

GROSSGERÄTE

Neutronen nach Maß

Die Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz bietet brillante Neutronenstrahlen für Wissenschaft, Technik und Medizin.

Winfried Petry und Jürgen Neuhaus

Egal ob es sich um Polymere, technische Werkstoffe oder Motorteile handelt, Neutronen sind die idealen Sonden, wenn es darum geht, Materie zu untersuchen, ohne sie dabei zu zerstören. Die neue Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II), die 2004 in Betrieb gegangen ist, bietet die Möglichkeit, intensive Neutronenstrahlen für ein breites Spektrum an Anwendungen gezielt „maßzuschneidern“.

Eine neue Forschungs-Ära der noch jungen Bundesrepublik begann vor fast genau 50 Jahren auf der Flur der kleinen bayerischen Gemeinde Garching nördlich von München. In nur elf Monaten Bauzeit entstand der vom Volksmund „Atom-Ei“ getaufte erste Forschungsreaktor Münchens (FRM I), der am 31. Oktober 1957 erstmals Neutronen erzeugte. Maßgeblich verantwortlich für die Errichtung dieser ersten nukleartechnischen Anlage in Deutschland nach dem Krieg war der Münchner Physik-Professor Heinz Maier-Leibnitz. In Garching legte er den Grundstein für seine Schule der Neutronenforschung, die rasch die internationale Führung auf diesem Gebiet übernahm – nicht zuletzt durch die von ihm gemeinsam mit dem französischen Physiker Jules Horowitz in den 70er-Jahren konzipierte Hochflussneutronenquelle des Instituts Laue Langevin (ILL) in Grenoble.

Bereits in den 80er-Jahren keimten die ersten Ideen für einen leistungsfähigeren Nachfolger des Atom-Eis, um den gewachsenen Anforderungen der Wissenschaft an eine Neutronenquelle gerecht zu werden. 1996 fand der erste Spatenstich statt und 2001 war der neue Forschungsreaktor FRM II fertig gestellt. Die Investitionskosten beliefen sich dabei auf insgesamt 435 Millionen Euro. Doch bis zur ersten Erzeugung von Neutronen vergingen nochmals fast drei Jahre. Hintergrund des jahrelangen Ringens um die Erteilung der notwendigen dritten und letzten Teilgenehmigung ist der Betrieb des FRM II mit hochangereichertem Uran (HEU). Deshalb engagieren sich die Betreiber des FRM II intensivst an einer Entwicklung hochdichter Brennstoffe, um baldmöglichst auf ein Brennelement mittlerer Anreicherung umzustellen, ohne dass die Neutronenquelle dadurch an Qualität einbüßt. Das heutige Brennelement enthält 8 Kilogramm HEU, das für einen Betriebszyklus von 52 Tagen ausreicht.¹⁾ Pro Jahr werden fünf Elemente verbraucht, sodass der FRM II seinen Nutzern 260 Tage im Jahr zur Verfügung steht.



Vom zentralen Reaktorgebäude der Forschungsneutronenquelle FRM II werden kalte Neutronen nach rechts in die Neu-

tronenleiterhalle West geführt, deren Instrumente sich in Zukunft bis in das dann leer geräumte Atom-Ei erstrecken.

Neutronen, die neutralen Bausteine der Atomkerne, durchdringen mühelos feste Materie und können uns detaillierten Aufschluss über deren Innenleben geben. Zehn Zentimeter Aluminium schwächen einen Strahl „kalter“ Neutronen in seiner Intensität nur um 37 Prozent ab, bei zehn Zentimeter dicken Bleiplatten sind es sogar nur 17 Prozent. Quantenmechanisch lassen sich die neutralen Teilchen auch als Materiewelle beschreiben, die beim Durchgang durch Materie ähnlich wie Röntgenphotonen an den Gitterebenen gebeugt werden. Damit uns der Bragg-Winkel dabei verraten kann, wie die Atome in der Probe angeordnet sind, muss die de Broglie-Wellenlänge der Neutronen

1) Genauer gesagt besteht der Brennstoff aus ²³⁵U, das zu 93 % angereichert ist und als U₃Si₂ mit Al zu einer Urandichte von 3 g/cm³ vermischt ist.

KOMPAKT

- Die Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) ist 2004 in Betrieb gegangen.
- Der FRM II liefert aufgrund des kompakten Brennelements, der leistungsfähigen Sekundärquellen und optimierter Neutronenleiter ein breites Spektrum von Neutronenstrahlen von hoher Strahlqualität.
- Gemeinsam mit den innovativen Instrumenten ist es damit möglich, die Neutronen für eine große Vielfalt wissenschaftlicher, technischer und auch medizinischer Zwecke zu nutzen.
- So lässt sich Materie zum einen zerstörungsfrei mit Neutronenstrahlen untersuchen oder aber durch Bestrahlung mit Neutronen gezielt modifizieren.

Prof. Dr. Winfried Petry und Dr. Jürgen Neuhaus, Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz, Technische Universität München, 85747 Garching

vergleichbar sein mit der Gitterkonstante, also etwa 0,1 nm betragen. Dies ist bei thermischen Neutronen der Fall (Tabelle). Während jedoch Röntgenphotonen gleicher Wellenlänge eine Energie im keV-Bereich haben, liegt die Bewegungsenergie der Neutronen in der gleichen Größenordnung wie die der Atome und Moleküle in kondensierter Materie. Streuen die thermischen Neutronen also inelastisch an den Atomen, ist dies als deutliche Energieänderung des Neutronenstrahls messbar. Damit lässt sich herausfinden, wie sich die Atome oder Moleküle innerhalb der Materie bewegen.

