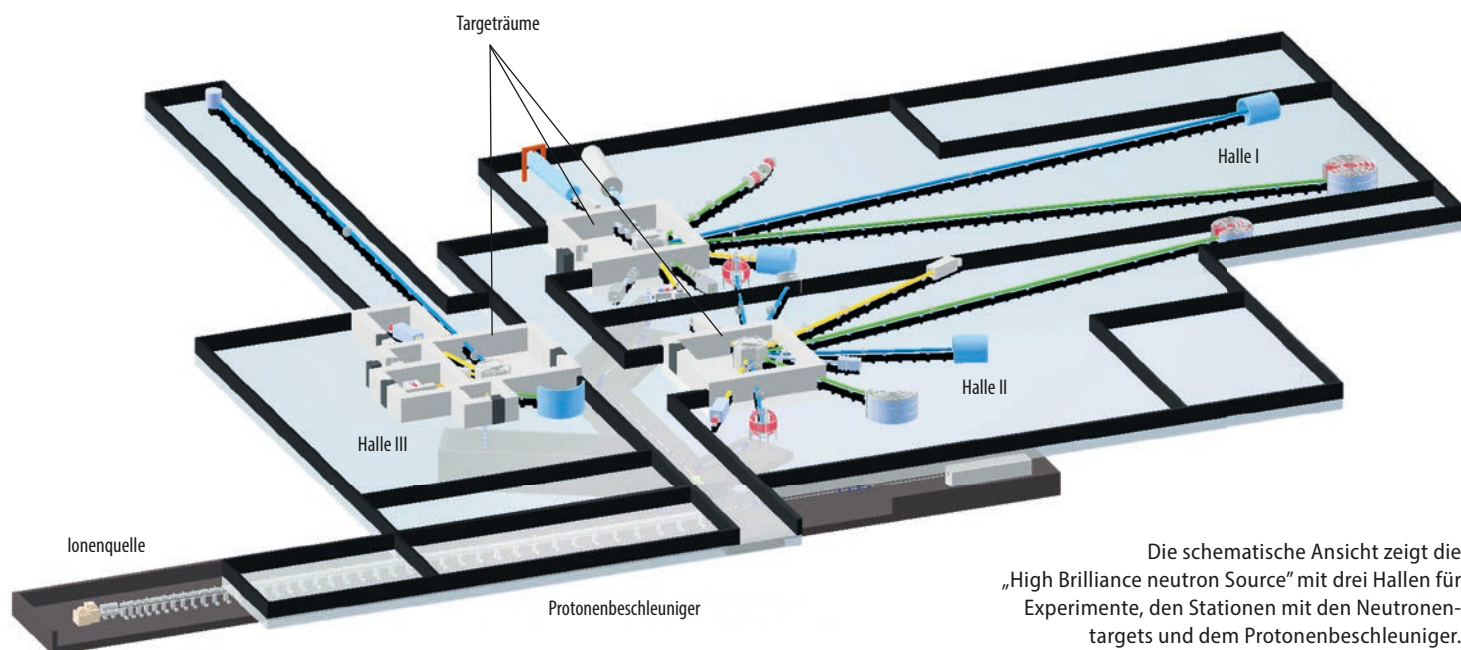


Brillante Neutronenstrahlen

Eine neue Generation von Neutronenquellen für Wissenschaft und Industrie

Thomas Brückel, Thomas Gutberlet und Paul Zakalek



Die schematische Ansicht zeigt die „High Brilliance neutron Source“ mit drei Hallen für Experimente, den Stationen mit den Neutronentargets und dem Protonenbeschleuniger.

Neutronen spielen als Sonden eine essenzielle Rolle in Materialforschung und Wirkstoffentwicklung. Die benötigten Strahlen freier Neutronen stammten bisher hauptsächlich aus Kernspaltungsprozessen in Forschungsreaktoren. Viele der Reaktoren erreichen demnächst das Ende ihrer Laufzeit. Daher wartet die Nutzergemeinschaft gespannt auf die Inbetriebnahme der Europäischen Spallationsquelle (ESS) im schwedischen Lund, welche die leistungsfähigste Neutronenquelle der Welt sein wird. Gleichzeitig geht die Entwicklung neuer hochbrillanter beschleunigergetriebener Quellen voran, um das europäische Netz zu ergänzen. Neue Ansätze ermöglichen es, brillante Neutronenstrahlen für Wissenschaft und Industrie bereitzustellen – an zuverlässigen, nachhaltigen, flexiblen Einrichtungen mit moderaten Betriebskosten und leichtem Nutzerzugang.

Neutronen finden in fast allen wissenschaftlichen Gebieten Anwendung: von der Strukturaufklärung magnetischer Materialien, der Erforschung von Quantenphänomenen und den Eigenschaften von Batteriematerialien über die Struktur und Dynamik von Polymeren und Proteinen, die Belastbarkeit und Struktur komplexer Werkstoffe, die Wechselwirkung von Biomolekülen bis hin zu den Eigenschaften geologischer Materi-

alien und der Untersuchung archäologischer Funde oder Kulturgegenstände. Entscheidend für die Attraktivität von Neutronen als Sonden in der Mikrowelt sind ihre besonderen Eigenschaften (**Infokasten**).

Um Neutronenstrahlen zu erzeugen, ist es nötig, Neutronen aus Atomkernen freizusetzen. Dazu gilt es, die von der starken Wechselwirkung vermittelte Bindung mit den Protonen im Kern zu überwinden. Um einen möglichst hohen Neutronenfluss, also möglichst viele Neutronen pro Sekunde und Flächenelement, zu erhalten, sind in der Regel relativ große Anlagen nötig. Die erforderlichen Abmessungen übersteigen wie die Investitionen und Betriebskosten die Möglichkeiten einer Universität. So benötigt die Materialforschung Neutronenflüsse, die nur Kernreaktoren oder Anlagen mit Ionenbeschleunigern bereitstellen. Zahlreiche Instrumente erlauben verschiedene wissenschaftliche Anwendungen. Ein Peer-Review-Begutachtungsverfahren organisiert üblicherweise die Vergabe von Messzeit an diesen Neutronenquellen, die angewandter und Grundlagenforschung sowie der Industrie offenstehen. Europa verfügt insgesamt über ein knappes Dutzend Neutronenquellen unterschiedlicher Art und Leistung, die jährlich etwa 10 000 Personen für ihre Experimente nutzen – die mit Abstand größte und produktivste Nutzergemeinschaft weltweit [1].

