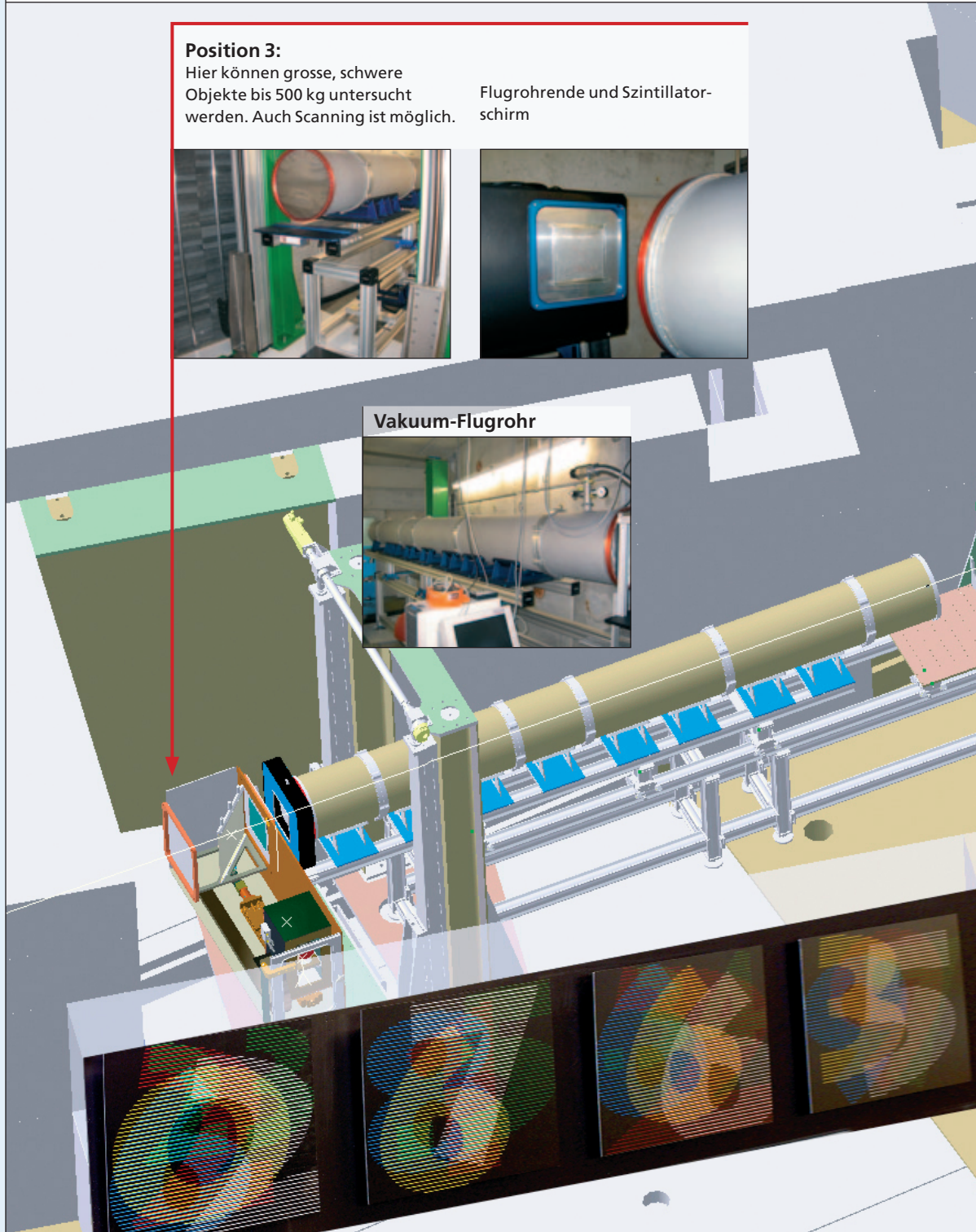
Position 3:

Hier können grosse, schwere
Objekte bis 500 kg untersucht
werden. Auch Scanning ist möglich.

Flugrohrende und Szintillator-
schirm



Vakuum-Flugrohr

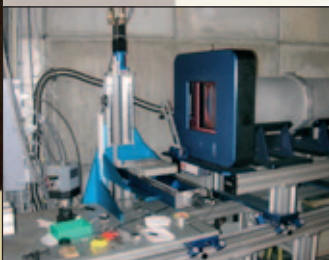


Position 1:

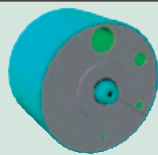
Auch hier können Experimente durchgeführt werden. Je nach Experiment können an dieser Position zusätzliche Hilfsmittel angebracht werden (Vakuum-Flugrohr, Geschwindigkeits-Selektor, Flugzeit-Chopper).

Position 2:

Diese Position eignet sich zur Untersuchung von kleinen Objekten, für die Mikrotomografie und für das Scanning.



Blendentrommel



Die Strahllinie NEUTRA – der Klassiker

NEUTRA ist begehrt: Pro Jahr wird NEUTRA für etwa 100 unterschiedliche Messaufgaben benutzt und diese gute Auslastung war ein Grund für den Bau der ICON-Anlage. NEUTRA arbeitet mit thermischen Neutronen und besteht aus einem konvergierenden Innenkollimator, der die Neutronen zur Probe weiterleitet, und einer fixen Neutronenblende von 2 cm Durchmesser. Der Kollimator weitet sich aus von einem Durchmesser von 15 cm bei Position 1, auf 29 cm bei Position 2, bis zu 40 cm bei der hintersten Position 3 (Grafik unten). Damit können Proben in einer Größe von wenigen cm bis zu 30 cm studiert werden.

