

Neutronen- und Synchrotrontomographie

Einblick ins Innere

Vom Dinosaurierskelett bis zur Brennstoffzelle gibt es kaum etwas, was Forscher in Berlin am Forschungsreaktor und am Elektronenspeicherring nicht durchleuchten können.

Text: Roland Knauer

Auch Dinosaurier hatten Rückenschmerzen – mit dieser Erkenntnis verblüfften kürzlich Paläontologen des Museums für Naturkunde in Berlin. Der Dino, der so groß war wie ein Schaf, lebte vor 150 Millionen Jahren im heutigen Tansania. 1911 wurden seine versteinerten Knochen gefunden und nach Berlin gebracht. Doch erst heute haben Wissenschaftler um Professor John Banhart vom Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB) Methoden entwickelt, mit denen sie die gerade einmal 2,5 Zentimeter langen und einen Zentimeter breiten Wirbel des Tieres untersuchen können. Die Wirbel entstehen im Embryo aus zwei Hälften jeder Körperseite, die miteinander verschmelzen. Mit der Neutronen-Tomographie entdeckten die Helmholtz-Forscher gemeinsam mit Kollegen vom Museum und der Berliner Universitätsklinik Charité, dass die Dino-Wirbelhälften falsch verschmolzen waren und das Tier mit Rückenschmerzen gepeinigt haben müssen.

„Normale Röntgenstrahlen hätten dieses Ergebnis nicht liefern können“, erläutert Dr. Nikolay Kardjilov, der am HZB – bis Juni 2008 noch Hahn-Meitner-Institut – die Instrumente für die Neutronentomographie entwickelt und aufgebaut hat. Röntgenstrahlen werden nämlich von Elektronen absorbiert. Je mehr Elektronen ein Atom hat, umso stärker bleiben die Röntgenstrahlen hängen. Für medizinische Röntgenbilder ist dies sehr praktisch, denn Sauerstoff hat acht Elektronen, Stickstoff sieben, Kohlenstoff sechs und Wasserstoff nur ein einziges Elektron. Muskeln und Haut sieht man daher auf einem Röntgenbild nur schwach, Knochen dagegen sehr gut, weil sie zahlreiche Kalzium-Atome mit jeweils 20 Elektronen enthalten.

LICHTBLITZE AUS ALPHA-TEILCHEN

Wenn Wissenschaftler jedoch Wasserstoff messen möchten, dessen Atom der Hauptbestandteil von Wasser und fast allen biologischen Gewebes ist, benötigen sie eine andere Durchleuchtungsmethode. Neutronenstrahlen liefern genau diese Möglichkeit, weil Neutronen von Wasserstoff-Atomen diffus gestreut werden: Treffen die kleinen Teilchen auf Wasserstoff,



INFO Röntgenstrahlen

Wilhelm Conrad Röntgen erzeugte vor über 100 Jahren die ersten Strahlen, die mit Elektronen in Wechselwirkung treten. Je mehr Elektronen ein Atom hat, umso stärker bleibt die Strahlung hängen. Dies stellte Röntgen fest, als er 1895 die Hand seiner Ehefrau – andere berichten, dass es die Hand einer Laborassistentin war – mit den später nach ihm benannten Strahlen durchleuchtete. Das Bild zeigte, dass die meisten Strahlen vom goldenen Ehering absorbiert wurden. Kein Wunder, denn jedes Gold-Atom enthält 79 Elektronen. Die Kalzium-Atome im Knochen haben dagegen nur 20 Elektronen und absorbieren deshalb erheblich weniger Röntgenstrahlung. Auf dem Bild sieht man die Knochen daher deutlich schwächer als den Ring.



„DREI ZENTIMETER STAHL DURCHSTRAHEN
WIR MIT NEUTRONEN PROBLEMLOS.“

Dr. Nikolay Kardjilov, Wissenschaftler am HZB

fliegen sie gleichmäßig verteilt in alle Richtungen weiter. Beim Durchleuchten tritt daher nur ein kleiner Teil eines eindringenden Neutronenstrahls hinter einem Wasserstoff-Atom auf der entgegengesetzten Seite der Probe wieder aus. Ganz so einfach wie sie klingt, ist die Methode allerdings technisch nicht umzusetzen, denn ein ausreichend starker Neutronenstrahl lässt sich viel schwieriger erzeugen als ein Röntgenstrahl. Genau genommen benötigt man für einen Neutronenstrahl einen Kernreaktor, wie ihn das Helmholtz-Zentrum Berlin für Forschungszwecke betreibt. Bei der Kernspaltung in solchen Reaktoren entstehen reichlich Neutronen, die für die Forschung genutzt werden können.