Die vorhandenen Neutronenquellen weisen aufgrund ihrer Größe unterschiedliche Schwerpunkte auf: Kleine Anlagen mit wenigen Messplätzen legen den Fokus meist auf spezielle Forschungsbereiche, während größere Einrichtungen ein breiteres Spektrum abdecken. Die derzeit größte europäische Neutronenquelle, das Institut Laue-Langevin (ILL) im französischen Grenoble, hat den weltweit höchsten Neutronenfluss und stellt etwa 40 Messplätze zur Verfügung. Frankreich, Deutschland und das Vereinigte Königreich betreiben das Institut in Partnerschaft mit elf weiteren Ländern. Mit der Europäischen Spallationsneutronenquelle ESS entsteht derzeit eine zweite europäische Forschungsneutronenquelle, die 13 europäische Partnerländer gemeinsam errichten. Sie soll in wenigen Jahren in Betrieb gehen und die anspruchsvollsten Experimente weltweit ermöglichen. In Deutschland stellt die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching bei München eine Neutronenquellstärke von 10^{18} Neutronen pro Sekunde zur Verfügung.

Viele der aus den 1960er- und 1970er-Jahren stammenden europäischen Forschungsreaktoren haben längst das Ende ihrer Laufzeit erreicht, insbesondere der Reaktor DIDO am Forschungszentrum Jülich (2006), der Forschungsreaktor Geesthacht-1 (FRG-1, 2010), der Berliner Experimentier-Reaktor (BER II, 2019) und der Reaktor Orphée am Centre CEA de Saclay bei Paris (2019). Weil dadurch deutlich weniger Experimentierzeit für die Nutzergemeinschaft zur Verfügung steht, haben sich die wichtigsten europäischen Neutronenforschungseinrichtungen in der „League of advanced European Neutron Sources (LENS)“ organisiert. In einem Positionspapier zeigt sie verschiedene Wege auf, um das notwendige Angebot an Neutronen für Forschung und Industrie in den kommenden Jahrzehnten zu gewährleisten. Neben Spallationsquellen führt dieses als einzige Alternative für völlig neue Anlagen mit signifikanter Kapazität sogenannte „High

Current Accelerator-driven Neutron Sources (HiCANS)“ auf, wie sie unter dem Dach der „European Low Energy accelerator-based Neutron facilities Association (ELENA)“ entwickelt werden. Dieser neue Anlagentyp, den es weltweit noch nirgends gibt, kann das europäische System von Neutronenquellen sinnvoll ergänzen und die Europäische Spallationsquelle unterstützen. LENS und ELENA verfolgen gemeinsam mit den europäischen Organisationen der verschiedenen Nutzergemeinschaften, die sich in der „European Neutron Scattering Association (ENSA)“ zusammengeschlossen haben, das Ziel, langfristig attraktive und nachhaltige Möglichkeiten zum Experimentieren mit Neutronen in Europa zu entwickeln.

Aus dem Kern befreien

Die unterschiedlichen Anlagen setzen über verschiedene Prozesse Neutronen aus Atomkernen frei, von Fusion über Kernphotoeffekt und niederenergetische Kernreaktionen bis hin zu Kernspaltung und Spallation [2]. Aktuell nutzen die Anlagen vor allem drei davon. Die Kernspaltung von ^{235}U läuft in Forschungsreaktoren wie FRM II als Kettenreaktion ab (**Abb. 1a**): Bei der Kernspaltung freigesetzte Neutronen lösen weitere Spaltprozesse aus. Im Mittel lässt sich ein Neutron pro Spaltprozess für den Neutronenstrahl nutzen; die Kernspaltung setzt pro Neutron eine Energie von 180 MeV in Form von Wärme frei. Die Spallation zertrümmert den Kern (**Abb. 1b**) und findet an großen Beschleunigeranlagen statt. Als Target dienen schwere Atomkerne wie Blei und Wolfram; hochenergetische Protonen mit Energien im GeV-Bereich regen die Kerne an, sodass sie Neutronen emittieren. Der Prozess setzt im Mittel etwa 20 Neutronen pro Proton und etwa 40 MeV pro Neutron als Wärme frei. Darüber hinaus entstehen bei Kernreaktionen freie Neutronen, die dann stattfinden, wenn niederenergetische Protonen mit Energien im MeV-Bereich auf Targetkerne treffen (**Abb. 1c**). Typischerweise entsteht dabei weniger als ein Neutron pro Proton; und es werden etwa 1000 MeV als Wärme pro Neutron frei. Diesen Prozess nutzen derzeit vor allem kleine Einrichtungen, wie die Neutronenquelle RANS beim Forschungszentrum RIKEN in Japan. Hier kommen ein Beryllium-Metalltarget und Protonen mit einer Energie von 7 MeV aus einem Linearbeschleuniger zum Einsatz.

Vor allem die entstehende Wärme begrenzt, wie viele Neutronen eine Quelle zur Verfügung stellen kann. Daher erzielen Spallationsquellen die höchsten Quellstärken, unmittelbar gefolgt von der Kernspaltung in Reaktoren. Alle anderen Verfahren schneiden in Bezug auf Neutronenausbeute und Wärmefreisetzung um Größenordnungen schlechter ab, finden aber dennoch Anwendung. So kommt die Kernfusion bei Neutronengeneratoren im Labor oder in tragbaren Geräten zum Einsatz, zum Beispiel für die Messung von Ölbohrlöchern. „Compact Accelerator-driven Neutron Sources“ beruhen auf Kernreaktionen, die stattfinden, wenn Teilchen wie Elektronen, Protonen oder Deuteronen mit einer Energie von etwa 10 MeV auf ein Target treffen. Da die niedrigen Energien eine geringe Abschirmung erfordern, lassen sich die freigesetzten Neu-