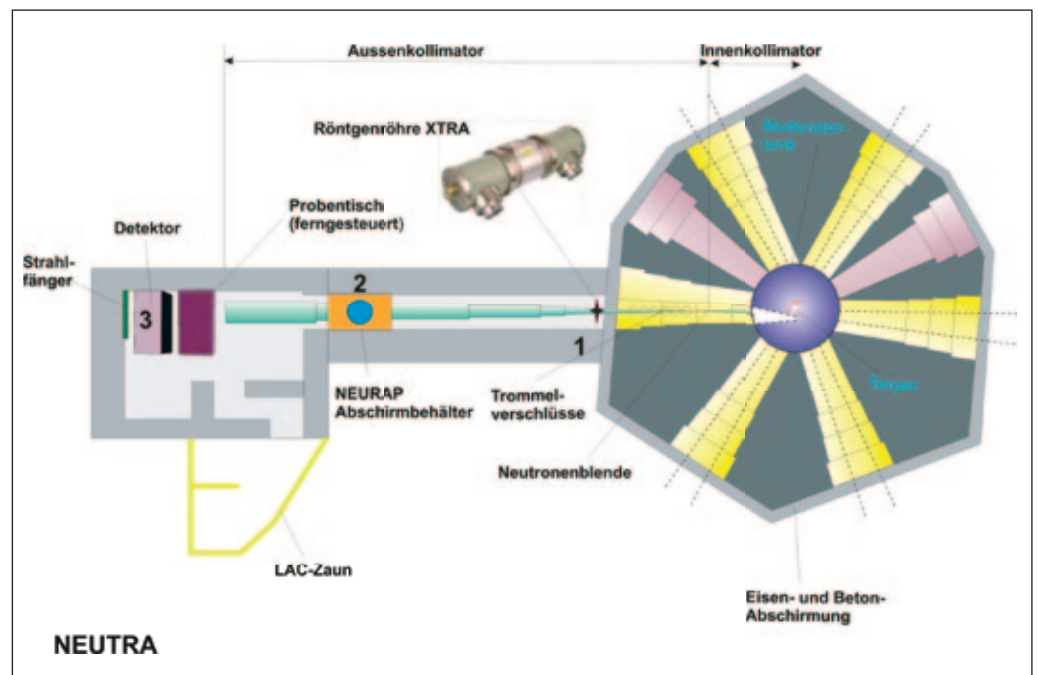
Die Untersuchung hoch radioaktiver Proben ist mit dem speziellen Aufbau NEURAP an Position 2 möglich: Die Proben senden selbst soviel Strahlung

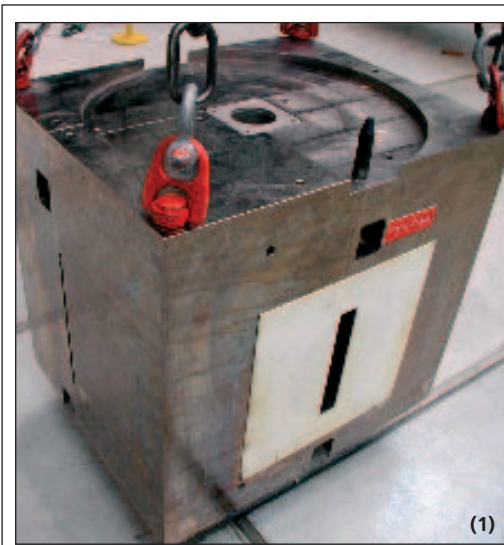
aus, dass sie nicht mit konventionellem Neutron Imaging untersucht werden können. Eine Durchstrahlung mit Neutronen, unter Verwendung eines speziellen Detektors, erlaubt die zerstörungsfreie Untersuchung insbesondere von Schwermetallproben. Diese Proben, z.B. Uranbrennstäbe aus Kernkraftwerken, müssen abgeschirmt transportiert und fernbedient im Radiografiestrahl positioniert werden. NEURAP besteht daher aus einem dickwandigen Eisenblock zur Abschirmung und einer Wechselflasche (Bild rechte Seite).

Neben NEURAP ist auch ein anderer Aufbau möglich: Das Einschwenken der Röntgenröhre XTRA an Position 1 erlaubt es den Forschern, den unterschiedlichen Kontrast von Röntgen- und Neutronenstrahlen bei fast identischer Aufnahmegeometrie auszunutzen.

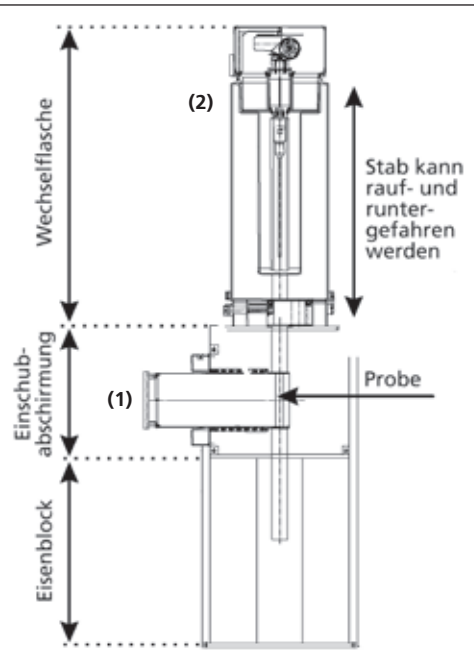


Innenansicht von NEUTRA (Abschirmung teilweise entfernt), rechts: grafische Darstellung von NEUTRA.





NEURAP-Aufbau mit Abschirmblock (1) und Wechselflasche (2), die gleichzeitig zur Handhabung der Probe dient.

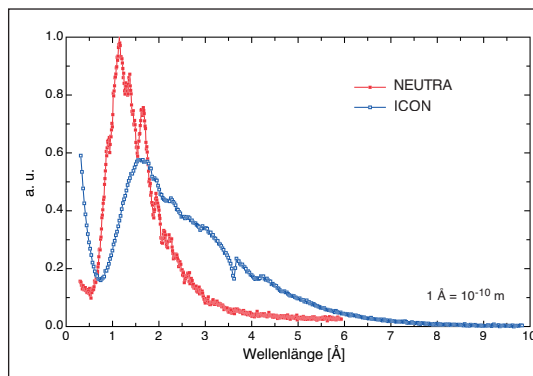


NEURAP-Aufbau mit Abschirmblock (1) und Wechselflasche (2). NEURAP dient zur Untersuchung hoch radioaktiver Proben, zum Beispiel Brennstäben.

NEUTRA und ICON ergänzen und unterscheiden sich

ICON und NEUTRA sind zwei Strahllinien, die sich in ihren Eigenschaften ergänzen: ICON arbeitet mit kalten Neutronen, NEUTRA mit thermischen. Das führt zu unterschiedlichen Wellenlängenspektren (Bild rechts) der beiden Anlagen und daher unterscheiden und ergänzen sich die entsprechenden Bilder bei der Durchdringung und beim Kontrast. So ist zum Beispiel die Streuung von kalten Neutronen an dünnen Wasserschichten deutlich erhöht, sodass diese mit höherer Empfindlichkeit nachge-