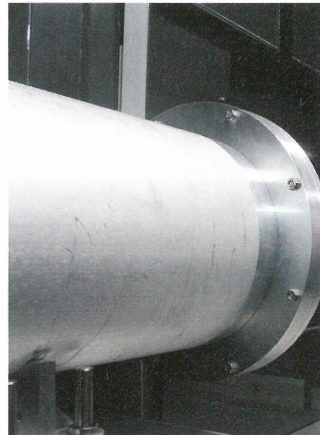
Die nächste Hürde ist das Messen der Neutronen, nachdem sie eine Probe durchleuchtet haben. Röntgenstrahlen schwärzen zum Beispiel spezielle Filme, Neutronen reagieren viel seltener mit entsprechendem Aufzeichnungsmaterial. Nikolay Kardjilov bringt daher hinter der durchleuchteten

Probe eine Mischung aus Zinksulfid und Lithiumfluorid an. Neutronen spalten nämlich Lithium-Atomkerne in einen superschweren Wasserstoff-Atomkern (Tritium) und ein sogenanntes Alpha-Teilchen, das im Prinzip nichts anderes ist als der Kern eines Helium-Atoms. Treffen diese Alpha-Teilchen auf Zinksulfid, lösen sie dort einen kurzen Lichtblitz aus, den Wissenschaftler „Szintillation“ nennen. Ein Chip, ähnlich einem lichtempfindlichen Chip in einer Digitalkamera, registriert den entstehenden grün-gelben Lichtblitz mit einer Wellenlänge von knapp 500 Nanometern.

NAHEZU LICHTGESCHWINDIGKEIT

Allerdings sind die Alpha-Teilchen durchschnittlich 25 bis 30 Mikrometer unterwegs, bis sie am Zinksulfid einen Lichtblitz auslösen. Das gemessene Licht entsteht daher ein winzig kleines Stück von der Stelle entfernt, an der die Neutronen den Lithium-Kern getroffen und ein Alpha-Teilchen erzeugt haben. Genauer als auf 50 Mikrometer oder den zwanzigsten Teil eines Millimeters löst diese Methode daher nicht auf, das heißt, enger beieinander liegende Teilchen werden nicht erkannt. Röntgenstrahlen liefern dagegen eine Auflösung von weniger als einem Mikrometer oder einem tausendstel Millimeter.

Kommt es auf eine möglichst hohe Auflösung an, greifen die Helmholtz-Forscher also doch wieder auf Röntgenstrahlen zurück. Aber nicht auf normale, sondern auf sogenannte Synchrotronstrahlung. Die stellen die Kollegen bei BESSY zur Verfügung (Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung), deren Institut zum 1. Januar 2009 mit dem HZB verschmolzen wird. Die Anlage in Berlin-Adlershof beschleunigt zunächst Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit und lässt sie anschließend in einem Speicherring im



EXPERIMENT Dr. Nikolay Kardjilov bereitet eine Brennstoffzelle für die Untersuchung mit Neutronenstrahlen vor.

Vakuum kreisen. Werden die superschnellen Elektronen von einem Magnetfeld abgelenkt, entsteht die Synchrotronstrahlung. Diese ist nichts anderes als Röntgenstrahlung, die bis zu einer Million Mal intensiver ist als die Strahlung einer herkömmlichen Röntgenröhre.

WAS GEHT IN BRENNSTOFFZELLEN VOR?

Die Energie dieser Synchrotronstrahlung lässt sich einstellen. Strahlen mit der relativ geringen Energie von zehn oder 15 Kilo-Elektronenvolt eignen sich durchaus, um Wasser zu beobachten, wie es in einer Brennstoffzelle aus Wasserstoff und Sauerstoff entsteht, wobei mithilfe einiger technischer Tricks elektrischer Strom erzeugt wird. „Das

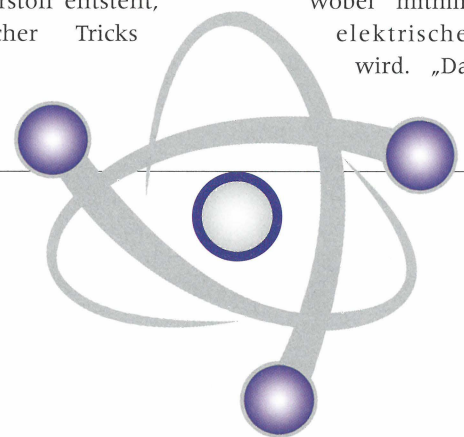
SPINPOLARISIERTE NEUTRONEN

Wie Kompassnadeln

HZB-Forscher zeigen Magnetfelder in Supraleitern.