Neutronen als Sonden

Als **neutrale Teilchen** dringen Neutronen in die meisten Materialien tief ein und ermöglichen es, komplette Geräte und große Werkstücke zu untersuchen, aber auch Proben in komplexer Umgebung bei tiefster Temperatur und hoher Feldstärke. Weil sie mit den Atomkernen wechselwirken, liefern sie **isotopenspezifische Informationen** und ermöglichen ein „Anfärben“ funktionaler Gruppen in biologischen Makromolekülen, wenn Wasserstoff durch Deuterium ersetzt wird. Sie streuen sehr stark an leichten Elementen, wie Wasserstoff, Lithium oder Natrium, und sind daher für die Lebenswissenschaften und Materialien für Batterien oder Brennstoffzellen von Bedeutung. Als sanfte Sonde erlauben Neutronenstrahlen die **zerstörungsfreie Untersuchung** lebenswissenschaftlicher Systeme und Prozesse. Ihr Kernspin lässt Neutronen an den inneren Magnetfeldern einer Probe streuen und erlaubt es, die **magnetische Struktur**, magnetische Anregungen und Fluktuationen in modernen Quantenmaterialien (topologisch, chiral, frustriert, ...) zu bestimmen. Die Wellenlängen thermischer Neutronen sind mit interatomaren Abständen vergleichbar und die Energien entsprechen typischen Anregungsenergien im Festkörper. Das ermöglicht es, die **atomare, molekulare und magnetische Dynamik** zu bestimmen.

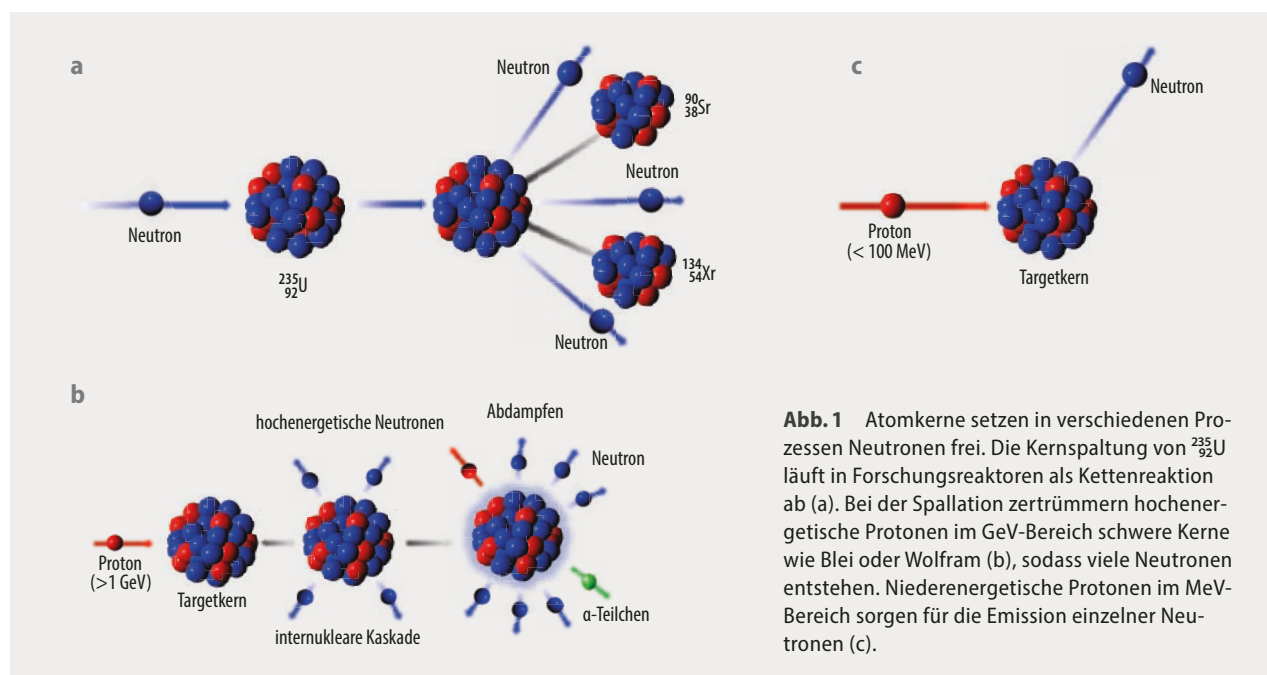


Abb. 1 Atomkerne setzen in verschiedenen Prozessen Neutronen frei. Die Kernspaltung von $^{235}_{92}\text{U}$ läuft in Forschungsreaktoren als Kettenreaktion ab (a). Bei der Spallation zertrümmern hochenergetische Protonen im GeV-Bereich schwere Kerne wie Blei oder Wolfram (b), sodass viele Neutronen entstehen. Niederenergetische Protonen im MeV-Bereich sorgen für die Emission einzelner Neutronen (c).

tronen effizient extrahieren, sodass weniger Neutronen auf dem Weg zum Experiment verloren gehen. Optimiert für spezifische Zwecke, finden diese Quellen zahlreiche Anwendungen: von der Messung der Wirkungsquerschnitte hochenergetischer Neutronen über die zerstörungsfreie Inspektion der Straßeninfrastruktur (z. B. Brücken, Tunnel und Hochstraßen) bis hin zur medizinischen Anwendung in Krankenhäusern bei der Behandlung von Krebs (Boron Neutron Capture Therapy).

Passgenau abbremesen

Im Folgenden beschränken wir uns auf die Streuung, Bildung und Materialanalyse mit Neutronen. Damit beim Streuprozess gut messbare Energie- und Impulsänderungen auftreten, sollte die kinetische Energie der Neutronen idealerweise ähnlich groß sein wie die auftretenden Anregungsenergien (z. B. von Phononen oder beim Tunneln) und ihre Wellenlänge den charakteristischen mikroskopischen Längenskalen (z. B. Atomabstände, Molekülabbmessungen) der untersuchten Proben entsprechen. Typische Anregungsenergien in Festkörpern liegen im Bereich von μeV bis zu einigen 10 meV ; die Abstände variieren von einigen Ångström bis zu Nanometern. Die Neutronen entstehen aber mit einer Energie von einigen MeV . Als neutrale Teilchen lassen sie sich nicht einfach mit elektromagnetischen Feldern abbremesen. Stattdessen helfen Stoßprozesse in Moderatoren, die kinetische Energie der Neutronen um fünf bis neun Größenordnungen zu reduzieren. Damit ein Neutron dabei so viel Energie auf den Stoßpartner übertragen kann, müssen die Moderatoren aus leichten Elementen bestehen. Ähnlich dem zentralen Stoß beim Billiardspiel kann die bewegte Kugel (das Neutron) ihre gesamte Bewegungsenergie auf eine gleichschwere ruhende Kugel (den Moderator) übertragen. Daher kommen als Moderatoren Wasserstoff, Deuterium oder Graphit, aber auch wasser-

stoffhaltige Materialien wie Wasser oder Polyethylen infrage.