Das Neutron besitzt auch ein magnetisches Moment ($\mu_{\text{Neutron}} = \mu_{\text{Elektron}}/1836$), das beim Streuprozess mit dem magnetischen Hüllmoment des Atoms seine Ausrichtung bzw. seinen Spinzustand ändert. Damit teilt es uns Größe, Ausrichtung und Dynamik des Hüllmagnetismus der untersuchten Atome mit. Primär streuen die Neutronen jedoch am Kern der Atome, Streulängen variieren also mit dem Isotop – und nicht etwa mit dem Element. Die Streulängen b von verschiedenen Isotopen können sogar unterschiedliche Vorzeichen haben, was einem Phasensprung der gestreuten Wellenlänge um π entspricht. Herausragendes Beispiel dafür sind die beiden Wasserstoffisotope H ($b_{\text{H}} = -3,74 \text{ m}^{-15}$) und D ($b_{\text{D}} = +6,67 \text{ m}^{-15}$). Dieser Kontrastunterschied erlaubt es z. B., ein Polymermolekül in der Lösung chemisch äquivalenter Moleküle „anzufärben“ und so sichtbar zu machen.

Neutronen eignen sich aber nicht nur als Sonde, um die Struktur der Materie aufzuklären, sondern sie erlau-

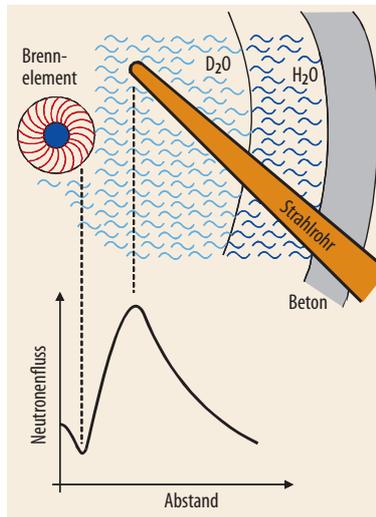


Abb. 1 Die intensive primäre Neutronenquelle des FRM II besteht aus einem Brennelement in Kompaktkern-Bauweise. Die dort freigesetzten Neutronen werden durch schweres Wasser abgebremst (moderiert) und gelangen mit den tangential ausgerichteten Strahlrohrnasen zu den Instrumenten. Die Strahlrohrnasen und weitere Moderatoren sind möglichst im Maximum des thermischen Flusses 12 cm außerhalb des Kernrandes platziert.

ben es auch, Materie durch Bestrahlung zu verändern. Dabei entstehen aufgrund von Kernreaktionen durch Neutroneneinfang stabile oder radioaktive Isotope, die industrielle Anwendungen wie die Siliziumdotierung oder die Entwicklung besserer Radiopharmaka eröffnen.

Wie bei jedem Reaktor entstehen die Neutronen beim FRM II aus der Kernspaltung des Uran-Isotops U-235. Ein thermisches Neutron spaltet Uran-Kerne, dabei entstehen zwei Spaltprodukte, d. h. Kerne mit kleinerer Massenzahl, im Durchschnitt 2,4 schnelle Neutronen und 200 MeV Energie. Im Hinblick auf die Nutzung der Neutronen ist nicht ihr über alle Raumrichtungen integrierter Fluss von Interesse, sondern der Fluss pro Raumwinkelelement, d. h. eine möglichst hohe Brillanz. Um möglichst viele der isotrop emittierten Neutronen aufzufangen, wäre daher eine punktförmige Quelle ideal. Wegen der enormen Energie von 200 MeV, die pro Kernspaltung

freigesetzt wird, und der Notwendigkeit, die Kühlung des Brennelements sicher zu beherrschen, sind einer Verkleinerung der Quelle jedoch ganz entscheidende Grenzen gesetzt. Der Kern des FRM II besteht deshalb aus nur einem kompakten Brennelement mit lediglich 20 Liter aktivem Volumen (Abb. 1). Bei einer thermischen Leistung von nur 20 MW erzeugt er so einen maximalen Fluss von 8×10^{14} thermischen Neutronen/(cm²s) im Moderator und ist damit die Quelle mit dem besten Verhältnis von thermischem Fluss zu Wärmeleistung.

Beim FRM II sind die Abführung der Wärme (Kühlung im Brennelement) und das Abbremsen der einige Milliarden Grad heißen Neutronen auf die erwünschten Energien in den Moderatoren räumlich getrennt. Leichtes Wasser (H₂O) strömt durch den Kompaktkern und führt pro Liter Brennelementvolumen 1 MW Wärme sicher ab. Zum Vergleich: Die Wärmedichte in einem typischen Druckwasserkernkraftwerk beträgt 100 kW pro Liter – also nur ein Zehntel. Im rund um das Brennelement angeordneten Moderator kühlen die heißen Neutronen vorwiegend durch elastische Stöße bis auf Raumtemperatur ab. Ungefähr die Hälfte dieser thermischen Neutronen diffundiert wieder zurück in das Brennelement, um so die nächsten Kernreaktionen zu induzieren. Die verbliebenen sollen möglichst effizient zum Experiment gelangen. Deshalb besteht der Moderator aus D₂O anstatt H₂O, weil dann der Fluss thermischer Neutronen erst ca. 12 cm jenseits des Randes des Brennelementes maximal ist und nicht bereits weiter innen. Ferner hat D₂O den geringeren Absorptionsquerschnitt. In den Moderator ragen mit He gefüllte Strahlrohre, die mit geringer Absorption die thermischen Neutronen nach außen fliegen las-



Abb. 2 Blick in die mit Instrumenten ausgefüllte Experimentierhalle. Der links sichtbare Schwerbeton (rot-braun) schließt die Primärabschirmung des Brennelements ab. Vorne ist das thermische Dreiachsenspektrometer PUMA, dahinter TRISU zu sehen.

sen und gleichzeitig sehr effizient den Fluss schneller Neutronen vom Brennelement aus der Abschirmung heraus versperren (Abb. 1).