>> So winzig ein Neutron auch ist, hat es doch einige Eigenschaften, die es charakterisieren. Eine davon nennen Physiker „Spin“ und meinen damit die Drehung des Neutrons um seine eigene Achse. Diese Drehung kann es links- oder rechtsherum ausführen, sodass es genau zwei solcher Spins gibt. In einem Magnetfeld verhalten sich die Neutronen dann wie winzige Kompassnadeln und richten ihren Spin gleichmäßig zum Magnetfeld aus. Mit solchen spinpolarisierten Neutronen lassen sich umgekehrt auch Magnetfelder untersuchen, wenn diese nämlich die Ausrichtung der Mini-Kompassnadeln verändern. Da Neutronen die meisten

Metalle gut durchdringen, ohne absorbiert oder abgelenkt zu werden, konnten die Forscher am Helmholtz-Zentrum Berlin mit ihren spinpolarisierten Neutronen kürzlich zum ersten Mal Magnetfelder innerhalb von Festkörpern messen. „Wir haben mit dieser Methode bereits Magnetfelder in Supraleitern untersucht“, freut sich Dr. Nikolay Kardjilov. Solche Supraleiter leiten elektrischen Strom praktisch ohne Widerstand und stehen daher seit einigen Jahren im Brennpunkt der Forschung. PONTO oder POLARIZED Neutron TOMOGRAPHY nennt Professor Wolfgang Treimer von der Technischen Fachhochschule Berlin den Apparat, den er mit Finanzie-

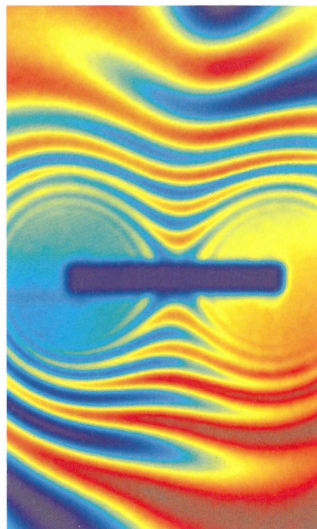


rung des Bundesforschungsministeriums zurzeit am HZB für solche Magnetfeldmessungen baut. „Damit können wir zum ersten Mal der Quantenmechanik direkt zuschauen“, begeistert sich der Forscher aus Wien, der seit 1977 in Berlin arbeitet und am damaligen Hahn-Meitner-Institut die Grundlagen der Neutronentomographie entwickelt und – unterstützt durch das BMBF – deren Machbarkeit demonstriert hat.

RHK



DR. INGO MANKE,
Gruppenleiter Tomographie
am HZB



MAGNETISMUS Das magnetische Feld eines Dipolmagneten, sichtbar gemacht mithilfe von polarisierten Neutronen.

Wassermanagement ist eines der größten Probleme bei der Herstellung von effektiven Brennstoffzellen“, erläutert Dr. Ingo Manke vom HZB die Motivation seiner Forschungen. Für die Tomographie-Untersuchungen hat er in die Wand einer Brennstoffzelle ein Loch gebohrt, durch das die Synchrotronstrahlung von BESSY eindringen kann. Kleinste Wassertröpfchen, die kleiner sind als der tausendste Teil eines Millimeters, werden dadurch sichtbar. „Wir schauen den Wassertröpfchen in einer Brennstoffzelle praktisch beim Entstehen zu“, freut sich Ingo Manke.

Allerdings funktioniert dies nicht bei laufendem Betrieb, denn man benötigt das gebohrte Loch. Neutronenstrahlen dagegen kann man nutzen, um in einer völlig intakten Brennstoffzelle das Entstehen und Abfließen des Wassers zu beobachten. Neutronen ignorieren nämlich den Edelstahl in der Wand der Brennstoffzelle. Sie gelangen ohne Loch ins Innere der Zelle. „Drei Zentimeter Stahl durchstrahlen wir problemlos“, sagt Nikolay Kardjilov. Wasserstoff und Wasser im Inneren einer Brennstoffzelle „sieht“ also der Neutronenstrahl. Gemeinsam liefern so Synchrotron- und Neutronenstrahlung den Wissenschaftlern und Ingenieuren ein genaues Bild von den Vorgängen in einer Brennstoffzelle. Mithilfe dieses Bildes können sie die Effizienz ihrer Zelle verbessern.