Im thermischen Gleichgewicht von Neutronen und Atomkernen des Moderatormaterials folgt die Energieverteilung der Neutronen einem Maxwell-Spektrum, wobei die Temperatur des Moderators die mittlere Energie der Neutronen bestimmt. Daher ist von heißen, thermischen und kalten Neutronen die Rede (**Tab. 1**). Diese Bezeichnungen beziehen sich auf das Temperaturäquivalent der kinetischen Energie der Neutronen gemäß $E_{\text{kin}} = k_{\text{B}}T$, wobei ein meV etwa $11,6\text{ K}$ entspricht. Um entweichende Neutronen höherer Energie effektiv in den Moderator zurückzustreuen, umgibt diesen ein Reflektor aus Beryllium oder Blei.

Die Extraktion und Weiterleitung der Neutronen aus den Moderatoren erfolgt über evakuierte Strahlrohre, in denen die Neutronen ohne weitere Streuprozesse den Moderator, den Reflektor und die Abschirmung der Quelle in Richtung des Experiments verlassen. Mithilfe von Neutronenleitern bewegen sich die Neutronenstrahlen über lange Strecken weitgehend verlustfrei zu den Instrumenten; die Form der Leiter hilft auch bei der Fokussierung. Die evakuierten Hohlrohre aus poliertem Glas, deren Innenseite mit einem reflektierenden Vielschichtsystem versehen ist, leiten die Neutronen durch Total- oder Bragg-Reflexion weiter. Das relevante Maß für die Qualität des Neutronen-

Eigenschaften von Neutronenquellen

Moderator	Temperatur	Energiebereich	Wellenlängen
Graphit (heiß)	2500 K	100 – 1000 meV	0,03 – 0,09 nm
Wasser (thermisch)	300 K	5 – 100 meV	0,09 – 0,4 nm
Flüssiges D_2 (kalt)	25 K	0,05 – 5 meV	0,4 – 4 nm

Tab. 1 Die Temperatur des Moderators bestimmt das Maxwell-Spektrum der Neutronen, das für bestimmte Energien oder Wellenlängen besonders intensiv ist. Neutronenquellen werden entsprechend als heiß, thermisch bzw. kalt bezeichnet.

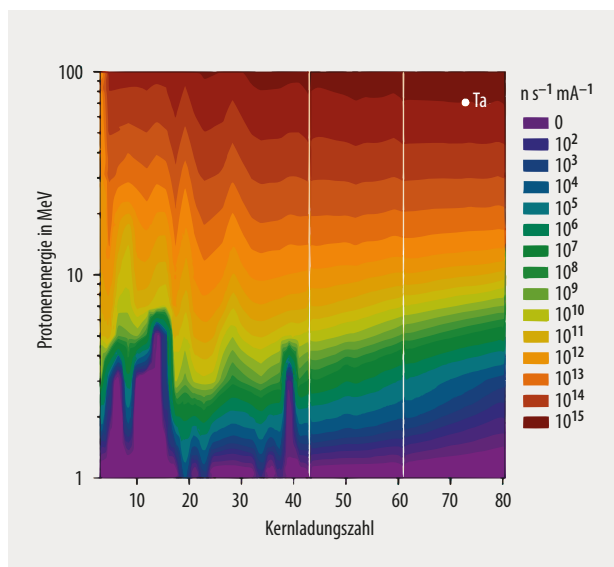


Abb. 2 Die protoneninduzierte Neutronenausbeute unterscheidet sich für verschiedene Targetmaterialien. Für Elemente ohne stabile Isotope (Tc mit $Z = 43$, Pm mit $Z = 61$) fehlen die Daten. Um eine Kernreaktion auszulösen, müssen die Protonen die Coulomb-Abstoßung des Kerns überwinden, sodass bei niedrigen Energien keine (p,n)-Reaktionen stattfinden.

strahls ist seine Brillanz B . Sie ergibt sich aus der Anzahl der Neutronen N , die pro Zeiteinheit Δt und Flächeneinheit ΔA in das Raumwinkelement $\Delta\Omega$ und das relative Wellenlängenintervall $\Delta\lambda/\lambda$ (oder Energieintervall) emittiert werden:

$$B = \frac{N}{\Delta t \cdot \Delta A \cdot \Delta\Omega \cdot 1\% \Delta\lambda/\lambda}; [B] = \frac{1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}} \quad (1)$$

Gemäß dem Satz von Liouville bleibt für eine konservative Optik ohne Absorption das Volumen im Phasenraum erhalten. Daher muss die Brillanz B' an der Probe immer gleich oder bei Verlusten durch den Strahltransport kleiner als die Brillanz der Quelle sein: $B' \leq B$.

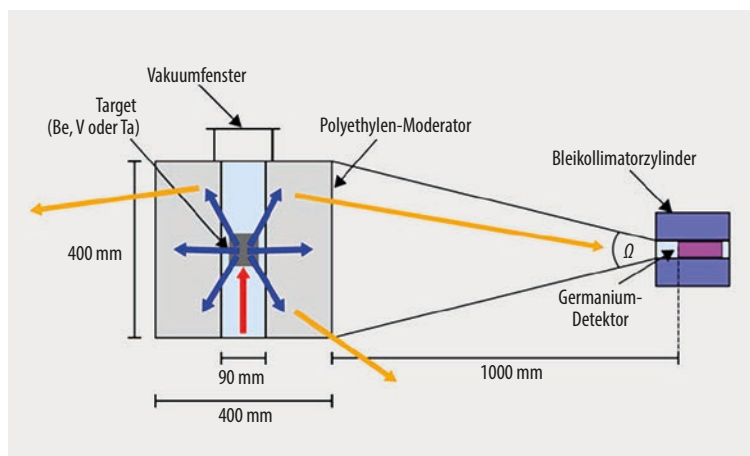


Abb. 3 Die Neutronenausbeute lässt sich mit der Spektroskopie prompter Gammastrahlung bestimmen. Die Protonen (rot) treffen von unten auf das Target und setzen Neutronen frei (blau), die der Wasserstoff im Polyethylen-Moderator absorbiert. Dabei entsteht Gammastrahlung (gelb), die ein Germanium-Detektor nachweist. Bei geeigneter Kalibration folgt aus der Zählrate der Wirkungsquerschnitt für die Freisetzung von Neutronen.