Durch den Einsatz von Schwerbeton hoher Dichte reduziert sich der Radius des biologischen Schildes um den Moderator auf vier Meter. Hier sind die ersten optischen Elemente wie Monochromatoren oder Neutronenleiter platziert. Bei gegebener Querschnittsfläche dieser Elemente fangen sie ein umso größeres Raumwinkelement des isotrop emittierten Neutronenstrahls auf, je dichter sie an die Quelle heranragen. Experimente, die den höchsten Primärfluss erfordern, sind deshalb um die polygonförmige primäre Abschirmung angeordnet (Abb. 2 und 3). Solche, die höchste Auflösung in Bezug auf Streuvektor oder Energieübertrag benötigen, finden sich in der weiter entfernten Neutronenleiterhalle, die einen niedrigen Messuntergrund aufweist.

Dorthin gelangen die benötigten Neutronen über speziell entwickelte Neutronenleiter (siehe Infokasten „Superspiegel für Neutronen“). Das ihnen zugrunde liegende Konzept geht auf die revolutionären Ideen von Heinz Maier-Leibnitz zurück. Stellvertretend für viele Optimierungen am FRM II sind hier die innovativen Neutronenleiter zu nennen. Störende kurzwellige Neutronen werden durch eine S-förmige Leitungsführung besser unterdrückt. Daneben bringen gedrehte (tordierte) Neutronenleiter mehr Intensität für die Reflektometrie an flüssigen Oberflächen, und elliptisch fokussierende Neutronenleiter erhöhen drastisch die Intensität an kleinen Proben.

Bei einem Forschungsreaktor, der sich für ein breitgefächertes Anwenderspektrum eignen soll, genügt es selbstverständlich nicht, nur einen besonders großen Neutronenfluss zu erzeugen und die Neutronen möglichst verlustfrei aus dem Reaktorkern zu den Experimentierplätzen herauszuleiten. Ebenso wichtig sind die nachfolgende Optik und Detektion. Erst dadurch, dass jedes dieser Elemente optimiert wurde, kann der FRM II seine besondere Leistungsfähigkeit entfalten [1]. Letztlich wünscht sich jeder Experimentator maximalen Fluss nützlicher Neutronen am Ort der Probe – und das so untergrundfrei wie möglich.

Neutronenquelle anzapfen, aber richtig

Der Clou einer leistungsfähigen Forschungsneutronenquelle besteht darin, Neutronen unterschiedlicher Energie bereitzustellen, die für die jeweilige Anwendung optimal sind. Dazu dienen beim FRM II mehrere Sekundärquellen (oder Spektrumshifter), dank derer der FRM II die Forschungsneutronenquelle mit dem breitesten Anwendungsspektrum ist. Die Quellen (Tabelle und Abb. 3) liefern

- hohe Intensitäten ultrakalter Neutronen für Untersuchungen zu den fundamentalen Wechselwirkungen,
- ein breites Spektrum kalter Neutronen für Fragestellungen vor allem aus dem Bereich der weichen Materie,
- einen hohen thermischen Fluss für Strukturfor-

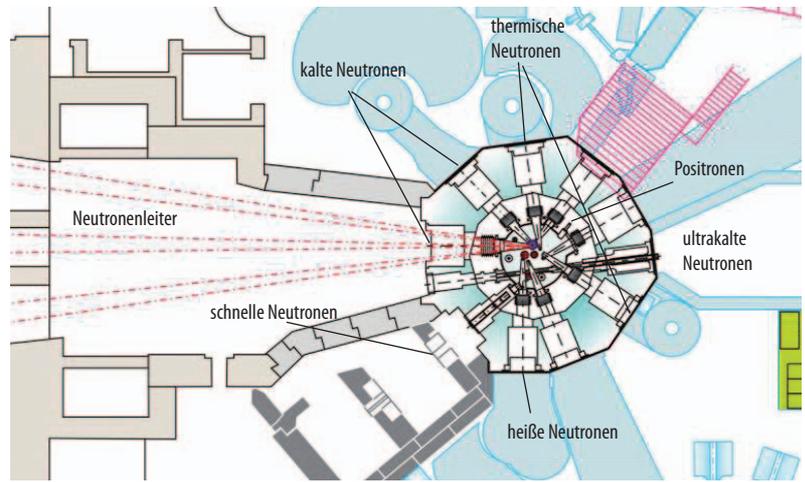


Abb. 3 Alle zehn horizontalen Strahlrohre, welche die Neutronen aus dem Kernbereich hinausführen, sind auf spezifische Sekundärquellen ausgerichtet, die für das breite Spektrum unterschiedlicher Neutronenarten sorgen. Um das primäre biologische Schild reihen sich die Instrumente mit hoher Primärintensität. Mittels Neutronenleitern aus Superspiegeln (siehe Infokasten) werden kalte Neutronen in die Neutronenleiterhalle West (links) zu Messplätzen transportiert, die besonders frei von störenden Untergrundeffekten sind.

- heiße Neutronen, um auch komplexe Strukturen mit hoher Präzision zu vermessen,
- schnelle Neutronen für die Tumortherapie oder Durchleuchtung massiver technischer Objekte und
- den brilliantesten Strahl thermischer Positronen für Materialuntersuchungen.

Um die Maxwellsche Verteilung der Neutronenwellenlängen – ausgehend von den thermischen Neutronen – zu längeren oder kürzeren Wellenlängen zu verschieben, dienen flüssiges D₂ bei 25 K bzw. Graphit bei 2000 °C als Moderatoren. Die kalte Quelle ist dabei „untermoderiert“, d. h. sie verschiebt die Maxwell-Verteilung nicht komplett von 300 K zu 25 K, sondern erzeugt vielmehr ein breites Spektrum von sowohl thermischen als auch kalten Neutronen. Etwa 20 cm vom Brennelement entfernt wird in wenigen Jahren eine Quelle ultrakalter Neutronen, deren Geschwindigkeit nur noch wenige m/s betragen wird, eingefügt. Nach ersten Tests des Konzepts erwarten wir hier Dichten von bis zu 10 000 ultrakalten Neutronen pro Kubikzentimeter. Dies wäre Weltrekord. Da schnelle Neutronen wegen des Moderators nicht nach außen geführt werden können, befindet sich an dessen äußerem Rand eine unterkritische Anordnung von ²³⁵U. Die ther-