DREIDIMENSIONALE BILDER AUS DEM COMPUTER

Um die Vorgänge noch genauer zu verstehen, hätten die Brennstoffzellenforscher aber gern eine dreidimensionale Darstellung der Zelle. Von der Radiographie will man also zur Tomographie kommen. Dafür nehmen sie erst ein Bild der Brennstoffzelle auf, drehen sie dann ein klein wenig und fertigen das nächste Bild an. Haben sie die Probe einmal um ihre Achse gedreht und dabei sehr viele Querschnittsbilder aus verschiedenen Richtungen erhalten, berechnen aufwändige Computerprogramme aus den Einzelbildern ein dreidimensionales Bild. Auf einer solchen Tomographie-Aufnahme sieht der Ingenieur, was in jedem einzelnen Winkel seiner Brennstoffzelle vor sich geht, und kann sie entsprechend verbessern.

Ersetzen die Forscher den Wasserstoff in einer solchen Brennstoffzelle im laufenden Betrieb durch schweren Wasserstoff – Deuterium –, verschwindet das Neutronenbild des entstehenden Wassers langsam, weil Neutronen zwar an Wasserstoff-Atomkernen, nicht aber an Deuteriumkernen gestreut werden. Leiten die Forscher anschließend wieder normalen Wasserstoff in die Zelle, sehen sie, wo sich im laufenden Betrieb das Wasser in der Brennstoffzelle bildet. Und das kann durchaus ein anderer Ort als beim Start der Brennstoffzelle sein. Genau diesen laufenden Betrieb wollen die Ingenieure vor allem verbessern.

DIESELABLAGERUNGEN AUF DER SPUR

Ingenieure sind ohnehin gute Kunden bei der Neutronen- und Synchrotrontomographie am Helmholtz-Zentrum Berlin. Sie beobachten zum Beispiel, wie sich der Klebstoff verteilt, wenn Bleche im Automobilbau verklebt werden. Die Information ist für die Haltbarkeit der Verbindung sehr wichtig. Nikolay Kardjilov untersucht mit der Neutronentomographie außerdem, wie sich Ruß in Automotoren ablagert. Mit solchen Informationen kann die Verbrennung verbessert und damit der Kraftstoff-Verbrauch verringert werden. Beobachtet der Forscher, wo sich Ruß in Diesel-Filtern von Kraftfahrzeugen ablagert, kann die Wirksamkeit dieser Bauteile verbessert werden.

Als ein Hersteller von Flugzeugtriebwerken Ablagerungen in Abgasentlüftungsrohren von Flugzeugturbinen untersuchen wollte und sich deswegen an das Hahn-Meitner-Institut wandte, war Professor Wolfgang Treimer von der Technischen Fachhochschule Berlin (TFH) gefragt, der ebenfalls am Helmholtz-



„BEI RUND EINEM VIERTEL DER MESSZEIT AM HZB BEOBACHTEN KOLLEGEN DIE VORGÄNGE IN BRENNSTOFFZELLEN.“

Dr. Ingo Manke, Wissenschaftler am HZB

Zentrum forscht. An einer von ihm aufgebauten Demonstrationsanlage konnten die Forscher mithilfe der Neutronentomographie an einem Triebwerk herausfinden, wo sich Ablagerungen festsetzen. Setzen sich die Leitungen zu, steigt der Druck und es kann zu Explosionen kommen, die einen Absturz verursachen können. Wissen die Triebwerks-Ingenieure, wo die Ablagerungen entstehen, können sie die Zuverlässigkeit der Triebwerke weiter verbessern.

BIOLOGEN UND ARCHÄOLOGEN ALS GÄSTE

Neutronenstrahlen „sehen“ aber auch das Element Lithium, das zum Beispiel in Batterien verwendet wird. Mit der Berliner Neutronentomographie lassen sich daher auch solche Minizellen verbessern, die nicht nur in den verschiedensten elektronischen Geräten eingesetzt werden, sondern auch in Herzschrittmachern. Bessere Lithiumzellen halten länger und der Patient muss seltener zum Batterietausch operiert werden, erläutert Ingo Manke ein Anwendungsgebiet seiner For-

schung in der Medizintechnik. Sein Kollege Kardjilov fügt so gleich hinzu, dass auch Biologen oder Agrarwissenschaftler Gäste der Neutronentomographie sind. „Sie wollen Pflanzen beim Trinken beobachten“, schmunzelt er. Weil Neutronen an Wasserstoffkernen gestreut werden, könne sein Apparat sehr schön beobachten, wie Pflanzenwurzeln Wasser aufnehmen.

Gern kommen auch Archäologen zu den Berliner Forschern und untersuchen wertvolle Schwerter aus grauer Vorzeit. Mit Röntgenstrahlen entdecken sie eingelegtes Silber, die Neutronentomographie verrät, wo der Wasserstoff und damit organisches Material wie zum Beispiel Holz steckt. Und wenn die Forscher des Berliner Museums für Naturkunde wieder mal mit einem 30 Zentimeter langen und 270 Millionen Jahre alten Reptilienschädel am HZB auftauchen, durchleuchtet Nikolay Kardjilov auch dieses Fossil mit seinen Neutronenstrahlen. „Auch wenn wir die gesuchten Gehörknöchelchen nicht entdecken konnten, war die Analyse doch sehr aufschlussreich“, erinnert sich der Forscher.

INTERVIEW

Erkenntnisse aus der Datenflut ziehen

SICHTBAR im Gespräch mit Professor John Banhart über die Möglichkeiten moderner Tomographie.

SICHTBAR: Herr Banhart, die Tomographie kennt man vor allem als bildgebendes Verfahren aus der Medizin. Wie unterscheiden sich die tomographischen Methoden, die Sie für die Materialwissenschaften nutzen?

Banhart: Vor allem in der Auflösung und dem Strahlenfluss. In der Materialforschung haben wir es mit massiven Stoffen zu tun, die die auftreffende Strahlung viel stärker blockieren als biologische Organismen. Außerdem benötigen wir eine viel höhere Auflösung und deshalb insgesamt einen viel größeren Strahlenfluss. Es ist eine ganz andere Welt als in der Medizin.

S: Mit welchen Problemen kämpft man heute in der Tomographie?

B: Zum einen ist die Messmethode sehr anspruchsvoll, etwa beim Gestalten der Strahlführung oder der Genauigkeit, mit der die Drehachse des Untersuchungsobjekts eingestellt werden muss. Bei den Neutronen wiederum kommt es vor, dass diese nicht fokussiert genug aus dem Strahlrohr treten. Das Hauptproblem betrifft aber die Frage, wie man aus der gewaltigen Datenmenge eine physikalische Information extrahiert. Es nützt ja wenig, nur schöne Bilder zu haben. Vielmehr muss man aus den Bildern sinnvolle Parameter bestimmen, um eine vorgegebene Fragestellung zu beantworten.

S: Wo sehen Sie die größten Potenziale der Tomographie für die Materialwissenschaften?

B: Vor allem mit Synchrotronstrahlen erreichen wir Auflösungsbereiche, die für Materialuntersuchungen sehr interessant sind. Und die technischen Entwicklungen gehen so weit, dass wir an der ESRF, der stärksten europäischen Quelle, sogar schon Echtzeit-Tomographie machen können. Erst kürzlich haben wir so

unsere Metallschäume untersucht und gemessen, wie lange es dauert, bis eine Schaumblase platzt. 40.000 Bilder haben wir dabei pro Sekunde erzeugt und so Bewegtbilder erhalten.

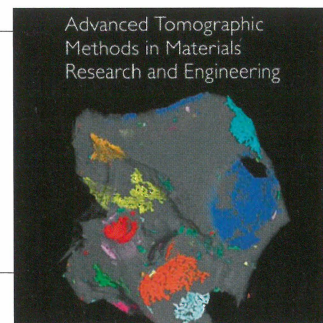
S: Wie sieht es mit der breiten Anwendung aus, wissen normale Ingenieure um die Methoden und wie man sie anwenden kann?

B: Das volle Spektrum der Methoden ist tatsächlich nicht bekannt. Die Synchrotron-Tomographie schon eher, die Neutronen-Tomographie dagegen kaum. Wir betreiben deshalb auch aktives Marketing. Wir suchen immer wieder nach neuen Anwendungsfeldern, halten Vorträge und sprechen die Leute an. Die Brennstoffzellen sind ein gutes Beispiel dafür. Ein Problem ist allerdings, dass man nicht immer und schon gar nicht schnell ausreichend Strahlzeit bekommt.

ina



PROFESSOR JOHN BANHART leitet die Abteilung Werkstoffe am HZB.



TOMOGRAPHIE-BUCH John Banhart hat ein Buch über moderne Tomographie-Verfahren veröffentlicht.