Beschleunigerbasierte Quellen neu denken

Um Silizium zu dotieren oder Radioisotope für medizinische Anwendungen zu erzeugen, ist ein hoher Neutronenfluss nötig. Das gilt für alle Bestrahlungsexperimente, die daher auf Spallationsquellen oder Forschungsreaktoren angewiesen sind. Aber ist das auch für die Spektroskopie und bei der Diffraktion erforderlich, die vor allem auf einem gut kollimierten und fokussierten monochromatischen Neutronenstrahl basieren?

Da Neutronen als Fermionen dem Pauli-Prinzip unterliegen, ist es nicht möglich, einen „Neutronenlaser“ zu konstruieren. Die Abstrahlung der Neutronen aus dem Moderator erfolgt in den gesamten Raumwinkel mit einer breiten Wellenlängenverteilung, die derjenigen einer Glühbirne im sichtbaren Licht ähnelt. Forschungsreaktoren wie in Grenoble oder Garching emittieren ungefähr 10^{18} Neutronen pro Sekunde. Davon erreicht nur ein kleiner Bruchteil die Streuexperimente: Weil diese eine wohldefinierte Einfallsrichtung des Strahls und eine gut bekannte Einfallsenergie bzw. -wellenlänge benötigen, muss der Neutronenstrahl im Allgemeinen kollimiert und monochromatisiert werden. Nach dieser Aufbereitung kommt typischerweise ein Neutronenfluss von etwa 10^8 Neutronen/(s cm^2) am Streuexperiment an. Wenn es gelingt, die relevante Brillanz zu vergrößern und die Quellstärke zu verkleinern, lassen sich die hohen Betriebs- und Investitionskosten von Spallationsquellen oder Forschungsreaktoren reduzieren. Hier kommen die Kernreaktionen mit niederenergetischen Protonen ins Spiel: Mit ihnen eine konkurrenzfähige Neutronenquelle zu entwickeln, erfordert jedoch ein grundsätzlich neues Denken.

Eine solche Quelle zeichnet sich durch ein kompaktes Design aus, das Neutronenproduktion und ihre Moderation zu den erforderlichen Energien effizient koppelt und gleichzeitig eine effiziente Extraktion aus der Quelle hin zu den Streuinstrumenten erlaubt. Dazu sind mehrere Optimierungsschritte nötig:

- Ein State-of-the-Art-Hochstrombeschleuniger muss einen hochintensiven Protonenstrahl bereitstellen.
- Ein geeignetes Targetmaterial und die passende Protonenenergie sind zu identifizieren.
- Für eine möglichst kleine Quelle muss das Target thermischer Hochleistung standhalten.
- Der thermische Moderator und der Reflektor müssen im Zusammenspiel möglichst viele Neutronen thermalisieren.
- Kalte Quellen brauchen eine effiziente Ankopplung und eine möglichst kleine leuchtende Fläche mit gerichteter Abstrahlung.
- Eine moderne Neutronenoptik muss die Neutronenstrahlen extrahieren und ohne Verluste zum Instrument transportieren.

Der „Conceptual Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS)“ [3] befasst sich detailliert mit all diesen Aspekten. Im Folgenden möchten wir auf zwei davon explizit eingehen.

Wahl des Targets, der Projektil-Ionen und ihrer Energie

Heutige „Compact Accelerator-driven Neutron Sources“ arbeiten mit einfach geladenen Protonen- oder Deuteronenstrahlen mit Energien zwischen 3 und 13 MeV, da es hierfür einfache und kostengünstige Beschleuniger gibt. Die Wirkungsquerschnitte der (p,n)-Reaktionen, bei denen der Targetkern das Proton absorbiert und ein Neutron emittiert, sind bei diesen Energien deutlich kleiner als diejenigen der (d,n)-Reaktionen, weil sich hier bei einer Kollision mit einem Targetkern das im Deuteron nur schwach gebundene Neutron leicht abstreifen lässt. Bei den niedrigen Energien kommen meist Targets aus Materialien mit niedrigen Kernladungszahlen zum Einsatz. Das verhindert, dass die Coulomb-Wechselwirkung die einfallenden Ionen durch Streuung so stark abbremst, dass ihre Energie nicht mehr ausreicht, um die Coulomb-Barriere des Targetkerns zu überwinden und die Kernreaktion auszulösen. Beryllium- oder Lithium-Targets maximieren die Neutronenausbeute bei diesen Quellen.

Bei hohen Strömen deponieren die geladenen Projektile in der Spitze eine Leistung von einigen Megawatt auf dem Target. Das Targetmaterial, die Projektil-Ionen und ihre Energie müssen daher zueinander passen. Mit tabellierten Wirkungsquerschnitten ergibt ein analytischer Ansatz für den kerntechnischen Prozess die Neutronenausbeute als Funktion des Targetmaterials und der Projektil-Energie [4] (Abb. 2). Generell steigt die Neutronenausbeute mit zunehmender Projektil-Energie; bei hohen Energien sorgen schwerere Elemente mit mehr Neutronen im Kern für eine höhere Ausbeute. Bei niedrigen Energien oder leichten Targetelementen bieten Deuteronen gegenüber Protonen leichte Vorteile. Das gleicht sich jedoch bei höheren Energien oder schweren Targetelementen aus, weshalb Protonen aufgrund ihrer einfacheren Beschleunigung zu bevorzugen sind. Insgesamt betrachtet stellt ein Target aus Tantal mit Protonen bei einer Energie von 70 MeV eine gute Wahl dar: Tantal zeichnet sich durch eine hohe Neutronenausbeute aus und lässt sich mechanisch gut bearbeiten; das Element besitzt gute thermomechanische Eigenschaften, sodass es einem hohen Protonenstrom widerstehen kann.