Strahlart	Moderator (und dessen Temperatur)	Energie	Wellenlängen
ultrakalte Neutronen	festes D ₂ (5 K)	10 ⁻⁶ – 0,01 meV	10 – 1000 nm
kalte Neutronen	flüssiges D ₂ (25 K)	0,1 – 20 meV	0,2 – 2,5 nm
thermische Neutronen	schweres Wasser D ₂ O (35 °C)	3 – 150 meV	0,07 – 0,5 nm
heiße Neutronen	pyrolytisches Graphit (2000 °C)	40 – 10 ³ meV	0,028 – 0,14 nm
schnelle Neutronen	unterkritische ²³⁵ U-Anordnung	0,5 – 2 MeV	–
Positronen	Cd mit Pt-Moderator (Raumtemperatur)	15 – 1000 eV	–

Tabelle Der FRM II bietet ein einmalig breites Band von Moderatoren bzw. Sekundärquellen optimiert für die verschiedenen Anwendungen an.

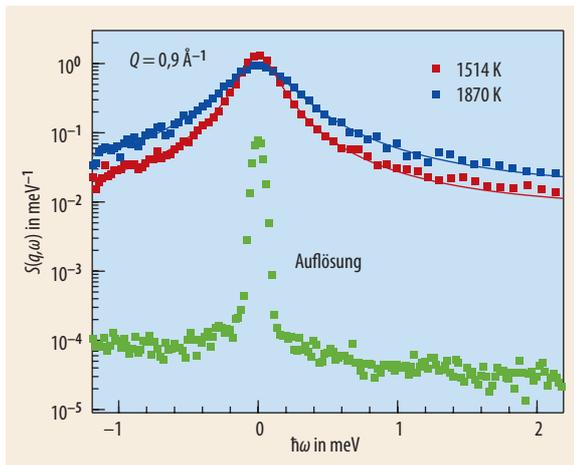


Abb. 4 Die Brownsche Bewegung in bis zu 230 K unterkühltem flüssigen Nickel (Ni, Schmelztemperatur 1728 K) verursacht stochastisch Energiegewinn- und -verluststreuung. Aus der Breite und Form dieser quasielastischen Streuung der Neutronen erschließt sich die atomare Beweglichkeit der Ni-Atome.

mischen Neutronen aus dem Moderator induzieren darin mittels Kernspaltung schnelle Neutronen, welche durch ein Strahlrohr austreten können. Schließlich ist ein weiteres Strahlrohr mit Cadmium ausgekleidet, das Neutronen außerordentlich gut absorbiert und als Folge davon hochenergetische Gammaquanten emittiert. Diese konvertieren in dünnen Pt-Folien teilweise in Elektronen und Positronen, wobei Positronen nach außen geführt werden. Mit einem Fluss von 5×10^8 Positronen/(cm²s) ist der FRM II daher auch die intensivste Quelle thermischer Positronen.

Zwischen den Strahlrohren ragen vertikale Bestrahlungskanäle in den Moderator. Der FRM II ist auf maximalen thermischen Fluss aus seinen Strahlrohren optimiert, weniger auf maximalen Fluss seiner

Bestrahlungskanäle. Der große D₂O-Moderator bietet aber auch für letztere einen unschlagbaren Qualitätsvorteil, da in diesen Kanälen der schnelle Neutronenfluss gegenüber dem thermischen Fluss abhängig von der Entfernung vom Kern um drei bis fünf Größenordnungen unterdrückt ist.

Neben einem breiten Spektrum brillanter Neutronenstrahlen stehen am FRM II für die Experimente exzellente und neuartige Instrumente zur Verfügung. Einige Beispiele mögen dies illustrieren und gleichzeitig Einblick in die vielfältigen Forschungs- und Anwendungsbereiche für Neutronenstrahlen geben.

Innovative Instrumente

Annähernd die Hälfte aller Instrumente nutzt die Neutronen der kalten Quelle, z. B. das Flugzeitspektrometer TOFTOF (Time Of Flight) in der Neutronenleiterhalle West.²⁾ Wenn Neutronen inelastisch an den Atomen einer Probe gestreut werden, ändert sich ihre Energie. Die damit einhergehende Geschwindigkeitsänderung lässt sich über die Flugzeit der Neutronen bestimmen. Dazu muss der Strahl jedoch so präpariert werden, dass die Neutronen alle zum selben Zeitpunkt und mit derselben Geschwindigkeit auf die Probe treffen. Dies lässt sich mithilfe rotierender geschlitzter Scheiben („Chopper“) erreichen, von deren Geschwindigkeit die Auflösung eines solchen Flugzeitspektrometers empfindlich abhängt. In Zusammenarbeit mit den Ingenieuren der TU München wurden daher neuartige Kohlefaserscheiben entwickelt, die Zentrifugalkräfte erlauben, welche die Festigkeit metallischer Scheiben übertreffen. Zusätzlich lässt sich der Neutronenfluss am Probenort dadurch erhöhen, dass fokus-

2) Hier werden die kalten Neutronen übrigens erstmalig mittels eines S-förmig gekrümmten Neutronenleiters aus Superspiegeln über ca. 60 Meter zum Probenort transportiert.