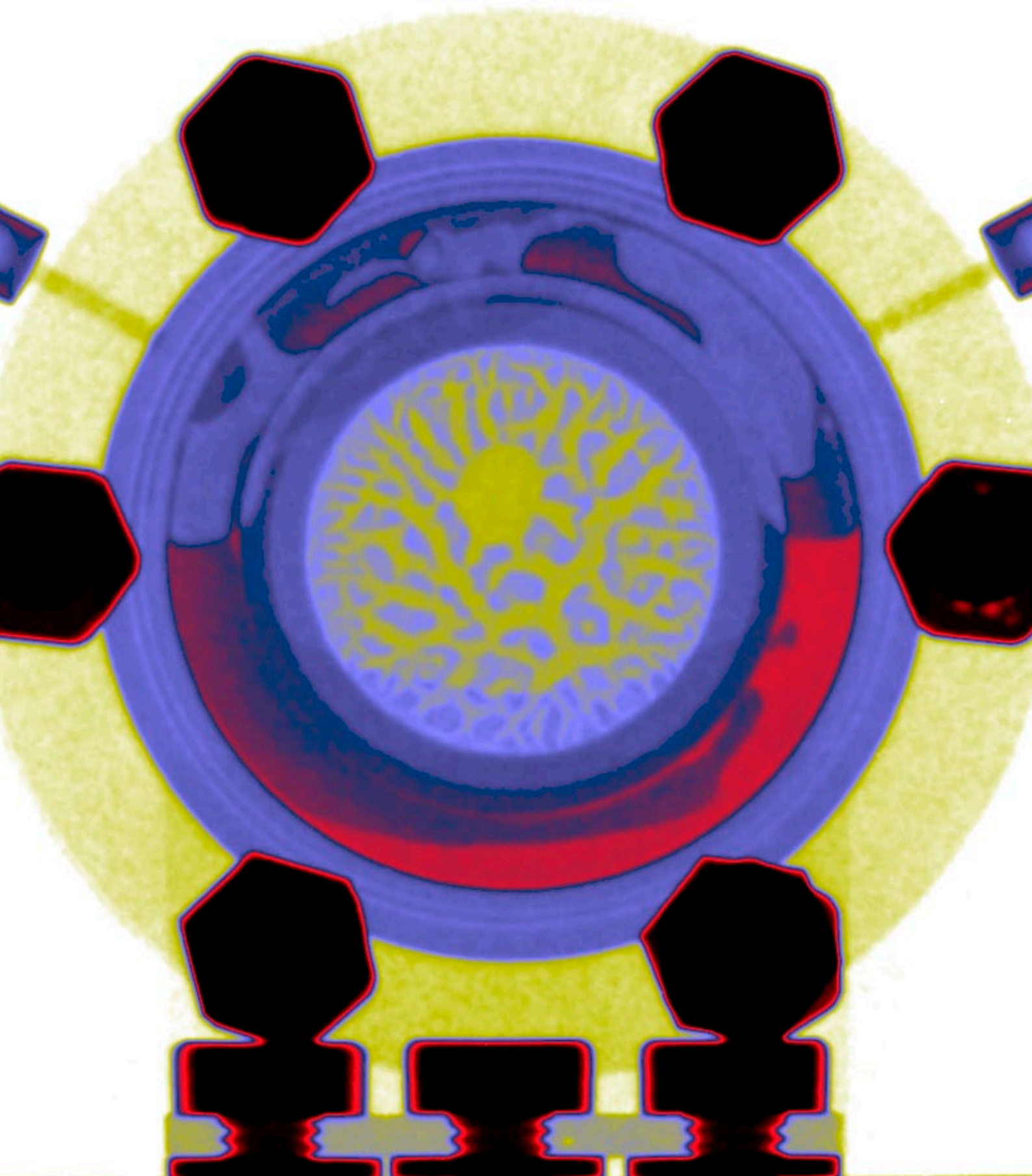
wiesen werden können. Die anlagenspezifischen Unterschiede sind in der Tabelle unten zusammengefasst.



	NEUTRA	ICON
Neutronenblende D	fix: \varnothing 20 mm	variabel: \varnothing 1,0 – 80 mm
Kollimationsverhältnis L/D	200, 350, 550	viele Stufen: 90 – 10000
Neutronenfluss ($n/cm^2/s/mA$) (L = 7,1 m, D = 2 cm)	$7,5 \cdot 10^6$	$9,2 \cdot 10^6$
Filter für γ und schnelle Neutronen	Wismut	kein Filter
Setup für Tomografie	«grosse» Proben	auch Mikrotomografie
Beryllium Filter	kein	vorhanden
Energieselektor	kein	vorhanden
Kombination mit Röntgen	XTRA	keine Röntgenröhre
Setup für hochaktive Proben	NEURAP	nur schwachaktive Proben

Unterschiede der Anlagen NEUTRA und ICON.

Stromfluss wird sichtbar: Neutronenradiografie einer Modellzelle eines Elektrolyten.



Schwierig abzubildende Strahlung

Grosse Auswahl an Detektoren

Nachdem die Neutronen die Probe durchdrungen haben, besteht die nächste Herausforderung darin, ein Bild der Neutronenverteilung zu erstellen. Dafür stehen verschiedene Methoden und Detektoren zur Verfügung. Vermehrt werden digitale Methoden eingesetzt.

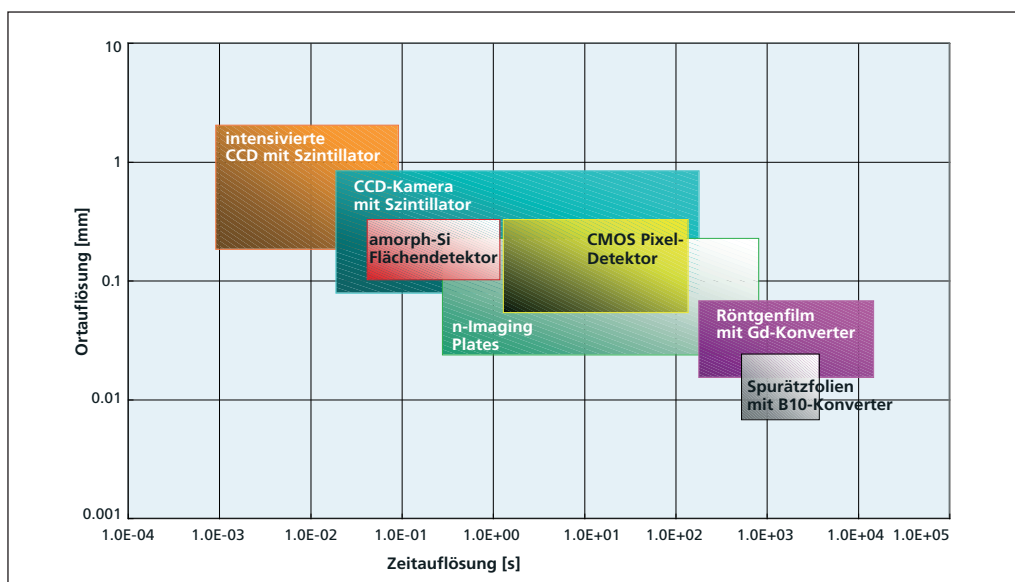
Da Neutronen keine Ladung tragen, können sie auch keine direkte Ionisation beziehungsweise keine sichtbare Anregung liefern. Zu ihrem Nachweis sind jeweils Kernreaktionen notwendig, bei denen das ankommende Neutron entweder absorbiert oder gestreut wird. In jeder Nachweisreaktion entstehen dabei ionisierende Strahlung oder andere, freie geladene Teilchen.

Diese Prozesse auf atomarem Niveau müssen jedoch in die sichtbare, makroskopische Welt übertragen werden, um vom Menschen wahrgenommen zu werden. Die resultierenden Signale sind entweder Lichtblitze im Falle von Szintillationsschirmen, elektronische Anregungen im Falle von Bildspeicherplatten oder Schwärzungen, wenn ein Film verwendet wird.

Obwohl auch mit Röntgenfilmen unter Verwendung eines Konverters Neutronenbilder entstehen können, werden seit einigen Jahren digitale Methoden verstärkt zum Einsatz gebracht. Die Vorteile digitaler Bildsysteme liegen auf der Hand: Die Bilddaten können abgespeichert, kopiert, elektronisch übermittelt, nachbearbeitet und archiviert werden. Zudem sind die digitalen Verfahren empfindlicher und effizienter als der traditionelle Film, wodurch sich die Bestrahlungszeiten entsprechend deutlich verringern. Und mit digitalen Bilddaten lassen sich auch weitere Auswertungsschritte anschliessen wie Filterung, Segmentierung, Referenzierung bis hin zur tomografischen Rückführung von Volumendaten.

Anwendung bestimmt den Typ

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Detektoren, die in Bezug auf die Ort- und Zeitauflösung voneinander abweichen (Grafik unten). In der Regel bestimmt die Anwendung, welcher bildgebende Detektor zum Einsatz kommt.



Einsatz der verschiedenen Detektortypen.

Folgende Detektoren werden am PSI verwendet:

CCD-Kamera mit Szintillator

Das auf dem neutronenempfindlichen Szintillator entstehende Bild wird durch eine lichtempfindliche, gekühlte Kamera erfasst und digital gespeichert. Durch variable Linsensysteme lassen sich unterschiedliche Gesichtsfelder (zwischen 4 und 40 cm) einstellen. Dieser Messaufbau ist vor allem für die Tomografie im Einsatz.

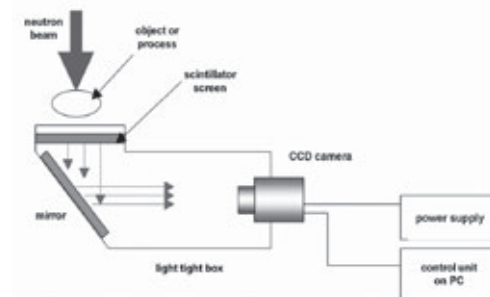


Was ist ein Szintillator?

Unter einem Szintillator versteht man ein Material, das beim Durchgang von geladenen Teilchen und γ -Quanten angeregt wird und die Anregungsenergie in Form von Licht (meist im UV- oder sichtbaren Bereich) wieder abgibt. Über die Messung der Lichtmenge (z.B. mit einem Fotomultiplier oder einer Fotodiode) kann auf die deponierte Energie geschlossen werden. Indirekt können auch Neutronen über Kernreaktionen im Material und die entstehenden sekundären geladenen Teilchen nachgewiesen werden.

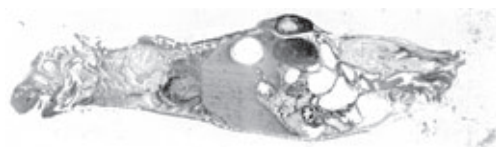
Intensivierte CCD mit Szintillator

Durch einen vorgeschalteten Bildverstärker kann eine deutlich höhere Lichtausbeute erreicht werden. Ausserdem ergibt sich die Möglichkeit, sehr enge Zeitfenster für spezielle Messungen zu setzen. Mit dem System können zum Beispiel sich wiederholende Vorgänge untersucht werden.



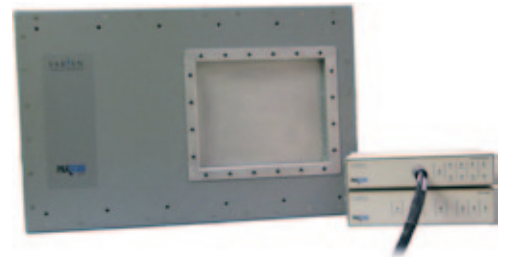
Film-Methoden

Sowohl mit Röntgenfilmen als auch mit Spurätzfolien lassen sich neutronische Bilder erzeugen, die eine hohe Auflösung besitzen. Allerdings sind die Belichtungs- und Entwicklungszeiten sehr lang.



Amorph-Si Flat Panel

Das Licht vom Szintillator, der im direkten Kontakt mit dem engen Gitter der Fotodioden ist, wird in ein Ladungssignal umgewandelt und entsprechend ausgelesen. In der Folge kann eine hohe Bildfrequenz erreicht werden.



Imaging Plates

Durch Anregungen elektronischer Zustände in der sensitiven Schicht infolge der Neutronenabsorption und anschliessender Auslesung mit einem Laserscanner kann ein hochauflösendes, digitales Bild der Neutronenverteilung gemacht werden. Die Bildplatten können vielfach wieder verwendet werden.



CMOS-Pixel-Detektoren

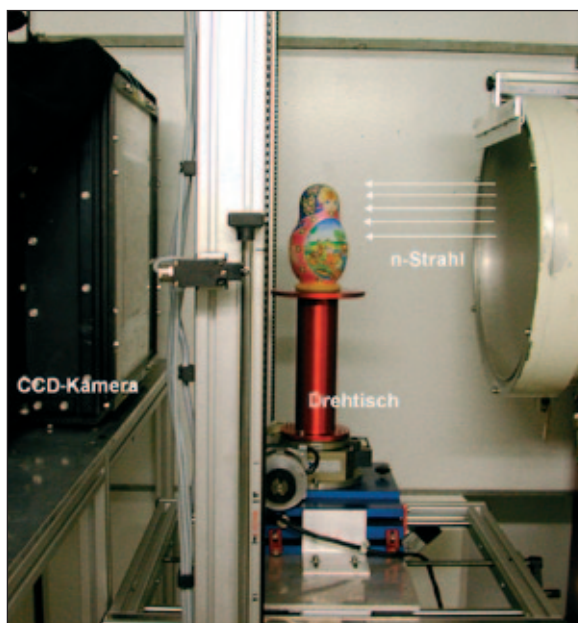
Jeder Pixel des Detektors ist mit einem eigenen Verstärker und Digitalisierer versehen, so dass rauschfrei beliebig viele Nachweisereignisse gespeichert werden können. Die Detektorgrösse ist augenblicklich noch auf einige Quadratzentimeter beschränkt.