Gerade bei niedrigen Energien unterscheiden sich die Wirkungsquerschnitte aus verschiedenen Datenbanken deutlich, sodass es nötig war, die Neutronenausbeute bei Energien zwischen 22 und 42 MeV experimentell zu überprüfen – mithilfe eines Protonenstrahls vom Injektor-Zyklotron JULIC des Forschungszentrums Jülich [5]. Targets aus Beryllium, Vanadium und Tantal wurden mit Protonen bestrahlt und die Neutronenausbeute indirekt durch die Prompte-Gamma-Neutronen-Aktivierungsanalyse bestimmt. Dabei gilt es, die Gammastrahlung zu messen, die angeregte Wasserstoffkerne nach dem Einfang von Neutronen emittieren (Abb. 3). Die Spektroskopie der Gammastrahlung erlaubt es, die Zählrate für die prompte Emission bei 2,2 MeV zu bestimmen, die nach dem Einfang thermischer Neutronen im Polyethylen-Moderator stattfindet. Daraus ergibt sich die gemessene Neutronenausbeute, die sich mit den Ergebnissen von Monte-Carlo-Simulationen zum Teilchentransport vergleichen lässt (Abb. 4).

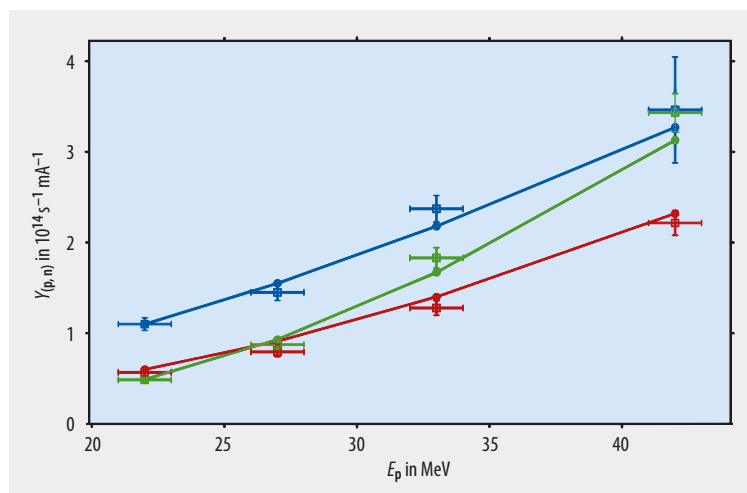


Abb. 4 Die experimentell ermittelte protoneninduzierte Neutronenausbeute $Y_{(p,n)}$ (Rechteck) und die mit einem Monte-Carlo N -Teilchen-Transportcode simulierte Ausbeute (Kreis, Linie) variieren als Funktion der Protonenenergie E_p für die Targets Be (blau), V (rot) und Ta (grün).

Die simulierten Daten stimmen innerhalb der Unsicherheiten gut mit den experimentellen überein – für alle untersuchten Targets und Protonenenergien. Die Neutronenausbeute von Beryllium ist etwa doppelt so groß wie diejenige von Vanadium. Das gilt unterhalb von 30 MeV auch für Tantal; jedoch nimmt sie für dieses Element mit steigender Energie deutlich schneller zu als für Beryllium, sodass Tantal oberhalb von 40 MeV ähnlich viele Neutronen liefert. Die experimentellen Daten untermauern daher die Wahl eines Tantaltargets für Protonen mit einer Energie von 70 MeV. Ein Target mit einer Mikrokanal-Wasserkühlung und einer aktiven Fläche von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ wurde entwickelt und ausführlich getestet. Dieses ingenieurtechnische Meisterstück kühlt auf einer etwa handtellergrößen Fläche die Wärmeleistung von etwa hundert Herdplatten und hält so einer mittleren Leistungsflächendichte von 1 kW/cm^2 stand. Die Volumenleistungsdichte ist dabei vergleichbar mit derjenigen des Targets der Europäischen Spallationsquelle ESS.

Fingermoderatoren als brillante kalte Quellen

Die meisten Instrumente an modernen Forschungsreaktoren nutzen kalte Neutronen: Ihre Energie eignet sich besonders gut, um etwa magnetische Strukturen zu bestimmen oder langsame Bewegungen (biologischer) Makromoleküle zu vermessen. Kalte Quellen befinden sich in der Regel in Kryobehältern mit 12 bis 20 Litern flüssigem Deuterium bei einer Temperatur von etwa 25 K. Die Auslegung der Quelle entspricht stets einem Kompromiss, um alle Instrumente bestmöglich zu bedienen. Wünschenswert wäre eine kalte Quelle, deren Dimensionen und Spektrum optimal zu jedem einzelnen Instrument passen.

Strahlen mit möglichst hoher Brillanz entstehen durch möglichst kleine leuchtende Flächen, sodass die Abstrahlung vorzugsweise in den Raumwinkel erfolgt, den die Instrumente abdecken. Sogenannte „Finger-Moderatoren“ mit flüssigem Wasserstoff (LH_2) erfüllen diese Anforderungen. Bei ihrer zylindrischen Form mit zehn Zentimetern Länge und einem Zentimeter Radius erfolgt die

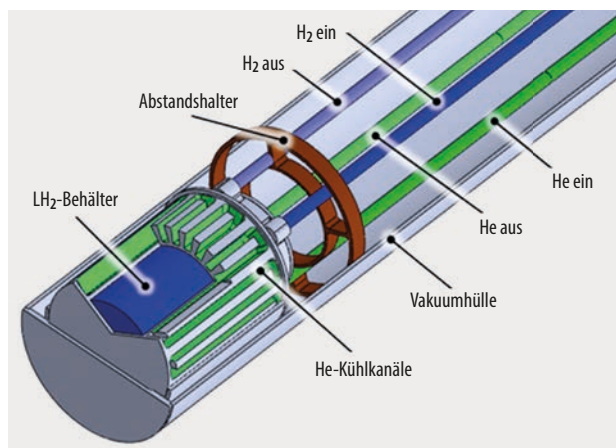


Abb. 5 Das CAD-Modell eines Fingermoderators zeigt, wie Kanäle (grün) das flüssige Helium zuführen, sodass es den im Isolationsvakuum befindlichen Kryobehälter kühlt. Der über Kapillare zugeführte Wasserstoff kondensiert im zylindrischen Kryobehälter aus (blau). Der Fingermoderator befindet sich innerhalb des thermischen Moderators, sodass thermische Neutronen aus allen Richtungen über die Umfangfläche eintreten; die Abstrahlung erfolgt nur über die Grundfläche nach hinten in Richtung des Instruments.