SUPERSPIEGEL FÜR NEUTRONEN

Neutronenleiter aus mit Multilagenschichtem Glas leiten die Neutronen zu den Instrumenten. Sie funktionieren völlig analog zu Lichtleitern, wenn man Neutronen als Materiewellen beschreibt. Totalreflexion findet unter einem kritischen Einfallswinkel $\sin \alpha_c = \sqrt{N b / \pi} \lambda$ statt, wenn der Brechungsindex für Neutronenwellen $n^2 = 1 - N b \lambda^2 / \pi$ im äußeren Medium kleiner ist als im inneren. Für die überwiegende Zahl der Isotope ist die Streulänge b positiv, also $n < 1$. Das Innere des Neutronenleiters ist deshalb zweckmäßig Vakuum und der äußere Spiegel aus einem Material mit hoher Anzahldichte N und großem b . Das Einsetzen der Werte für Nickel ergibt

$$\alpha_{c, Ni} \text{ in } ^\circ = 1 \times \lambda \text{ in nm.}$$

Neutronen der Wellenlänge 0,5 nm müssen also unter einem Winkel kleiner $0,5^\circ$ auf die Oberfläche einfallen, um noch reflektiert zu werden. Praktisch wird Ni auf sehr ebenen Glasplatten aufgebracht, die dann zu ge-



eigneten rechteckigen Leiterröhren zusammengeklebt werden. Bei Superspiegeln lässt sich dieser bescheidene Winkel der Totalreflexion durch einen Trick vergrößern. Auf das Glas werden alternierend Ni- und Ti-Schichten von einer solchen Dicke d aufgebracht, dass die Bragg-Beugung an diesem Multischichtsystem direkt an den Glanzwinkel α_c anschließt (Abb.). Kontinuierlich variierende Schichtdicke d bedeutet Bragg-Reflexion über einen

ausgedehnten Winkelbereich. Diese scheinbare Ausdehnung von α_c wird üblicherweise in Vielfachen der Totalreflexion für eine Ni-Schicht benannt,

$$m = \alpha_c (\text{Superspiegel}) / \alpha_c (\text{Ni}).$$

$m = 2$ erfordert typisch 100 Schichtlagen, $m = 3$ bereits 1000 Schichtlagen. Diese sog. Superspiegel sind ein effizientes Mittel, um einen gegenüber reiner Ni-Beschichtung erhöhten Neutronenfluss zu transportieren.

sierende Neutronenleiter den Strahl noch weiter bündeln. Damit bietet TOFTOF heute in seiner Instrumentenklasse die höchste Intensität bei bester Auflösung und geringstem Untergrund.

Messungen der atomaren Beweglichkeit in flüssigem Nickel bei Temperaturen bis zu 230 K unter dem Schmelzpunkt, die in der Arbeitsgruppe von Andreas Meyer (DLR) durchgeführt wurden, zeigen die Leistungsfähigkeit dieses Instruments (Abb. 4) [2]. Möglich ist dies nur im völlig Behälter-freien Schmelzverfahren mit induktiver Heizung. Hier sind nur kleine Proben von 6 bis 8 mm Durchmesser machbar. TOFTOF bringt jedoch die nötige Intensität und Auflösung sowohl in Energie- als auch Impulsübertrag, um trotz komplizierter Probenumgebung und kleinen Proben den atomaren Diffusionsmechanismus in stark unterkühlten Schmelzen aufzuklären. Solche Messungen ergänzen Experimente in der Schwerelosigkeit des Weltraums.

Wegen der Abschaltung des Forschungsreaktors DIDO am Forschungszentrum Jülich ziehen einige dessen Instrumente zum FRM II um. Der dabei erreichte Qualitätsgewinn macht deutlich, wie sich das

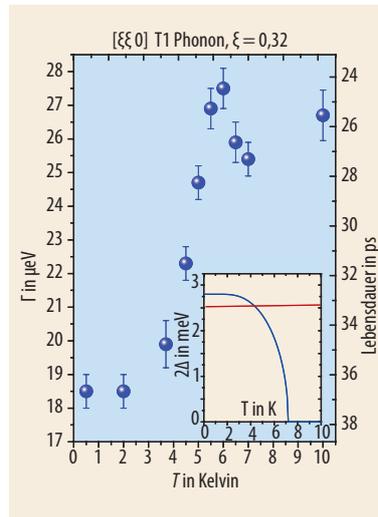


Abb. 5 Sobald die Energie des supraleitenden Gaps $2\Delta(T)$ in Blei bei Erhöhung der Temperatur unter die Energie des hier gezeigten Phonons $E_{ph} = 2,5$ meV sinkt, steigt die Phononenlinienbreite, d. h. die Phononenlebensdauer nimmt ab. Ursache ist das Aufbrechen der supraleitenden Cooper-Paare durch Wechselwirkung mit dem Phonon.

an sich schwache Neutronenlicht effizienter nutzen lässt. Das Spinecho-Spektrometer NSE (siehe Infokasten und Abb. i) arbeitet nun am FRM II über einen Wellenlängenbereich von 0,4 bis 1,6 nm, gewinnt einen Faktor 15 an Intensität und steigert die beobachtbare Relaxationszeit von 20 auf 400 ns. Solche Instrumentverbesserungen sind z. B. dringend nötig, um die schlangenartigen Bewegungen (Reptation) von Polymeren in Polymerschmelzen oder Diffusionsmechanismen in Emulsionen besser verstehen zu können.

Mit einem Dreiachsenspektrometer, für dessen Erfindung Bertram Neville Brockhouse 1994 den Nobelpreis erhielt, lässt sich elegant der vierdimensionale Impuls-Energieraum durchfahren, z. B. um beliebig Phononendispersionen (Gitterschwingungen) auszumessen.³⁾ Mit der an der TU München

entwickelten Methode des Resonanzspinechos für Neutronen hat nun die Gruppe um Bernhard Keimer (MPI für Festkörperforschung, Stuttgart) die Energieauflösung eines thermischen Dreiachsenspektrometers um einen Faktor 100 auf $1 \mu\text{eV}$ verbessert. Mit dem Instrument TRISP wurden kleinste Änderungen der

3) Um Feinheiten wie die Lebensdauer von Phononen auszumessen, fehlt es diesem Instrumenttyp jedoch an Energieauflösung.