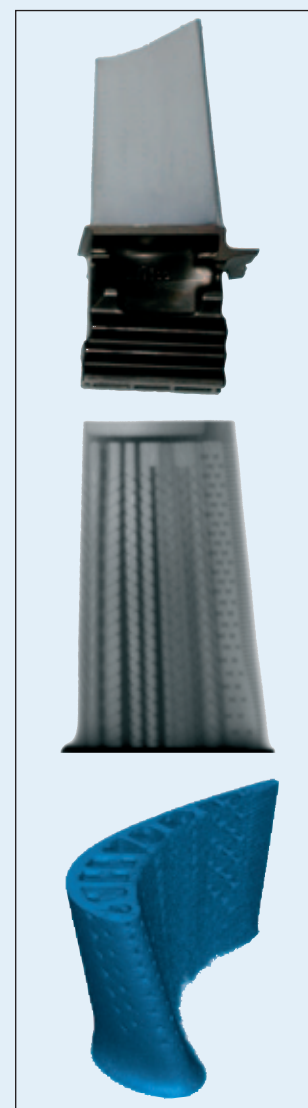
Von der Radiografie zur Tomografie

Neutronentomografie ist ein bildgebendes Verfahren, das Bilder der dreidimensionalen Struktur erzeugen kann. Grundlage dazu sind Durchstrahlungsbilder, das heisst Radiografien eines Objektes oder Schnittbilder. Das Verfahren beruht auf den gleichen Prinzipien wie die medizinische Röntgen-Computertomografie (CT). Während in einem medizinischen CT-Apparat die Röntgenquelle und der Detektor um den Patienten gedreht werden, wird bei der Neutronentomografie ein Gegenstand auf einem Drehtisch (Bild rechts) fixiert und in kleinen Schritten um 360 Grad gedreht.

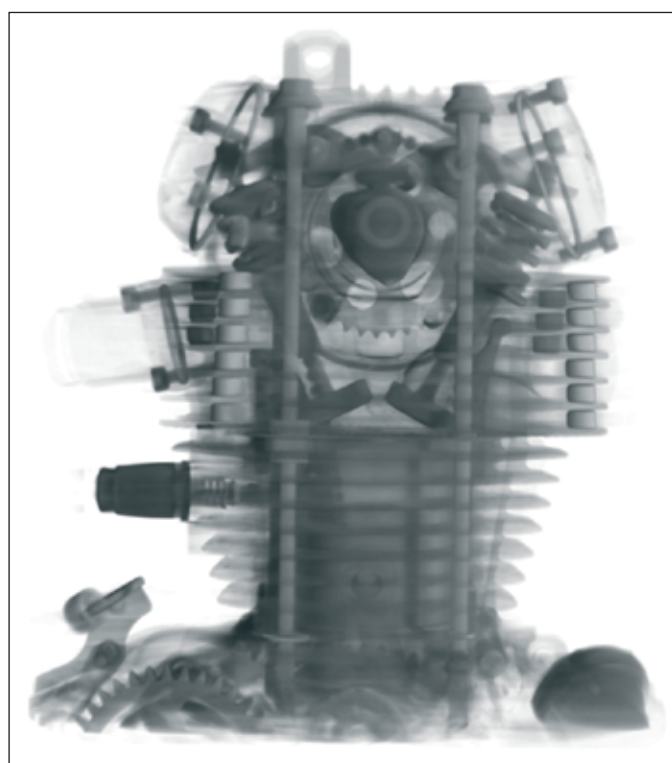
Mittels eines Rechenverfahrens, bekannt als Tomografierekonstruktion, lassen sich aus den Durchstrahlungsbildern Schnittbilder von Ebenen senkrecht zur Drehachse zurückrechnen. Der Stapel aller Schnittbilder bildet das Tomografievolumen. Dieses kann mit 3-D-Visualisierungsalgorithmen in den gewünschten Ansichten und Schnitten dargestellt werden (Bilder diese Seite).



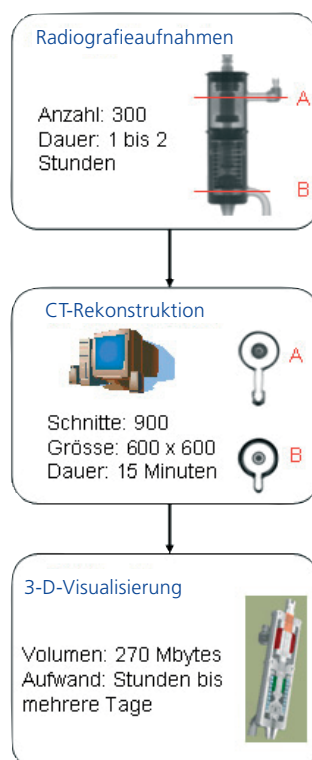
Tomografieaufbau an der Anlage NEUTRA.



Turbinenschaufel (oben) als Neutronen-Transmissionsradiografie (Mitte) und Neutronentomografie (unten).



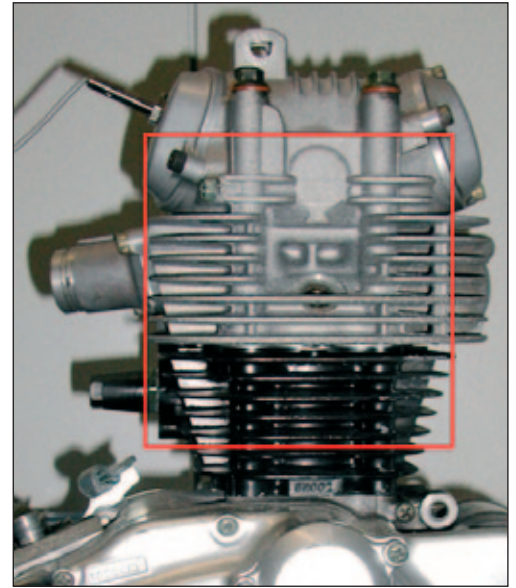
Semitransparente Neutronentomografie eines Motorradmotors (Spezialbilder siehe Seite 26).



Ablaufschema zur Erzeugung eines Neutronentomografie-Datensatzes.

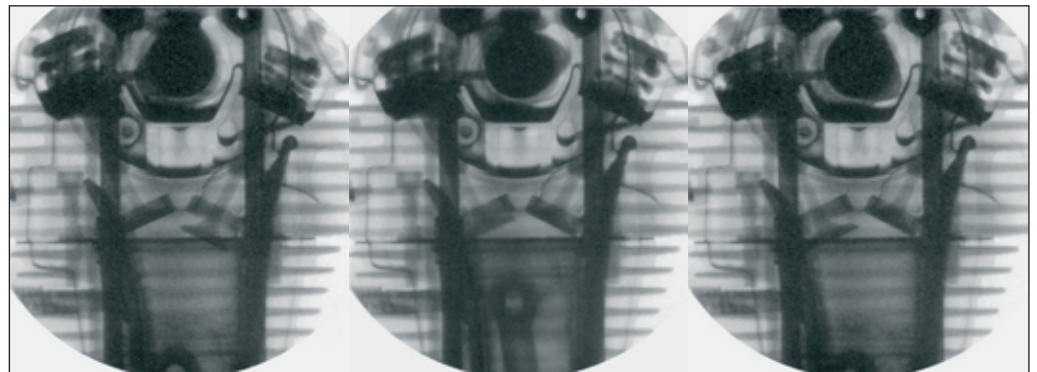
Wenn Radiografie mit der Zeit geht

Radiografie-Aufnahmen können auch den zeitlichen Ablauf und die räumliche Ausbreitung von Stoffen untersuchen, zum Beispiel von kleinen Mengen wasserstoffhaltiger Substanzen innerhalb metallischer Strukturen (z.B. einem Motor), oder einer Stein- oder Erdprobe. So kann das Innere eines Motorradmotors untersucht werden, während der Motor läuft. Solche schnellen, periodischen Vorgänge können mit zeitlich abgestimmten Aufnahmen kurzer Expositionszeit untersucht werden (Bilder rechts und unten). Dazu werden für einen guten Kontrast mehrere Kurzzeitaufnahmen aufsummiert. Für solche Aufnahmen eignen sich «Flat-panel»-Detektoren, die bis zu 30 Bilder pro Sekunde aufnehmen können. Aufgrund der sehr kurzen Belichtungszeiten muss jedoch eine Qualitätseinbusse der Radiografien in Kauf genommen werden oder es werden nur Stoffe untersucht, die einen hohen Kontrast liefern.

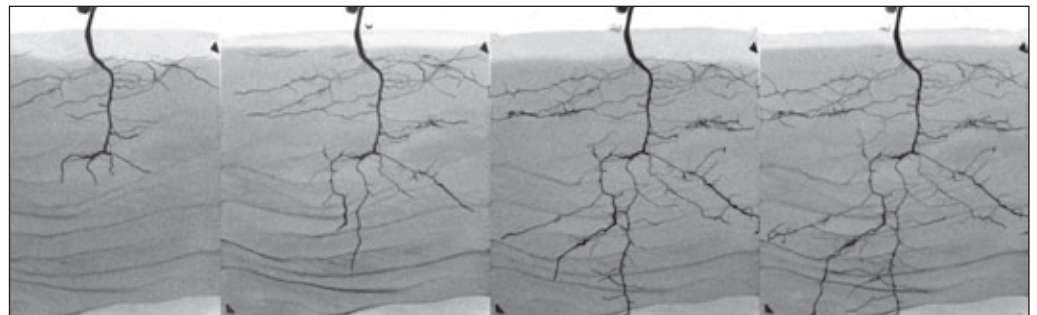


Der Motorradmotor mit Bildausschnitt (rot) für die Spezialaufnahmen (Bildserie unten).

Radiografie-Bilder des Motors bei 1200 Umdrehungen pro Minute, entstanden mit Spezialkamera bei einer Expositionszeit von je 0,1 Millisekunden.



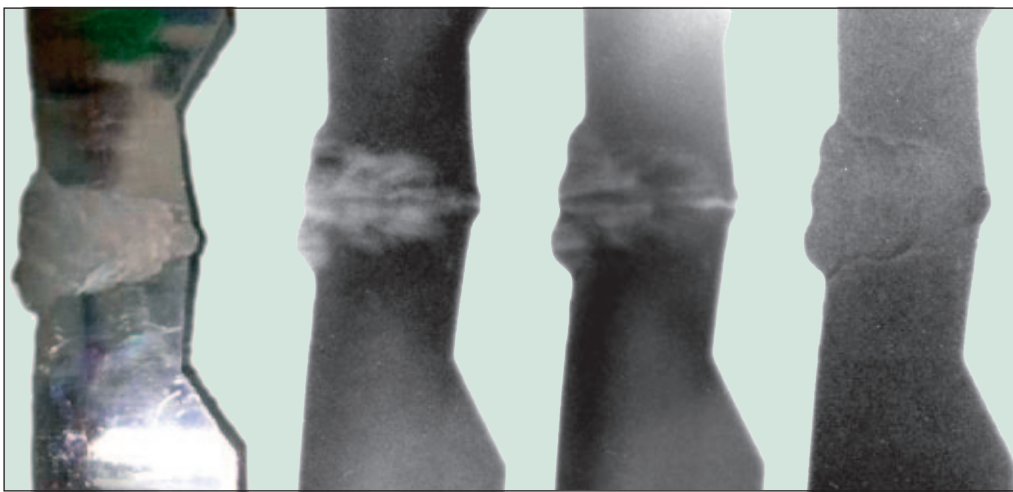
Untersuchung des Wurzelwachstums einer Lupine über einen Zeitraum von ca. vier Wochen.



Aus dem Vollen schöpfen

Die Neutronenstrahlen von NEUTRA und ICON weisen ein recht breites Spektrum an Wellenlängen und Energie auf. Es ist daher möglich, aus dem vollen Spektrum, welche die Spallationsquelle SINQ liefert, Neutronen mit einer bestimmten Energie auszuwählen und für eine Untersuchung zu nutzen.

Mit solchen ausgewählten Neutronenspektren lassen sich Materialverteilungen viel genauer analysieren als unter Verwendung des vollen Spektrums. Dieses Phänomen ist im Bild unten für eine dicke Schweissnaht gezeigt, bei der sich in Abhängigkeit von der mittleren Neutronenenergie andere Bereiche, die unterschiedliche kristalline Strukturen aufweisen, deutlich vom homogenen Basismaterial abheben.



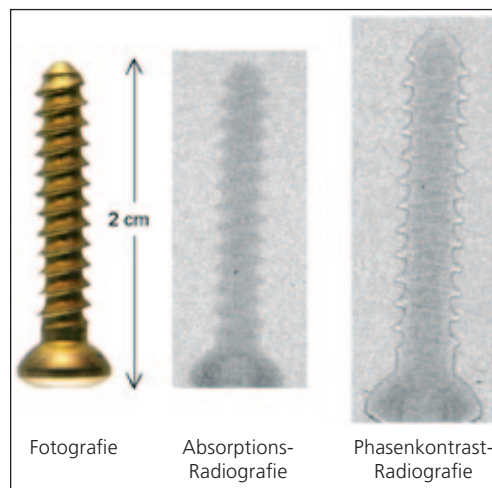
Untersuchung einer Schweissnaht (Foto links) mit Neutronen unterschiedlicher Energie.

Phasenkontrast verstärkt die Kanten und vergrössert das Objekt

Je nach den experimentellen Bedingungen verhalten sich Neutronen wie Wellen. Sie können analog zu Wasserwellen an Objekten gestreut werden und sich überlagern (interferieren). Wellen, die ein Objekt durchlaufen, breiten sich mit einer andern Geschwindigkeit aus als die andern Wellen. Sie haben deshalb eine andere Wellenlänge. Die Wellenmaxima verschieben sich – ein Prozess der Phasenverschiebung heisst. Diese Verschiebung führt zum Phasenkontrast, einem Bild-Kontrast (Helligkeitsunterschied). Eine besonders deutliche Phasenverschiebung ergibt sich an der Kante eines Objektes, da die Kante die Grenze zu einem andern Material bildet (z. B zur Luft).

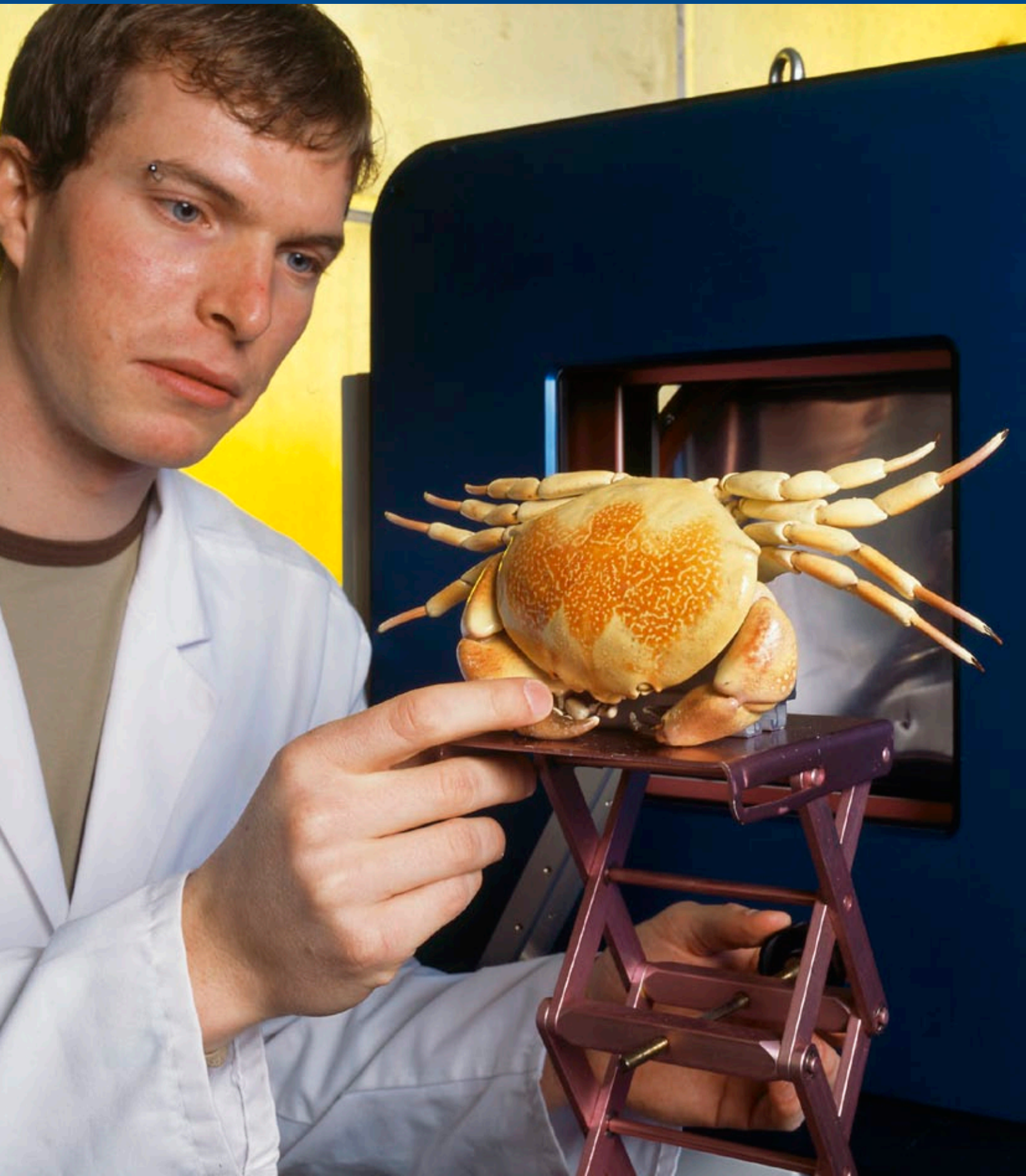
Bild rechts zeigt die Vorteile von Phasenkontrast-Radiografie: Die Kanten werden verstärkt und das Objekt vergrössert dargestellt. Die Vergrösserung beträgt in der gewählten Anordnung ca. 18 Prozent. Dadurch wird auch eine weitere Verbes-

serung der Sichtbarkeit kleiner Strukturen erreicht. Die Kantenverstärkung tritt aber nicht nur zwischen Material und Luft auf, sondern überall, wo zwei Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes aneinandergrenzen.



Untersuchung einer Titanschraube mit unterschiedlichen neutronischen Messbedingungen.

Noch klingt Neutron Imaging für viele Ohren exotisch, doch das bildgebende Verfahren bietet ungeahnte Möglichkeiten.



Methoden weiter verfeinern

Künftige Einsatzmöglichkeiten

SINQ, NEUTRA und ICON bieten ungeahnte Möglichkeiten: Die in dieser Broschüre gezeigten Beispiele des Neutron Imaging stellen nur einen kleinen Ausschnitt der tatsächlich durchgeführten Untersuchungen der letzten Jahre dar. Von den bereits etablierten Verfahren der Radiografie und Tomografie haben viele Forschungsgruppen aus dem In- und Ausland sowie Industriepartner profitieren können.

Unser Anliegen ist es, weitere Fortschritte bei der Verfeinerung der Methoden zu machen. Die bildgebenden Verfahren und Auswertungen sind weiterzuentwickeln, damit Neutron Imaging noch breiter einsetzbar wird. NEUTRA und ICON eröffnen mit ihren unterschiedlichen Wellenlängenspektren viele neue Möglichkeiten, um bestmögliche Bedingungen hinsichtlich Durchdringung und Kontrast der Bilder zu erreichen.

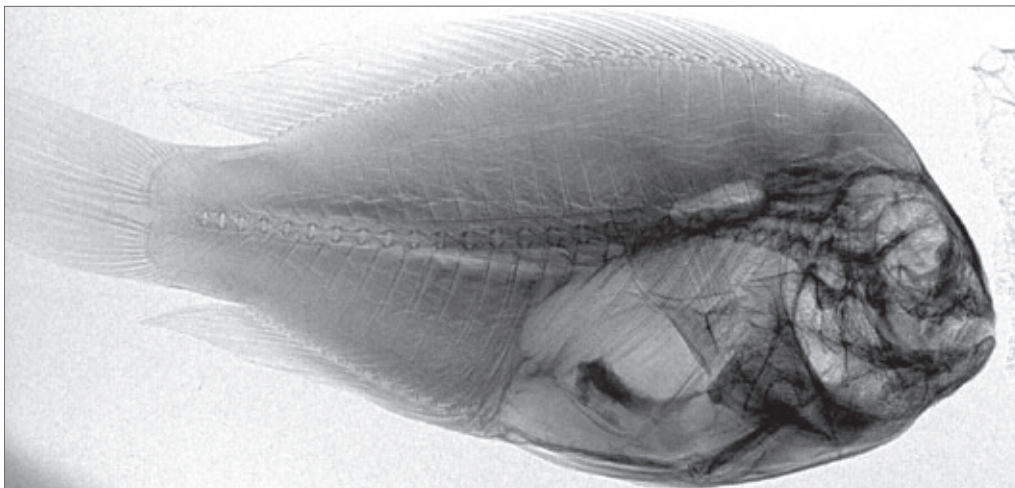
Einer der Arbeitsschwerpunkte in der nächsten Zeit ist die Entwicklung eines optimalen Aufbaus für Phasenkontrast-Messungen. Dieser Aufbau soll sich eignen für möglichst viele unterschiedliche Materialien und verschiedene Objektgrößen.

Ein weiterer Schwerpunkt ist der Schulterschluss zur andern Grossanlage am PSI, der Syn-

chrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Das soll auf zwei Wegen gelingen: Durch die Integrierung einer Röntgenanlage in den NEUTRA-Bunker sind komplementäre Abbildungen unter identischen experimentellen Randbedingungen sowohl mit Neutronen als auch mit Röntgenstrahlung möglich. Zudem ist eine Annäherung in der räumlichen Auflösung an jene der Mikrotomografie-Anlage der SLS angestrebt, wobei mit der Zielvorgabe von 20 Mikrometer dennoch ein erheblicher Abstand verbleiben wird.

Bekanntheitsgrad steigern

Sehr bedeutsam für eine sinnvolle und erfolgreiche Nutzung der Methode des Neutron Imaging ist deren Wahrnehmung in der Öffentlichkeit und in interessierten Fachkreisen. Im Vergleich zum Röntgen klingt Neutron Imaging noch in vielen Ohren exotisch und ist oft nur Insidern bekannt. Wir hoffen daher, mit dieser Broschüre ein wenig zur Popularisierung dieses innovativen bildgebenden Verfahrens beigetragen zu haben.



Phasenkontrastaufnahmen eines ca. 6 cm langen, getrockneten Fisches.

Das PSI in Kürze

Das Paul Scherrer Institut (PSI) ist ein multidisziplinäres Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Zusammen mit in- und ausländischen Hochschulen, andern Forschungsinstituten und der Industrie arbeitet das PSI in den Bereichen Festkörperforschung und Materialwissenschaften, Teilchenphysik, Biowissenschaften, Energie- und Umweltforschung.

Das PSI setzt seine Schwerpunkte in der Grundlagen- und angewandten Forschung. Dies hauptsächlich auf Gebieten, die Spitzenforschung ermöglichen, aber auch zur Ausbildung der kommenden Generation beitragen und den Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung von Gesellschaft und Wirtschaft ebnen. Das Institut engagiert sich für die Umsetzung neuer Erkenntnisse in der Industrie und bietet als internationales Kompetenzzentrum auch Dienstleistungen für Externe an.

Das PSI ist mit seinen 1300 Mitarbeitenden das grösste nationale Forschungsinstitut – und das Einzige seiner Art in der Schweiz. Es entwickelt, baut und betreibt komplexe Grossforschungsanlagen, die bezüglich Wissen, Erfahrung und Professionalität besonders hohe Anforderungen stellen. Für die nationale und internationale Wissenschaftsgemeinschaft ist das PSI eines der weltweit führenden Benutzerlabors.

Impressum

Konzeption/Redaktion

Neutron Imaging & Activation Group (NIAG), PSI; Adrian Heuss, advocacy, Basel; Beat Gerber, PSI

Fotos

NIAG; H. R. Bramaz, Oberwil-Lieli

Layout / Druck

Paul Scherrer Institut

Abdruck mit Quellenangabe und Belegexemplar erwünscht.

Zu beziehen bei

Paul Scherrer Institut
Kommunikationsdienste
5232 Villigen PSI, Schweiz
Telefon +41 (0)56 310 21 11

Villigen PSI, September 2007

Kontakte

Forschungsbereichsleiter:

Dr. Kurt N. Clausen
Tel. +41 (0)56 310 37 55
kurt.clausen@psi.ch

Leiter Abteilung Spallations-Neutronenquelle:

Dr. Werner Wagner
Tel. +41 (0)56 310 25 17
werner.wagner@psi.ch

Leiter Neutron Imaging:

Dr. Eberhard Lehmann
Tel. +41 (0)56 310 29 63
eberhard.lehmann@psi.ch

Verantwortliche für Kommunikation:

Dagmar Baroke
Tel. +41 (0)56 310 29 16
Fax +41 (0)56 310 27 17
dagmar.baroke@psi.ch

Das PSI mit der SINQ im Westareal (Gebäude am linken Aareufer).



PAUL SCHERRER INSTITUT



Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Schweiz
Tel. +41 (0)56 310 21 11, Fax +41 (0)56 310 21 99
www.psi.ch, <http://neutra.web.psi.ch>