Abstrahlung der Neutronen über die Zylindergrundfläche (**Abb. 5**). Solche Moderatoren haben wir realisiert und getestet [6].

Obwohl ihr aktives Volumen um zwei bis drei Größenordnungen kleiner ausfällt, können sie mit konventionellen kalten Moderatoren konkurrieren. Dabei hilft der Kernspin des Wasserstoffs, durch den das Molekül H_2 in zwei Kernspinzuständen existiert: in einem Singulett-Zustand mit Gesamtkernspin 0 (para-Wasserstoff) und einem Triplett-Zustand mit Gesamtkernspin 1 (ortho-Wasserstoff). Der Neutronenstreuquerschnitt der beiden Zustände unterscheidet

sich nicht für Neutronenenergien oberhalb von 100 meV. Bei kleineren Energien wächst der Streuquerschnitt von ortho-Wasserstoff langsam an, während derjenige von para-Wasserstoff drastisch um rund zwei Größenordnungen einbricht. Thermische Neutronen haben daher mittlere freie Weglängen von etwa einem Zentimeter in einem kalten Moderator aus reinem para-Wasserstoff. Sie werden in den kalten Energiebereich gestreut, wo ihre mittlere freie Weglänge auf etwa zehn Zentimeter anwächst, sodass sie den zylindrischen Moderator problemlos durch die Frontfläche in Richtung Instrument verlassen können. Solche Moderatoren führen zu hochbrillanten Quellen kalter Neutronen, die an die Anforderungen der Instrumente anpassbar sind.

Mit einer modernen fokussierenden Neutronenoptik gelingt es, die Strahlen sehr effektiv in Neutronenleiter zu extrahieren, um die Neutronen mit geringen Verlusten zu den Instrumenten zu transportieren. Mit diesem Konzept wird die Quelle ein integraler Bestandteil des Instruments und zusammen mit diesem optimiert.

Mit systematischen Verbesserungen zum Ziel

In den vergangenen Jahren ist es gelungen, systematisch alle Komponenten für eine Neutronenforschungseinrichtung auf Basis niederenergetischer Kernprozesse zu optimieren. Dieses neue Konzept stellt eine ernstzunehmende Konkurrenz für die bislang dominierenden Forschungsreaktoren dar und besitzt einige Vorteile, wenn neue Erkenntnisse zu Neutronenquellen, aktuelle Entwicklungen in der Neutronenoptik und innovative Instrumentierung vollumfänglich zum Einsatz kommen. Eine detaillierte Ausführung aller Ideen findet sich im konzeptionellen (CDR) [3] und dem gerade fertiggestellten technischen Design Report (TDR) inklusive eines Schemas der beschriebenen Anlage (**Abb. 6**).

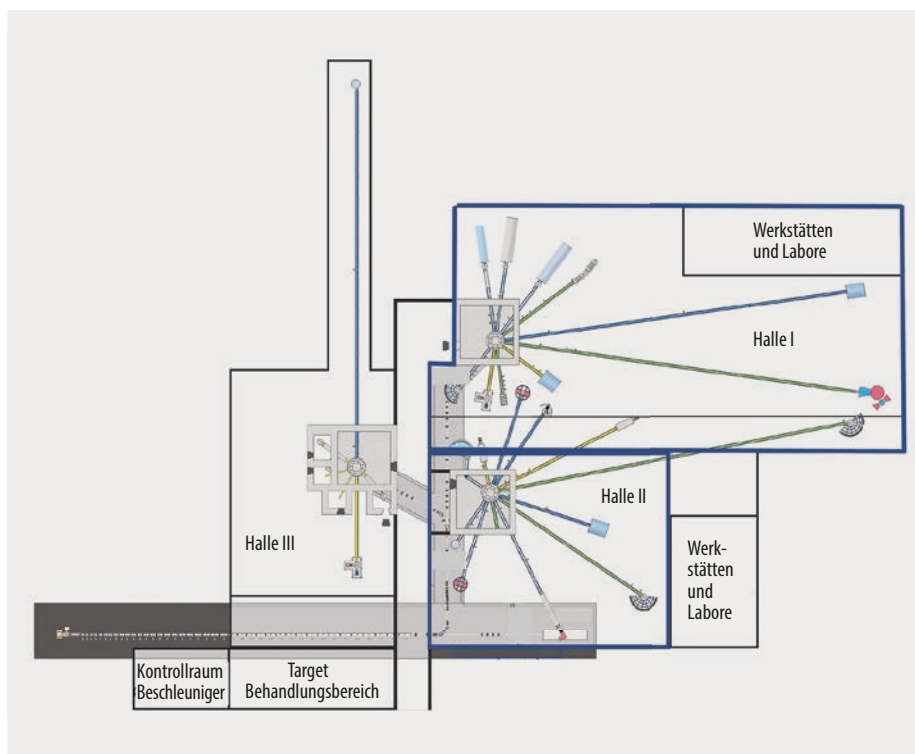


Abb. 6 Im Kellergeschoss (dunkelgrau) der „High Brilliance neutron Source“ versorgt ein 70 Meter langer Linearbeschleuniger einen Multiplexer, der gepulste Protonenstrahlen auf drei Target-Moderator-Reflektor-Stationen mit 24 Hz- bzw. 96 Hz-Pulsstruktur verteilt. Die Länge der Neutronenpulse optimiert den Neutronenfluss oder die Energieauflösung; verschiedene Moderatoren sorgen für unterschiedliche Energie- und Zeitverteilungen. Jede der Stationen bedient über bis zu zwölf Neutronenleiter die Experimentierstationen.