NEUTRONENSPINECHO

Feri Mezei hat das in der NMR bekannte Prinzip des Kernspinechos auf Neutronen übertragen [3]. Spin-polarisierte Neutronen durchlaufen ein starkes homogenes Magnetfeld, in dem die einzelnen Spins aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit auseinanderlaufen und typischerweise 10^4 -mal präzedieren. Beim anschließenden inelastischen Streueignis an der Probe erfahren die Neutronen eine relative Energieminderung von z. B. 10^{-5} . Die gestreuten Neutronen durchlaufen nun ein zum ersten Feld völlig äquivalentes zweites Feld, dessen Richtung jedoch umgekehrt ist. Die vorher „aufgewickelten“ Präzessionen werden dabei wegen der geänderten Geschwindigkeit bis auf 5/100 Spindrehung wieder exakt „abgewickelt“. Diese Änderung der Spinpolarisation gegenüber der Ausrichtung vor dem ersten Magnetfeld wird gemessen und ist ein extrem empfindliches Maß für inelastische Streuprozesse.

Die Größe der Magnetspulen in Abb. i gibt einen ersten Eindruck vom enormen technischen Aufwand, um ein hohes und mit einer relativen Präzision von ungefähr 10^{-6} gleiches Feldintegral

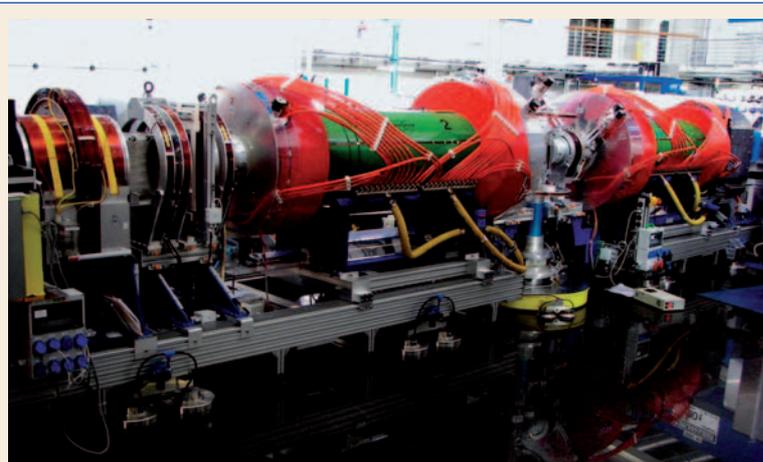


Abb. i Um beim Neutronenspinecho-Instrument NSE den Streuvektor einzustellen, lassen sich die viele Tonnen schweren

Magnete dank Luftkissenfüße auf dem „Tanzboden“ sozusagen mit dem kleinen Finger bewegen.

auf beiden Seiten des Spektrometers zu haben.

Golub, Gähler und Keller [4] haben später an der TU München das sog. Resonanzspinechoverfahren entwickelt. Hier fliegen die polarisierten Neutronen Präzessions-frei durch einen Magnetfeld-freien Raum, bekommen jedoch am Anfang und Ende des Flugweges durch völlig synchron geschal-

tete Hochfrequenzspulen eine Spinkodierung bzw. diese wird abgefragt. Versetzt man sich aus dem Laborraum in den Hochfrequenzraum, ist das Messprinzip völlig analog zum oben geschilderten konventionellen Spinechoverfahren. Resonanzspinecho hat den Vorteil, wesentlich kompakter realisierbar zu sein. Das Dreiachsenspektrometer TRISP nützt dieses Prinzip.

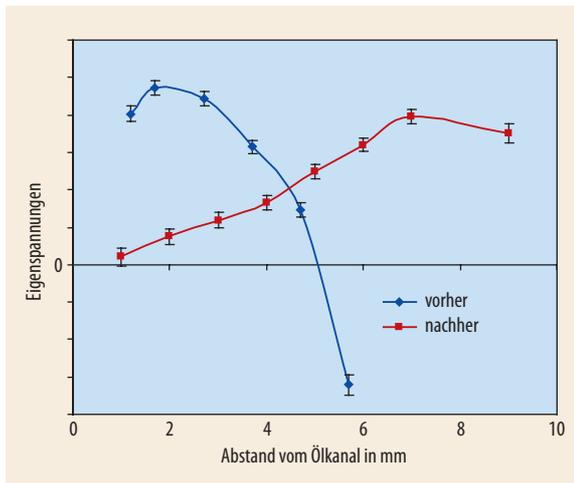


Abb. 6 Neutronen ermöglichen es, die tangentialen Spannungen in der Nähe des Ölkanals im Inneren einer Kurbelwelle zu messen. Während vor einer besonderen Behandlung Spannungen in der Nähe des Kanals auftreten (blau), ist dies anschließend nicht mehr der Fall (rot).

Lebensdauer von Phononen an der Sprungtemperatur T_c des klassischen BCS-Supraleiters Pb nachgewiesen [5] (Abb. 5). Die Bedeutung dieser Experimente liegt im detaillierten experimentellen Nachweis der Elektron-Phonon-Kopplung bei klassischen Supraleitern. Die spannende Frage ist nun, ob mit diesem Instrument auch Evidenzen für die vermutete Wechselwirkung zwischen Elektronen und magnetischen Anregungen (Magnonen) in Hochtemperatur-Supraleitern gefunden werden. Dass sich auch die Lebensdauer von Magnonen mit ähnlicher Präzision vermessen lässt, wurde bereits am Antiferromagneten MnF_2 gezeigt [6].

Neutronen sind – aufgrund der großen Eindringtiefe und der guten Kontrastvariation zwischen verschiedenen Elementen – auch unschlagbar, wenn es darum geht, zerstörungsfrei innere Spannungen auszumessen. Diese bestimmen z. B. den Lastbereich, unter dem meist komplexe Werkstücke eingesetzt werden können. Mit der Beugung von Neutronen lassen sich die atomaren Abstände in den Mikrokristallen komplexer Materialien mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-4} bestimmen. Aus den Änderungen dieser atomaren Abstände aufgrund von äußerer Last oder inneren Kräften ergeben sich über den bekannten Elastizitätsmodul direkt die Spannungen, und zwar – für den Ingenieur besonders wertvoll – in allen drei Raumrichtungen. So lassen sich z. B. die Spannungen tief im Inneren einer Lastwagenkurbelwelle mithilfe von Neutronen untersuchen (Abb. 6). Erst ein optimiertes Schmiede- und Nachbehandlungsverfahren ermöglicht es, die Spannungen am Rand des inneren Ölkanals zu minimieren. Dies ist unabdingbar, um zu vermeiden, dass sich Risse vom Ölkanal aus weiter ausbreiten. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie atomare Eigenschaften die makroskopische Funktion bestimmen und wie Grundlagenmethoden in die industrielle Forschung Eingang finden. Das Diffraktometer StressSPEC – erbaut unter Federführung des Hahn-Meitner-Instituts – ist speziell für solche Fragestellungen, auch an großen Werkstücken, ausgerichtet.

Gemeinsam mit ähnlichen Instrumenten am Institut Laue Langevin und an der englischen Spallationsquelle ISIS gehört es zu den besten seiner Klasse.

Durchblick, Dotierung und Therapie

Auf den ersten Blick ist die Durchleuchtung von technischen Objekten mit Neutronen eine triviale Angelegenheit. Spannend wird diese durch die enormen technologischen Fortschritte der letzten Jahre. Eine möglichst starke Neutronenquelle wird durch eine kleine Lochblende mit Durchmesser D und anschließender langer Flugstrecke L auf das zu untersuchende Objekt abgebildet, und der dahinter stehende zweidimensionale Detektor muss schnell und mit hoher räumlicher Auflösung das Transmissionsbild aufnehmen. Die Radiographie- und Tomographieanlage ANTARES am FRM II erlaubt ein einmaliges L/D -Verhältnis von 400 bis zu 14 000, um die geometrische Auflösung zu optimieren. Die Auflösung ist so nicht mehr durch Geometrie beschränkt, sondern durch die Spur der Kernreaktion im Detektor. Sie liegt heute bei ca. $50 \times 50 \mu m^2$. Die Entwicklung von noch dünneren Detektoren an der Neutronenquelle des Paul-Scherer-Instituts in der Schweiz verspricht Verbesserungen bis zu $10 \times 10 \mu m^2$. Das große L/D -Verhältnis schafft transversale Kohärenz des Neutronenlichts und ermöglicht die verstärkte Abbildung von Dichtekonturen durch Phasenkontrast. ANTARES nutzt kalte Neutronen, um Kontraste in der Nähe von Bragg-Kanten zu verstärken. Hierzu wird der Neutronenstrahl monochromatisiert. Die geschickte Wahl von Filtern und eine einfahrbare Röntgenquelle gestatten in der gleichen Anlage alternative Aufnahmen mit Gammastrahlung oder harten Röntgenstrahlen. Mit schnellen CCD-

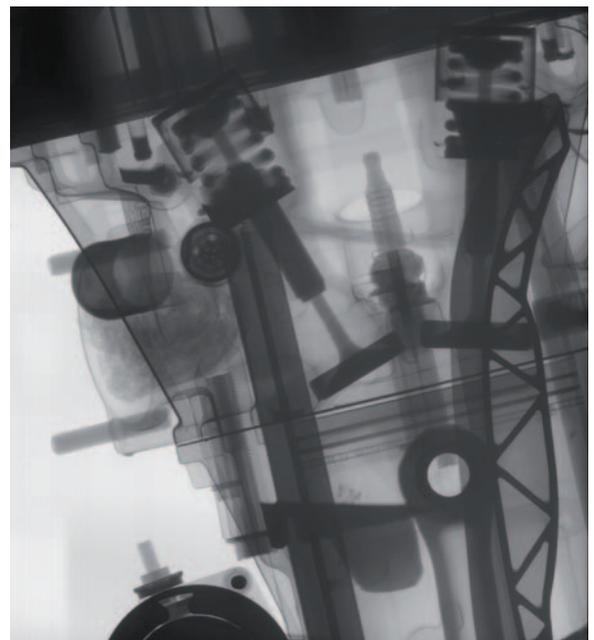


Abb. 7 Neutronen bringen völlig zerstörungsfrei Licht in das Innere komplexer Werkstücke. Haarscharf werden z. B. die verborgenen Details eines Einzylindermotors sichtbar.

Kameras sind Aufnahmen in Zeitschritten von 10 bis 100 μs möglich, um so kinetische Prozesse auf kurzer Zeitskala zu verfolgen. Ein aussagekräftiges Beispiel ist die Durchleuchtung von laufenden Automotoren, die erstmals ohne jede äußere Manipulation die Ölschmierung in-situ sichtbar macht (Abb. 7).

Die homogene n-Dotierung von massivem Silizium ist dank der Kernreaktion $^{30}\text{Si} + n_{\text{therm.}} = ^{31}\text{P} + \beta^-$ mit einem relativ kleinen Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{abs}} = 0,1$ barn möglich. Das Transmutationsprodukt ^{31}P ist nach dem kurzlebigen β^- -Zerfall stabil. Gleichzeitig soll aber die Entstehung von Punktdefekten durch Bestrahlen mit schnellen, hochenergetischen Neutronen soweit wie nur möglich unterdrückt werden, da diese Fehlstellen die elektronischen Eigenschaften stören. Am FRM II werden Si-Einkristalle bis zu Durchmessern von 20 cm und Höhen von 50 cm mit einem Verhältnis von $\Phi_{\text{thermisch}}/\Phi_{\text{schnell}} \geq 10^3$ bestrahlt, die damit auf industriellem Maßstab einmalige Qualitäten in der Homogenität der Dotierung erreichen.

Bereits seit 1985 wird die Bestrahlung von Tumoren mit schnellen Neutronen aus der Kernspaltung am alten Atom-Ei praktiziert. Tumorthherapie mit schweren Partikelstrahlen hat gegenüber der konventionellen Bestrahlungstherapie den entscheidenden Vorteil, dass sich die Energie viel gezielter im kranken Gewebe deponieren lässt.⁴⁾ Bis zur Stilllegung des FRM I wurden 715 Patienten behandelt. Nicht immer ist Heilung, also eine vollständige Rückbildung des Tumors möglich, zumeist wird aber eine palliative, d. h. lebensverlängernde Wirkung erreicht. Am FRM II wurde für die Tumorthherapie ein Strahlplatz mit unmoderierten, schnellen Neutronen errichtet (MEDAPP), der Bestrahlungen unter klinischen Bedingungen ermöglicht. Diese Anlage ist inzwischen nach dem Medizinproduktegesetz abgenommen, und dieser Tage werden die ersten Patienten behandelt.

Ein Forschungsgerät für Europa

Derzeit sind fünf Bestrahlungskanäle und 18 Strahlrohrinstrumente am FRM II in Betrieb, weitere sind in der Inbetriebnahmephase, in Konstruktion oder Planung. In seiner heutigen Ausbauphase bietet der FRM II Platz für gut 30 Strahlrohrinstrumente. Die TU München als Betreiber des FRM II hat sich auf den Bau der kernnahen Einrichtungen wie alle Sekundärquellen und die Bestrahlungsanlagen sowie das Bereitstellen der Neutronenleiter konzentriert. Die Instrumente an den Strahlrohren wurden bzw. werden von den zukünftigen Nutzern, nämlich Universitätsgruppen und Forschungslabors aus ganz Deutschland, errichtet. Finanziert werden diese Instrumente durch Mittel des Freistaates Bayern bzw. der TU München, dem BMBF, der Max-Planck-Gesellschaft und durch Eigenmittel der beteiligten Gruppen. Mit der Abschaltung des Forschungsreaktors DIDO beteiligt sich auch das Forschungszentrum Jülich an der Nutzung des FRM II. Seine Außenstation „Jülich Center for Neutron Sci-

ence“ betreibt dort zukünftig acht Instrumente. Neben den bereits genannten Instituten engagieren sich am Instrumentenbetrieb zahlreiche Institute der TU München, die Universitäten in Aachen, Augsburg, Darmstadt, Dresden, Göttingen, Köln, München (LMU und Bundeswehr Uni), das Hahn-Meitner-Institut Berlin und die GKSS Geesthacht.

Im Vergleich zu anderen Neutronenquellen ähnelt das Kernkonzept des FRM II sehr dem der Hochflussneutronenquelle des ILL. Mit 58 MW thermischer Leistung ist dort der ungestörte thermische Fluss mit $1,5 \times 10^{15}$ n/cm² annähernd doppelt so hoch wie am FRM II. Aufgrund der optimierten kalten Quelle des FRM II und vor allem dank seines sehr innovativen Neutronenleiterkonzepts ist der Fluss an den Strahlrohren und Neutronenleitern jedoch vergleichbar.

Alternativ zu kontinuierlichen Reaktoren liefern natürlich auch Beschleuniger-getriebene Spallationsquellen intensive, wenn auch gepulste Neutronenstrahlen.⁵⁾ Zukünftige Spallationsquellen haben prinzipiell das Potenzial, verglichen mit dem FRM II, bis zu einem Faktor 100 mehr Neutronen pro Puls zu liefern. Der zeitlich gemittelte Fluss heute denkbarer Spallationsquellen bleibt jedoch niedriger als beim FRM II oder beim Reaktor des ILL. Sofern kontinuierlicher Neutronenfluss benötigt wird, sind Forschungsreaktoren daher die bessere Wahl.

Mit dem FRM II steht Deutschland eine sehr intensive Neutronenquelle für Grundlagenforschung, industrielle und medizinische Nutzung zur Verfügung. Schon heute wird etwa doppelt so viel Messzeit beantragt als zur Verfügung steht, wobei 38 % der Anträge aus dem Ausland kommen. Die Qualität des FRM II ist sicherlich ein Pfand Deutschlands im internationalen wissenschaftlichen Wettbewerb.

4) siehe auch G. Kraft, Physik Journal, Februar 2007, S. 29

5) vgl. Physik Journal, Januar 2007, S. 23

Literatur

- [1] Für mehr Informationen zu Reaktortechnik und Instrumenten des FRM II siehe www.frm2.tum.de
- [2] A. Meyer et al., eingereicht
- [3] F. Mezei (Hrsg.) Neutron Spin Echo, Springer, Heidelberg (1980)
- [4] T. Keller et al., in: F. Mezei, C. Pappas und T. Gutberlet (Hrsg.), Neutron-Spin-Echo-Spectroscopy, Springer, Heidelberg (2003), S. 74
- [5] T. Keller et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 225501 (2006)
- [6] S. Bayrakci et al., Science **312**, 1926 (2006)

DIE AUTOREN

Winfried Petry studierte Physik an der TU München (TUM) und an der FU Berlin, wo er mit einer am Hahn-Meitner-Institut durchgeführten Arbeit 1982 promovierte. Von 1983 bis 1992 forschte er am ILL in Grenoble. Nach der Habilitation 1992 an der LMU München wurde Petry Professor für Physik an der TUM. Petry war langjähriges Mitglied im DPG-Vorstandsrat und bis März 2007 Vorsitzender des Fachverbandes „Metall- und Materialphysik“.

Jürgen Neuhaus studierte Physik an der Uni Münster, wo er 1991 auch promovierte. Von 1991 bis 1993 arbeitete er an der Uni Konstanz. Während der Promotions- und Post-Doc-Zeit war er als Gastwissenschaftler am ILL. Daran anschließend ging er an die TU München und forscht seit 1998 am FRM II. Hier koordiniert er als stellvertretender Wissenschaftlicher Direktor die wissenschaftliche Nutzung der Neutronenquelle.