Analytische Betrachtungen und Monte-Carlo-Simulationen haben dazu beigetragen, die Anlage zu optimieren und die erwartete Leistungsfähigkeit der Instrumente zu berechnen. Die Instrumente bieten teilweise völlig neue Möglichkeiten und nutzen die Flugzeitmessung von Neutronen für energieaufgelöste Messungen. An einer Testanlage am Forschungszentrum Jülich lassen sich Prototypen aller kritischen Komponenten der Anlage wie Multiplexer, Target, Moderatoren und Abschirmung und ihr Zusammenspiel erproben.

Den technisch anspruchsvollen Beschleuniger entwickelt das Institut für Angewandte Physik der Goethe-Universität Frankfurt basierend auf den bereits getesteten Konzepten des MYRRHA-Beschleunigers im belgischen Mol. Da weltweit bisher keine der „High Brilliance neutron Source“ vergleichbare Anlage existiert, beschreibt der TDR ein Konzept, wie die komplette Anlage aus einem Demonstrator in drei Phasen realisierbar ist.

Zusammenfassung

Die Herausforderungen bei der Realisierung einer „High Brilliance neutron Source“ als ein Beispiel einer kompakten beschleunigergetriebenen Hochstrom-Neutronenquelle lassen sich meistern – das haben die Untersuchungen im Rahmen des HBS-Projekts am Forschungszentrum Jülich gezeigt. Perspektivisch können solche Neutronenquellen ältere, außer Betrieb genommene Forschungsreaktoren ersetzen. Daher unterstützen die Europäischen Verbünde ELENA und LENS die Entwicklung solcher Quellen, um die Landschaft der Neutronenforschungseinrichtungen in Europa zu verjüngen. Beschleunigergetriebene Hochstrom-Neutronenquellen (HiCANS) zeichnen sich durch einige grundlegende Vorteile aus:

- Sie sind skalierbar und lassen sich nach Größe, Leistung und Art der Anwendung an die Erfordernisse regionaler oder nationaler Nutzergemeinschaften anpassen.
- Sie nutzen die erzeugten Neutronen viel effizienter als existierende Quellen und ermöglichen eine exzellente Leis-

tungsfähigkeit der Instrumente bei minimierten Kosten für Bau und Betrieb.

- Beschleunigergetriebene Anlagen arbeiten erfahrungsgemäß höchst zuverlässig. Der modulare Aufbau erlaubt es, wichtige Komponenten wie Target oder Moderatoren bei Bedarf leicht und schnell zu ersetzen.
- Da die Anlagen der Strahlenschutzverordnung, aber nicht dem Atomrecht unterliegen, ist der Zugang einfacher geregelt und Genehmigungsverfahren sind weniger aufwändig als bei Forschungsreaktoren.
- HiCANS minimieren den radioaktiven Abfall, weil keine langlebigen Aktiniden wie in Reaktoren entstehen.
- Sie bieten weiteres Verbesserungspotenzial, etwa wenn neue Targets höhere Protonenstrahlströme und -energien ermöglichen.
- Sie erlauben es, wichtige (medizinische) Radioisotope durch Neutronen- und durch Protoneneinfang zu erzeugen, und können somit neue Isotope zugänglich machen.

Danksagung

Das HBS-Projekt ließ sich nur durch ein großes Spezialistenteam am Forschungszentrum Jülich, das unterschiedliche Kompetenzen abdeckt, und ein großes Netzwerk an nationalen und internationalen Partnern realisieren. Wir können nicht alle persönlich erwähnen, möchten aber am Forschungszentrum neben dem gesamten HBS-Team insbesondere dem Ingenieur-Department ZEA-1 und dem Institut für Kernphysik IKP danken. Wichtige nationale Partner finden sich am Helmholtz-Zentrum Hereon sowie an den Universitäten in Frankfurt und Dresden. Europäisch sind wir im Rahmen von ELENA vernetzt, international arbeiten wir eng mit der Neutronengruppe am RIKEN zusammen.

Literatur

- [1] T. Gutberlet et al., Neutron News **29**, 18 (2018)
- [2] T. Brückel et al., Neutron News **31**, 13 (2020)
- [3] T. Brückel und T. Gutberlet (Herausgeber), CDR HBS, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Allgemeines Band 8, https://ju-ser.fz-juelich.de/record/884799/files/Allgemeines_08.pdf (PDF)
- [4] P. Zakalek et al., EPJ Web of Conf. **231**, 03006 (2020)
- [5] M. Rimmner et al., Nucl. Instr. Meth. A **990**, 164989 (2021)
- [6] S. Eisenhut et al., EPJ Web of Conf. **231**, 04001 (2020)

Die Autoren



Thomas Brückel (FV Magnetismus) studierte Physik und Kristallographie an der U Tübingen, wo er 1988 auch promovierte. Er arbeitete an verschiedenen

Neutronen- und Synchrotronstrahlungszentren in Europa und den USA. Seit 1997 ist er Direktor am FZ Jülich, wo er das Jülich Centre for Neutron Science und das Peter Grünberg Institut für Quantenmaterialien und kollektive Phänomene leitet.



Thomas Gutberlet (FV Chemische Physik und Polymerphysik) studierte Chemie an der FU Berlin und promovierte dort 1995. Nach Postdoc-Aufenthalten

an der U Leipzig und dem Hahn-Meitner-Institut in Berlin arbeitete er an der Spallationsneutronenquelle SINQ in der Schweiz, am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum in Garching und am Helmholtz Zentrum Berlin. Seit 2015 leitet er das HBS-Projekt am FZ Jülich.



Paul Zakalek (FV Dünne Schichten) studierte Physik und Informatik an der RWTH Aachen, wo er 2015 in Physik promovierte. Seither arbeitet er im HBS-Projekt am

Jülich Centre for Neutron Science mit und ist verantwortlich für die Targetentwicklung und die Durchführung der Experimente. 2022 besuchte er für einen längeren Gastaufenthalt das RIKEN Institut in Tokio.

Prof. Dr. Thomas Brückel, Dr. Thomas Gutberlet und Dr. Paul Zakalek, Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich