

Status und Zukunft der Neutronenstreuung in Deutschland 2023 - 2045

Arbeitsgruppe:

KFN: Frank Scheiber (Universität Tübingen)

Forschungszentrum Jülich: Stephan Förster (JCNS)

Helmholtz-Zentrum Hereon: Martin Müller (GEMS)

TU München: Peter Müller-Buschbaum (TU München, FRM II)

18.11.2023

Inhalt

1. Situation	2
2. Empfehlungen	3
3. Strategische Ziele	4
3.1 Strategische Ziele einschließlich wirtschaftlicher und gesamt- gesellschaftlicher Auswirkungen	4
3.2 Kapazität und Qualität von Neutronenquellen und -Instrumentierung auf nationaler Ebene	5
3.3 Neutronenquellen im europäischen Gesamtbild	5
3.4 Wechselwirkung von Neutronen mit komplementären Technologien	6
3.5 Kurz-, mittel- und langfristige zeitliche Effekte	6
3.6 Priorisierungskriterien in Bezug auf die technische, zeitliche und finanzielle Umsetzbarkeit	7
4. Ergänzende Informationen	8
4.1 Deutsche Nutzergemeinschaft	8
4.2 Neutronenquellen	9
FRM II	11
ILL	12
ESS	13
Weitere europäische Neutronenquellen	14
Kompakte beschleunigergetriebene Neutronenquellen	15
4.3 Kapazitätsbetrachtung	16
4.4 Zukünftige Entwicklungen	18
5. Literatur	21

1. Situation

Neutronen sind essenziell für die Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft. Experimente mit Neutronen führen zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen, ermöglichen die Entwicklung neuer Materialien und Medikamente und fördern die Innovation von Produkten und Prozessen [1]. Sie gewährleisten Wissenschafts- und Technologieführerschaft und spielen eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung der großen Herausforderung in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft [2-4] sowie dem Erreichen der globalen nachhaltigen Entwicklungsziele [5].

Forschung mit Neutronen ist transdisziplinär. Neutronenmethoden werden in einem breiten Bereich von Disziplinen der Physik, Chemie, Materialwissenschaften, Biologie, Medizin, Geo- und Umweltwissenschaften und Industrie eingesetzt [2,3,6]. Sie sind häufig die einzige Methode zur Beantwortung wissenschaftlicher oder technologischer Fragestellungen. Neutronenquellen sind unersetzbar in der Versorgung der Medizin mit Radioisotopen für Diagnose und Therapie. Vielfach sind sie unersetzlicher Teil komplexer experimenteller Untersuchungen, in denen auch komplementäre Methoden wie Röntgenmethoden, Elektronenmikroskopie und Computersimulationen eingesetzt werden.

Die deutsche Neutronenforschung gehört weltweit zur Spitzengruppe [7]. Dieser Erfolg wurde durch das enge Zusammenspiel europäischer Flaggschiff-Neutronenquellen und nationaler Neutronenquellen ermöglicht [8]. Das BMBF unterstützt diese Entwicklung maßgeblich durch den Zugang deutscher Nutzer:innen zur europäischen Flaggschiff-Quelle ILL in Grenoble, zur deutschen nationalen Neutronenquelle FRM II in Garching im Rahmen des Heinz Maier-Leibnitz Zentrums (MLZ) sowie durch die Einbindung von Universitäten und Forschungsinstituten im Rahmen des ErUM-Programms. Ferner leistet der Freistaat Bayern mit seinen finanziellen Beiträgen über das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (StMWK) für den FRM II einen maßgeblichen Beitrag für die Neutronenforschung in Deutschland.

Die deutsche Neutronenforschung befindet sich gegenwärtig in einer Zeit des Umbruchs. Vier für deutsche Nutzer:innen bedeutende nationale Neutronenquellen sind in den letzten Jahren außer Betrieb gegangen (Jülich 2006, Geesthacht 2010, Berlin 2019, Saclay 2019). Seit 2019 stehen für deutsche Nutzer:innen nur noch vom BMBF geförderte Messzeiten an ILL und MLZ, sowie die im Rahmen offener Proposalverfahren vergebenen Messzeiten an ISIS (UK) und SINQ (CH) zur Verfügung. Die insgesamt deutlich geringere Kapazität und die gleichzeitige längere Betriebsunterbrechung des FRM II drohen zur Verkleinerung der Nutzergemeinschaft und zum Knowhow-Verlust zu führen. Dies würde langfristig die Nutzung des Potentials von Neutronenmethoden reduzieren, langjährige Investitionen in die Zukunft der deutschen Neutronenforschung gefährden und wissenschaftliche Kompetenz, Spitzenstellung und Innovationskraft des Landes beeinträchtigen. Um dem entgegenzusteuern und die Zukunft der deutschen Neutronenforschung zu sichern, bedarf es einer engen Abstimmung der Stakeholder und der sorgfältigen Planung von Maßnahmen.

Dieses Papier betrachtet die gegenwärtige Situation der Neutronenforschung, den gegenwärtigen und zukünftigen Bedarf an Neutronen sowie die Situation der Neutronenquellen und gibt darauf aufbauend Empfehlungen für Maßnahmen.

2. Empfehlungen

- I. Zur ausreichenden Versorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen ist die nationale Neutronenquelle **FRM II** unverzichtbar. Der Betrieb des FRM II muss sichergestellt sein. Ein Ausbau auf die in der Strategie MLZ 2030 vorgesehene Kapazität von mindestens 33 Instrumenten, ein Upgrade-Programm (MORIS) für die bestehenden Instrumente und Neutronenleiter und eine Weiterführung des MLZ-Kooperationsvertrages sind zur Sicherstellung der zukünftigen Versorgung mit Neutronen bis zum Betriebsende des FRM II unbedingt notwendig. Das BMBF sollte die Umrüstung des FRM II auf niedrig angereichertes Uran („LEU“) mit einer Förderung unterstützen, um die Neutronenlieferung dieser Quelle langfristig und zukunftsfähig zu sichern.
- II. Der Zugang deutscher Nutzer:innen zur europäischen Flaggschiff-Neutronenquelle am **ILL** ist essenziell. Ein möglichst langer Betrieb des ILL über die Startphase der ESS hinaus, mindestens bis 2033, bei voller Kapazität und einem deutschen Messzeit-Anteil von 25 % ist unabdingbar. Der Reaktorbetrieb ist technisch bis 2045 machbar und soll angesichts des sich verzögernden Vollaubaus der ESS zur Sicherstellung von Spitzenforschung und Versorgung mit Neutronen ermöglicht werden.
- III. Ein Beginn des Nutzerbetriebs der **ESS** im Jahr 2027/28 ist angesichts des Endes des Betriebs am ILL und zur Versorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen wesentlich. Ein zügiger Ausbau von zunächst 15 Instrumenten bei 2 MW im Jahr 2028 zur endgültigen Kapazität von 35 Instrumenten bei der vollen geplanten Leistung von 5 MW muss erreicht werden, damit eine mit dem ILL vergleichbare internationale Spitzenstellung gesichert wird. Diese Spitzenstellung wird durch von keiner weltweit anderen Quelle erreichte Leistungsdaten gesichert werden und wird Vorstöße in neue Forschungsbereiche ermöglichen.
- IV. Mit Entwicklung und Bau eines beschleunigerbasierten **HBS-Demonstrators** soll schnellstmöglich begonnen werden, damit diese leistungsfähige effiziente Zukunftstechnologie für neue Neutronenquellen etabliert, Nutzern zur Verfügung gestellt und bei Bedarf ausgebaut werden kann.
- V. Die erfolgreichen, vom BMBF geförderten Programme **ErUM-Pro** und **ErUM-Data** sollen weitergeführt bzw. ausgebaut werden, um weiterhin die Kompetenz von Universitäten und Forschungsinstituten an den Neutronenquellen einzubinden.
- VI. Deutsche Nutzer:innen sollen bei **Messreisen** zu ausländischen Neutronenquellen finanziell unterstützt werden.
- VII. Eine gemeinsame **Koordinierungsgruppe** von BMBF, KFN, TUM und HGF, die einen unmittelbaren und regelmäßigen Informationsaustausch zwischen Zuwendungsgebern, Nutzer:innen und Betreibern von Neutronenquellen und Instrumenten erlaubt, wäre in der gegenwärtigen Situation der deutschen Neutronenforschung vordringlich zu etablieren.

In der gegenwärtigen Phase der Unterversorgung mit Neutronen muss das Knowhow der Nutzer:innen bewahrt und die Instrumentierung gestärkt werden. Damit wird sichergestellt, dass bei einer sich wieder normalisierenden Versorgung mit Neutronen Experimente zügig und effizient durchgeführt, Ergebnisse schneller gewonnen und Projektziele erreicht werden können. Die Maßnahmen sollen exzellente Forschung, Innovationsführerschaft und den Erhalt der internationalen Spitzenstellung der deutschen Neutronenforschung ermöglichen. Sie sichern die Investitionen in die Neutronenforschung mit ihrer essenziellen Wirkung in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft.

3. Strategische Ziele

3.1 Strategische Ziele einschließlich wirtschaftlicher und gesamtgesellschaftlicher Auswirkungen

Ziel ist die breite Nutzung von Neutronen für Forschung und Innovation, vor allem in den Schlüsselbereichen technologischer Wandel, Klimawandel, Energie, Digitalisierung und Gesundheit. Strategische Ziele sind der Erhalt der Technologieführerschaft und die Stärkung des Transfers von Forschung in Anwendung. National besitzen Neutronen heute und in Zukunft große wirtschaftliche und gesamtgesellschaftliche Bedeutung.

Neutronen machen Materialien und Prozesse nachhaltiger und die Industrie wettbewerbsfähiger. In Metallindustrie, Maschinenbau und Keramikindustrie ermöglichen sie die Untersuchung ganzer Bauteile aus Hochtemperatur-Metalllegierungen, Reaktorstählen, korrosionsbeständigen Stählen, Schneidwerkzeugen sowie Hochleistungskeramiken, um die Qualität und Lebensdauer der Bauteile zu erhöhen und Fertigungsprozesse effizienter zu machen. Sie treiben die Entwicklung innovativer Multikomponenten-Materialien und Multikomponenten-Bauteile voran, sowie die Entwicklung von Nanokompositen, Schmierölen, Elastomeren und Bremscheiben im Bereich der Mobilität, oder der Untersuchung von Öl- und Gaspipelines. Sie dienen der Entwicklung energieeffizienterer Prozesse wie bei der Charakterisierung des Phasenverhaltens für die Aluminium-Schmelzflusselektrolyse bei niedrigeren Temperaturen.

Neutronen treiben die Entwicklung von Materialien und Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien und Energiespeicherung voran. Neutronen dienen zur Bestimmung der Lithiumverteilung in Lithiumbatterien und erlauben die Entwicklung einer effizienteren Befüllung von Batteriezellen mit Elektrolyten. In der Wasserstofftechnologie werden sie zur Untersuchung von Defektstellen in Elektrolysezellen und zur *operando*-Charakterisierung der Wasserstoffverteilung in Brennstoffzellen eingesetzt. Supraleitung, d. h. die völlig widerstandsfreie Leitung von Strom, bekommt mit der Entwicklung der sogenannten Hochtemperatursupraleiter eine immer größere industrielle Bedeutung. Neutronen haben ganz entscheidend zum Verständnis der Supraleitung beigetragen und bleiben eine mächtige Charakterisierungsmethode im Wettrennen um Supraleitung bei Raumtemperatur. Die homogene Silizium-Dotierung an Forschungsreaktoren dient zur Herstellung von Halbleitern für die Hochspannungs-Übertragung bei der Netzanbindung von Offshore Windparks. Neutronen erlauben die Untersuchung der Materialermüdung in Stahlwänden von Fusionsreaktoren und Turbinen. In der Biotechnologie unterstützen Neutronen die Entwicklung neuer Enzyme für die Herstellung von Biofuels.

Neutronen sind von großem Nutzen in der Erforschung der Folgen der Klimaveränderung, wie z. B. die Untersuchung der Struktur trocknender Böden und der *operando*-Beobachtung des Wassertransports in Böden und Pflanzenwurzeln, sowie die Element- und Isotopenbestimmung in der Umweltanalytik.

Neutronen unterstützen die Gesundheitsforschung im Bereich der Entwicklung neuer Wirkstoffe, Wirkstoffträger und Wirkstoffformulierungen, wie z. B. von mRNA-Impfstoffformulierungen oder erhellen die molekularen Mechanismen von Antibiotika-Resistenz. Sie erlauben die Untersuchung und Kontrolle von chirurgischen Werkzeugen, Katheder- und Implantat-Beschichtungen. Im Bereich biologischer Materialien zeichnen sie sich zusätzlich durch einen sehr niedrigen Energieeintrag und durch die Möglichkeit der Isotopenmarkierung (Deuterierung) aus. Sie werden daher als wichtige und einzigartige Sonden in einem breiten Bereich medizinischer Anwendungen eingesetzt. Neutronen sind unersetzbar in der Herstellung essenzieller Radioisotope für die Krebsdiagnostik (Mo-99/Tc-99m) und -therapie (Lu-177).

Im Bereich der Ernährungssicherheit erlauben Neutronen die Überprüfung von Lebensmitteln auf Reinheit und Herkunft.

Neutronen leisten einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung neuer Informationstechnologien und Digitalisierung. Die hohe Speicherdichte magnetischer Festplatten basiert auf Erkenntnissen durch Neutronenstreuung. Heute helfen Neutronen bei der Entwicklung völlig neuartiger Speichermedien. Die Entwicklung und der Betrieb von Neutronenmethoden selbst liefern grundlegende Beiträge zur Entwicklung und Nutzung von Mikroelektronik und Mikrotechnologie, Robotik, Automatisierung, künstlicher Intelligenz, digitalen Zwillingen, Cloud-Computing und Höchstleistungsrechnern.

Neutronen unterstützen die Luft- und Raumfahrt durch die Entwicklung von Leichtbauwerkstoffen mit hoher mechanischer und thermischer Belastung, aber auch im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung der Antriebsbauteile von Ariane-Transportraketen.

Bei der zerstörungsfreien Prüfung werden Neutronen vor allem aufgrund der Durchdringung großvolumiger Bauteile, der Möglichkeit der Detektion von leichten neben schweren Elementen und der Bestimmung der Element- und Isotopenverteilung eingesetzt. Sie werden daher als wichtige und einzigartige Sonden in einem breiten Bereich industrieller Anwendungen benötigt.

Neutronen sind einzigartige Sonden. Sie besitzen heute und in Zukunft essenzielle wirtschaftliche und gesamtgesellschaftliche Bedeutung. Sie ermöglichen Innovationen vor allem in den Schlüsselbereichen technologischer Wandel, Klimawandel, Energie, Digitalisierung und Gesundheit.

3.2 Kapazität und Qualität von Neutronenquellen und -instrumentierung auf nationaler Ebene

Um die strategischen Ziele zu erreichen, muss die nationale Versorgung mit Neutronen („capacity“) zuverlässig sichergestellt, das Leistungsvermögen von Neutronenquellen und -instrumentierung (capability) stetig weiterentwickelt und eine breite Nutzergemeinschaft aus Wissenschaft und Industrie qualifiziert werden. Für die genannten Anwendungen ist eine moderne Instrumentierung in den Bereichen Streuung/Diffraktion, Reflektometrie, Spektroskopie, Radiographie und Analytik mit verschiedenen Neutronen-Energiebereichen (kalt, thermisch, heiß) und -Zeitprofilen (kontinuierlich, gepulst) erforderlich. Die Fragestellungen im Bereich der Astro- und Teilchenphysik erfordern zusätzlich sehr niedrige Neutronen-Energiebereiche. Spezifische Probenumgebungen, auch für große Bauteile, müssen zur Verfügung stehen. Ein flexibler, zuverlässiger, einfacher Zugang zu Experimenten ist für eine industrielle Nutzung essenziell. Für exzellente Wissenschaft und erfolgreiche industrielle Nutzung sind an nationalen Neutronenquellen Neutronenflüsse notwendig, die zumindest in der gleichen Größenordnung wie die der europäischen Flaggschiff-Neutronenquellen (ILL, ESS) liegen.

3.3 Neutronenquellen im europäischen Gesamtbild

In Europa sind zurzeit (2023) vier leistungsfähige Neutronenquellen mit internationalem Nutzerprogramm in Betrieb: **ILL** (F) als europäische **Flaggschiff-Neutronenquelle** und **FRM II** (D), **ISIS** (UK) und **SINQ** (CH) als **nationale Neutronenquellen**. Die Europäische Spallations-

quelle **ESS** wird zukünftig die Rolle des ILL als europäische Flaggschiff-Neutronenquelle übernehmen. Im Rahmen der League of Advanced European Neutron Sources (**LENS**) erfolgt eine enge Verzahnung der Aktivitäten von Flaggschiff- und nationalen Neutronenquellen. Nationale Neutronenquellen werden in großem Umfang und weiter zunehmend von internationalen Nutzergruppen genutzt. An den nationalen Neutronenquellen gibt es sowohl zu den Flaggschiff-Quellen vergleichbare Neutroneninstrumente zur Bereitstellung ausreichender Kapazität als auch Neutroneninstrumente mit Alleinstellungsmerkmalen für einzigartige Anwendungen. **Spallationsquellen** und **Reaktorquellen** zeichnen sich durch jeweils komplementäre spezifische Stärken infolge ihres hohen Peak-Neutronenflusses bzw. hohen mittleren Neutronenflusses aus. Das erfolgreiche enge Zusammenwirken von Flaggschiff- und nationalen Neutronenquellen ist eine essenzielle Stärke und Kennzeichen der europäischen Neutronencommunity.

3.4 Wechselwirkung von Neutronen mit komplementären Technologien

Neutronenmethoden zeichnen sich unter anderem durch ihren einzigartigen Energiebereich (μeV – eV), ihre besondere Element-, Isotop- und Spin-Sensitivität und ihre hohe Durchdringung von Materie aus. Komplementäre Methoden decken angrenzende Energiebereiche ab oder liefern aufgrund ihrer spezifischen Element- und Spinwechselwirkungen wichtige zusätzliche Informationen. Zu den wichtigsten komplementären Methoden zählen Röntgenmethoden, insbesondere an **Synchrotronstrahlungsquellen**, Methoden der **Elektronenmikroskopie**, und in speziellen Anwendungsbereichen Methoden der **Laser-Lichtstreuung** und **NMR-Spektroskopie**.

Die wesentlichste komplementäre Technologie sind Röntgenmethoden. Neutronen- und Röntgenmethoden überdecken die gleichen Längenskalen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Energiebereiche und ihrer elementspezifischen Kontraste. Deshalb ist der Einsatz beider Methoden in vielen Fällen notwendig und vorteilhaft. Für deutsche Nutzer:innen sind im Bereich der Großforschung die nationalen Synchrotronstrahlungsquellen PETRA III (DESY), BESSY II (HZB), und FLASH (DESY), sowie die europäischen Flaggschiff-Strahlungsquellen ESRF (F) und European XFEL wesentlich.

Wegen ihrer Bedeutung als komplementäre Methoden stehen am MLZ leistungsfähige Labor-Röntgenanlagen, Elektronenmikroskope und Laser-Lichtstreuanlagen Nutzer:innen der Neutroneninstrumente zur Verfügung. Die deutschen Neutronen- und Synchrotronstrahlungszentren führen gemeinsame Schulen zur Ausbildung junger Wissenschaftler:innen durch (z. B. MATRAC-Schule, Schulen des Röntgen- Ångström-Clusters).

3.5 Kurz-, mittel- und langfristigen zeitliche Effekte

Mit der derzeit kleinen Anzahl europäischer Neutronenquellen besteht ein Risiko, dass Betriebsunterbrechungen zur temporären Unterversorgung von Neutronen für Wissenschaft und Industrie führen. Je nach Dauer der Betriebsunterbrechungen treten verschiedene Effekte ein, die spezifische proaktive und reaktive Handlungen erfordern.

Unterbrechungen bis zu ½ Jahr: Unterbrechungen eines Betriebs- oder Reaktorzyklus oder Ausfälle einzelner anstehender Betriebs- und Reaktorzyklen können durch Neuverteilung der Experimentierzeiten kompensiert werden. Für dringende Experimente aus Wissenschaft und

Industrie können in nachfolgenden Betriebs- und Reaktorzyklen prioritär Messzeiten vergeben werden.

Unterbrechungen von ½ - 2 Jahren: Unterbrechungen mehrerer Betriebs- und Reaktorzyklen machen B.Sc.- und M.Sc.-Arbeiten undurchführbar. Die Bearbeitung von Doktorarbeiten und Postdoc-Projekten wird massiv erschwert bis unmöglich. Industrieprojekte können in der Regel nicht mehr durchgeführt werden. Das Ausweichen auf andere Neutronenquellen wird notwendig.

Unterbrechungen von 2 - 4 Jahren: Doktorarbeiten und Postdoc-Projekte können nicht mehr oder nicht mehr vollständig bearbeitet werden aufgrund der üblichen Projektlaufzeiten von 3 Jahren von Promotionen und 2 oder 3 Jahren bei Postdoc-Projekten. Die Förderchancen von Projekten, die Neutronenmethoden erfordern, werden geringer. Nutzer:innen weichen auf Projekte mit Anwendung komplementärer Methoden aus. In Arbeitsgruppen wird die Weitergabe von Knowhow von einer zur nächsten Generation von Doktoranden und Postdocs unterbrochen. Umso wichtiger ist die dauerhafte Beschäftigung von Expertenpersonal. Aufgrund mangelnder Perspektive kann es dazu kommen, dass die Nachfrage nach Schulungen zur Ausbildung neuer Neutronen-Nutzergruppen sinkt.

Unterbrechungen von mehr als 4 Jahren: Wissenschaftliche Nachwuchsgruppen können Projekte nicht mehr oder nicht mehr vollständig bearbeiten. Aufgrund mangelnder Perspektiven weichen neue Nachwuchsgruppen auf komplementäre Methoden aus, welche allerdings zu mangelnden Einblicken und teils unzureichendem Materialverständnis führen, da komplementär nicht identisch ist. Die Anzahl der Nutzergruppen im Bereich der Neutronen nimmt ab.

Die Maßnahmen bei kurzfristigen Ereignissen sind eine schnelle und umfassende Kommunikation, sowie bei kurz- und mittelfristigen Ereignissen zusätzlich die zeitliche und kapazitative Flexibilisierung des Zugangs zu verschiedenen Neutronenquellen. In allen Fällen ist eine enge Kooperation und Koordination zwischen Neutronennutzer:innen und Neutronenquellen notwendig. Um langfristigen Effekten vorzubeugen, sind kontinuierliche Upgrades, die Bereithaltung von Ersatzteilen für kritische Komponenten und die frühzeitige Entwicklung neuer Neutronenquellen essenziell.

3.6 Priorisierungskriterien in Bezug auf die technische, zeitliche und finanzielle Umsetzbarkeit

Die Priorisierungskriterien umfassen die Leistungsfähigkeit, die Brillanz (s. Abb. 1), die Kapazität (s. Tab. 1 auf S. 17), das Kompetenzprofil von Neutronenquellen und Instrumenten, die Betriebskosten, die Zuverlässigkeit des Nutzerbetriebs, die Sicherung der nationalen Grundversorgung, die Eignung zur Bereitstellung international führender Instrumentierung, und die rechtzeitige Etablierung innovativer Zukunftstechnologien.

4. Ergänzende Informationen

4.1 Deutsche Nutzergemeinschaft

Das KFN verzeichnet aktuell 1500 registrierte Nutzer:innen aus **unterschiedlichen Institutionen** [2]. Mehr als die Hälfte der Nutzer:innen arbeitet an Universitäten, etwa ein weiteres Drittel an Max-Planck-, Helmholtz- und Leibnitz-Instituten. Weitere Nutzer:innen kommen von Einrichtungen wie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, der Fraunhofer-Gesellschaft oder der Industrie.

Die deutsche Nutzergemeinschaft ist **multidisziplinär** [2]. Die meisten Wissenschaftler:innen kommen aus den Bereichen Physik, Chemie, Materialwissenschaften und Biologie, weitere aus den Bereichen Medizin, Geo- und Umweltwissenschaften, Archäologie- und Kulturwissenschaften und der Industrie.

Die deutsche Nutzergemeinschaft besitzt eine **breit gefächerte Neutronenexpertise** sowohl im Bau von innovativer Instrumentierung als auch im Bereich der Experimente mit Neutronen. Sie besteht

1. aus Expert:innen, die die Entwicklung von innovativen Neutroneninstrumenten und Neutronenexperimenten kontinuierlich vorantreiben,
2. aus Forscher:innen mit hoher Expertise, die Neutronen regelmäßig und als fast ausschließliche Experimentiertechnik verwenden und
3. aus einer größer werdenden Zahl von Wissenschaftler:innen aus einem breiten Bereich von Fachgebieten, die Neutronen bei entsprechenden wissenschaftlichen Fragestellungen oft ergänzend zu anderen Methoden für ihre Experimente nutzen.

In den Nutzergruppen werden die meisten Experimente im Rahmen von **Promotionsprojekten** durchgeführt. Die frühe Heranführung von Bachelor- und Masterstudierenden an die Neutroneninstrumente ist eine Stärke der deutschen universitätsnahen Forschung mit Neutronen. Masterrand:innen, Doktorand:innen und Postdoktorand:innen benötigen mindestens eine Messzeit pro Jahr, um ihr Forschungsvorhaben erfolgreich bearbeiten zu können. Typische Laufzeiten drittmittelgeförderter wissenschaftlicher Projekte (DFG, BMBF, EU), die Neutronen nutzen, betragen zwischen zwei und vier Jahren. Ihre erfolgreiche Beantragung und Bearbeitung setzt einen zuverlässig planbaren Zugang zu Neutronenmesszeiten über die gesamte Laufzeit des Projekts voraus.

Nutzer:innen passen in der Regel ihre Forschungsprojekte **variabel** an bestimmte Forschungsthemen und an die Verfügbarkeit von Forschungsmitteln und Forschungsmethoden an. Daraus ergibt sich die Chance zur Gewinnung neuer Nutzer:innen für Neutronenmethoden, aber auch das Risiko Nutzer:innen zu verlieren, wenn Neutronen als Methode über eine längere Zeit nicht verfügbar sind.

Die **gegenwärtige Situation** ist durch den längeren Stillstand des FRM II und geplante Wartungspausen des ILL geprägt. Eine Unterversorgung mit Neutronen hat je nach Dauer unterschiedliche Folgen. Sie führt zunächst zur einer Überbuchung von Messzeiten mit der Folge einer Ablehnung einer großen Zahl von Messzeitanträgen. Von der Ablehnung ist in der Regel die dritte Gruppe der transdisziplinären variablen Neutronennutzer:innen besonders betroffen. Projektziele, die von der Anwendung von Neutronen abhängen, können nicht erreicht werden. In der Folge werden Forschungsprojekte nach Möglichkeit neu ausgerichtet und es werden

weniger Messzeitanträge gestellt werden. Eine längere Unterversorgung über Förderzeiten von Forschungsprojekten führt zu einem Rückgang der Anzahl von Projekten mit Neutronenbezug, da solche Projekte nicht mehr erfolgreich beantragt und durchgeführt werden können. Dies geht einher mit einem Verlust der Forschungskompetenz mit Neutronen in den einzelnen Gruppen, sowie mit einer ausbleibenden Weiterbearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen, die unabdingbar von Neutronen abhängen. Der essentielle Knowhow-Transfer über Doktorand:innen und Postdoktorand:innen innerhalb der Nutzergruppen, die essentiell von der Planbarkeit der Versorgung mit Neutronen abhängen, sowie durch nachfolgende Karriereschritte in Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft wird unterbrochen.

Diese Situation verdeutlicht die **Risiken** der Forschung mit Neutronen, wenn für deutsche Nutzer:innen nur noch sehr wenige Neutronenquellen (FRM II, ILL) zur Verfügung stehen und diese technisch bedingt nur eingeschränkt nutzbar sind. Nicht nur zur Sicherung der Versorgung mit Neutronen, sondern auch für eine positive **Perspektive** und Attraktivität der Neutronenforschung in Deutschland ist es wichtig, dass das ILL bei voller Kapazität mindestens bis 2033 betrieben wird und die Europäische Spallationsquelle ESS in Lund ihren Betrieb ohne weitere Zeitverzögerung 2027/28 aufnimmt.

Aus den gleichen Gründen ist es erforderlich, mit der **Entwicklung neuer Technologien** für zukünftige Neutronenquellen unmittelbar zu beginnen. Kompakte beschleunigergetriebene Neutronenquellen sind eine neue Technologie, die von vielen Ländern als zukünftige Neutronenquellen betrachtet werden. Bis zu ihrem Einsatz als Nutzereinrichtungen werden in der Regel über zehn Jahre benötigt. Das Konzept einer High-Brilliance Source (HBS) wird gegenwärtig in Deutschland entwickelt.

Eine ausreichende Versorgung mit Neutronen verbunden mit einer zuverlässigen Planbarkeit von Messzeiten auf einer verbreiterten Basis von Neutronenquellen vermeidet einen Rückgang der Nutzerzahl, einen Verlust des Knowhows und bietet jungen Wissenschaftler:innen eine Perspektive für erfolgreiche Forschung auf international führendem Niveau.

4.2 Neutronenquellen

Zur Nutzung des großen Potentials und der Anwendungsbreite von Neutronenmethoden ist ein enges Zusammenspiel von internationalen Flaggschiff-Neutronenquellen und nationalen Neutronenquellen erforderlich.

Flaggschiff-Neutronenquellen erlauben einzigartige bahnbrechende Experimente an Neutronenstrahlen höchster Brillanz (s. Abb. 1). Experimente nutzen höchsten Neutronenfluss für eine maximale zeitliche, räumliche und spektrale Auflösung mit besonders leistungsfähigen Probenumgebungen. Es können vor allem komplexe Experimente, schnellere Experimente und Experimente mit kleineren Probenvolumina durchgeführt werden. Bau und Betrieb dieser Flaggschiff-Neutronenquellen übersteigen nationale Kapazitäten und können nur gemeinsam auf internationaler Ebene realisiert werden. Die derzeitige europäische Flaggschiff-Neutronenquelle ist das ILL in Grenoble, und zukünftig wird es die Europäische Spallationsquelle ESS in Lund sein.

Nationale Neutronenquellen stellen den Grundbedarf der Messzeit für nationale Nutzer:innen sicher. Sie besitzen im Vergleich zu Flaggschiff-Neutronenquellen eine geringere, gleichwohl hohe Brillanz (s. Abb. 1). Sie sichern die Konkurrenzfähigkeit der nationalen Nutzer:innen im Wettbewerb um Zugang zu den Flaggschiff-Neutronenquellen wie ILL und zukünftig ESS.

Sie erlauben spezialisierte und komplementäre Experimente, industrielle Routinemessungen und treiben die Entwicklung und Tests neuer Technologien, Methoden und experimentellen Aufbauten voran. An nationalen Neutronenquellen findet verstärkt Ausbildung, Schulung und Training junger Wissenschaftler:innen und Techniker:innen, d. h. der nächsten Generation von Neutronennutzer:innen, statt. Nationale Neutronenquellen stellen somit die Grundversorgung und den Wissenserhalt mit Neutronen sicher und sind eine unabdingbare Grundlage und Voraussetzung für eine effiziente und optimale Durchführung von Experimenten an Flaggschiff-Neutronenquellen.

Die europäischen Neutronenquellen umfassen **Reaktorquellen** und **Spallationsquellen**. Sie unterscheiden sich in ihrer Technologie, sowie in Brillanz und Eigenschaften der erzeugten Neutronenstrahlen. Reaktorquellen liefern Neutronenstrahlung dauerhaft gleicher Intensität. Spallationsquellen werden in der Regel gepulst betrieben. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die zeitlich gemittelte Brillanz (average brilliance) und maximale Brillanz (peak brilliance) verschiedener Neutronenquellen.

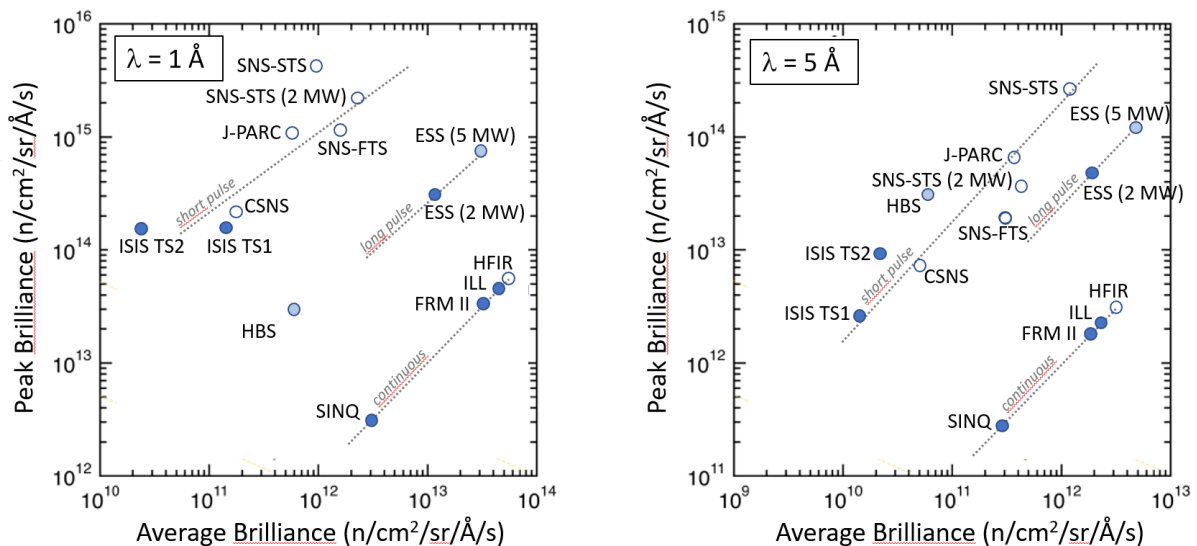


Abbildung 1: Zeitlich gemittelte Brillanz (average brilliance) und maximale Brillanz (peak brilliance) verschiedener Neutronenquellen: FRM II (D), ILL (F), HFIR (USA), SINQ (CH), ESS (S), ISIS (UK), J-PARC (J), CSNS (CHN), SNS (USA). TS1/TS2, FTS/STS=first/second target station. Nach [9,10].

Forschungsreaktoren zeichnen sich durch eine hohe mittlere (average) Brillanz aus. Sie sind besonders geeignet für hochauflösende Experimente mit monochromatischen Neutronen, für zeitaufgelöste Experimente sowie für Experimente und industrielle Anwendungen, die einen hohen integralen Neutronenfluss benötigen. Bei gepulsten Neutronenquellen können Pulsstruktur und Wellenlängenverteilung zusätzlich experimentell genutzt werden. Kurzpuls-Spallationsquellen besitzen die höchste Peak-Brillanz bei thermischen kurzwelligen Neutronen. Sie sind geeignet für Experimente mit hoher Auflösung, schmaler Bandbreite, und hohem Energieübertrag. Langpuls-Spallationsquellen besitzen zusätzlich auch bei längerwelligen Neutronen eine hohe Brillanz. Sie sind geeignet für Experimente bei großer Bandbreite, z. B. für multi-skalige Strukturen und Dynamiken, und können in ihrer Pulsstruktur variiert werden. Generell gilt, dass Investitions- und Betriebskosten für Spallationsquellen um einen Faktor 2 - 3 höher sind im Vergleich zu Reaktorquellen.

FRM II

Der Forschungsreaktor FRM II wird von der Technischen Universität München (TUM) auf dem Campus Garching betrieben. Der FRM II gehört mit einem Neutronenfluss von $8 \cdot 10^{14}$ n/cm²s und seiner hohen Brillanz (s. Abb. 1) zu den weltweit leistungsfähigsten Neutronenquellen. Der FRM II ist in seiner Brillanz und instrumentellen Kapazität der Hochflussquelle des ILLs annähernd gleichgestellt und besitzt in einigen Anwendungen Alleinstellung. Der wissenschaftliche Nutzerbetrieb mit 29 Neutroneninstrumenten (s. Tab. 1, [11]) wird durch das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) durchgeführt. Partner des MLZ sind TUM, Forschungszentrum Jülich (FZJ) und Helmholtz-Zentrum Hereon unter weiterer Beteiligung von Gruppen aus Universitäten und dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung (Stuttgart). Das MLZ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (StMWK) finanziell unterstützt. Durch diese Zusammenarbeit entsteht ein weltweit führendes Zentrum für Forschung mit Neutronen und Positronen.

Die Instrumente am MLZ umfassen das komplette Spektrum von Neutronenmethoden, wobei einige seiner Instrumente Alleinstellungsmerkmale haben. Das MLZ besitzt besondere Expertise im Bereich der Materialwissenschaften, der polarisierten Neutronen, bei Experimenten mit hoher Energieauflösung, im Bereich multiskaliger Strukturen („large scale structures“) sowie bei Experimenten mit Positronen. Bedeutende industrielle Anwendungen sind die Produktion von Radioisotopen für die Medizin und die Dotierung von Silizium für Leistungselektronik. Obwohl nationale Quelle spielt das MLZ wegen seiner Kapazität und Exzellenz seiner Instrumentierung auch eine tragende Rolle in der europaweiten Bereitstellung von Neutronen für Forschung. So kommen kontinuierlich ca. 50 % seiner Nutzer:innen aus dem vorwiegend europäischen Ausland.

Bedeutung für deutsche Nutzer:innen: Das MLZ sichert die Grundversorgung und stellt Flaggschiff-Instrumente für die deutschen Nutzer:innen zur Verfügung (s. Tab. 1). Es ist daher von essenzieller Bedeutung für die deutsche Neutronenforschung. Die Strategie MLZ 2030 [12] sieht einen schrittweisen Ausbau auf 33 Instrumente vor, zusammen mit einem Upgrade-Programm (MORIS) für die bestehenden Instrumente. Die vom BMBF im Rahmen des ErUM-Programms finanziell unterstützte Einbindung von Universitäten in Entwicklung und Betrieb von Instrumenten am MLZ hat entscheidend zur Stärkung der Spitzenposition der deutschen Neutronenforschung in der Welt beigetragen. Gemeinsam mit der großen finanziellen Leistung des Freistaats Bayern über das StMWK und der beiden am MLZ beteiligten Helmholtz-Zentren wird damit ein maßgeblicher Beitrag zur deutschen Neutronenstrategie geleistet.

Situation: Nach langjährigem erfolgreichen Betrieb ist der FRM II aktuell wegen technischer Probleme bei der Ersatzteilbeschaffung und entsprechender Zeitverzögerung außer Betrieb. Gegenwärtig wird der Zentralkanal des Reaktors erneuert. Die Wiederinbetriebnahme ist für das zweite Halbjahr 2024 vorgesehen. Im darauffolgenden Jahr erfolgt der Einbau der neuen Kalten Quelle. Der Kooperationsvertrag für den Nutzerbetrieb am MLZ läuft zum 31.12.2025 aus und soll um mindestens fünf weitere Jahre verlängert werden. Viele der Instrumente wurden in den Jahren 2004 - 2006 in Betrieb genommen und benötigen spätestens in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre entsprechende Upgrades, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden und weiterhin international konkurrenzfähig zu sein.

I. Zur ausreichenden Versorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen ist die nationale Neutronenquelle **FRM II** unverzichtbar. Der Betrieb des FRM II muss sichergestellt sein. Ein Ausbau auf die in der Strategie MLZ 2030 vorgesehene Kapazität von mindestens 33 Instrumenten, ein Upgrade-Programm (MORIS) für die bestehenden Instrumente und Neutronenleiter, und eine Weiterführung des MLZ-Kooperationsvertrages sind zur Sicherstellung der zukünftigen Versorgung mit Neutronen bis zum Betriebsende des FRM II unbedingt notwendig. Das BMBF sollte die Umrüstung des FRM II auf niedrig angereichertes Uran („LEU“) mit einer Förderung unterstützen, um die Neutronenlieferung dieser Quelle langfristig und zukunftsfähig zu sichern.

ILL

Der Forschungsreaktor HFR wird vom Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble betrieben. Es ist die europäische Flaggschiff-Neutronenquelle. Durch den weltweit höchsten Neutronenfluss von $1,5 \cdot 10^{15}$ n/cm²s und höchste Brillanz (s. Abb. 1) können am ILL bahnbrechende Experimente durchgeführt werden. Das ILL betreibt nach Abschluss des Endurance-Programms 43 Instrumente (s. Tab. 1, [13]). Davon sind 8 CRG-Instrumente, die zu 50 % für den allgemeinen Nutzerbetrieb zur Verfügung stehen [13]. Der wissenschaftliche Nutzerbetrieb wird vom ILL durchgeführt. Gesellschafter des ILL sind Großbritannien, Frankreich und Deutschland zu gleichen Teilen. Es gibt 11 weitere wissenschaftliche Mitgliedsländer. Deutsche Nutzer:innen erhalten anteilig, durch das BMBF finanziert, 25 % der Messzeit. Das ILL besitzt Kompetenzen auf weltweit führendem Niveau in allen Bereichen der Neutronenforschung. Die Instrumentierung wird bis 2024 durch ein Upgrade-Programm (Endurance) auf den bestmöglichen Stand für Spitzenforschung und Technologie-Entwicklung gebracht.

Bedeutung für deutsche Nutzer:innen: Durch den weltweit höchsten Neutronenfluss sind deutsche Nutzer:innen am ILL in der Lage, auf weltweit führendem Niveau Experimente durchführen. Damit ist das ILL von sehr großer Bedeutung für die deutschen Nutzer:innen. Passgenau zur Strategie des ILL soll es mit vorgesehenen 180 Betriebstagen, bei voller Instrumentkapazität so lange wie möglich mit einem deutschen Anteil von 25 % betrieben werden.

Situation: Im Jahr 2021 unterzeichneten die Partner Großbritannien, Frankreich und Deutschland das 6. Protokoll des Staatsvertrages, welches die Finanzierung des Betriebs des ILL für weitere 10 Jahre bis 2033 sicherstellt. Der Reaktorbetrieb ist technisch bis 2045 machbar und sollte angesichts des sich verzögernden Vollausbaus der ESS zur Sicherstellung von Spitzenforschung und Versorgung mit Neutronen in Europa ermöglicht werden. 2022 befand sich der Forschungsreaktor wegen der Durchführung des Endurance Upgrade-Programms außer Betrieb.

Das Endurance Upgrade-Programm wird 2024 abgeschlossen werden. Durch dieses Upgrade verfügt das ILL über eine weltweit führende Instrumentierung. Dazu zählen sowohl völlig neuartige Instrumente (SHARP+, SAM, XtremeD, PANTHER, RAINBOWS), als auch einzigartig leistungsfähige Instrumente im Bereich der Neutronendiffraktion und hochauflösenden Spektroskopie. Das Potential dieses umfangreichen Upgrades sollte vollumfänglich und so lange wie möglich ausgeschöpft werden.

Im aktuellen (2023) Positionspapier der französischen Nutzer-Community (Société Française de la Neutronique, SFN) [14] wird der Betrieb des ILL über 2033 hinaus gefordert, um einen ausreichenden Überlapp mit dem Ausbau der ESS bis zur geplanten Anzahl von Instrumenten (33) und der geplanten Leistungsfähigkeit (5 MW) zu gewährleisten. Aus dem gleichen Grund

fordert ebenfalls die UK Nutzer-Community (UK Neutron Scattering Group) den Weiterbetrieb des ILL über 2033 hinaus [15].

II. Der Zugang deutscher Nutzer:innen zur europäischen Flaggschiff-Neutronenquelle am **ILL** ist essenziell. Ein möglichst langer Betrieb des ILL über die Startphase der ESS hinaus, mindestens bis 2033, bei voller Kapazität und einem deutschen Messzeit-Anteil von 25 % ist unabdingbar. Der Reaktorbetrieb ist technisch bis 2045 machbar und sollt angesichts der nicht gesicherten Finanzierung des Vollausbaus der ESS zur Sicherstellung von Spitzenforschung und Versorgung mit Neutronen ermöglicht werden.

ESS

Die Europäische Spallationsquelle ESS wird zurzeit in Lund (Schweden) aufgebaut. Sie wird voraussichtlich 2027/28 mit 15 Instrumenten den Nutzerbetrieb aufnehmen und nach einer angemessenen Anlaufphase die weltweit stärkste Neutronenquelle sein (s. Abb. 1). Ein anschließender Ausbau mit zunächst 7 weiteren Instrumenten ist geplant. Die ESS ist zu einem späteren Zeitpunkt für einen Upgrade auf maximal 5 MW Leistung und einen Betrieb von 35 Instrumenten vorgesehen. Der Nutzerbetrieb wird von einem europäischen Konsortium (ERIC) durchgeführt. Deutschland ist eines der 13 Partnerländer, mit einem geplanten Anteil von 20 %. Deutschland ist am Bau von 7 der 15 Instrumente sowie am Bau der Moderator-Reflektor-Einheit beteiligt. Die ESS wird als europäische Flaggschiff-Neutronenquelle das ILL ablösen.

Bedeutung für deutsche Nutzer:innen: Als weltweit leistungsfähigste Spallationsquelle mit höchster Brillanz (s. Abb. 1) werden deutsche Nutzer:innen an der ESS Experimente auf weltweit führendem Niveau durchführen können. Die Länge der Neutronenpulse (2,86 ms) ermöglicht Experimente mit einer sehr großen Bandbreite von Neutronenenergien, mit denen die Untersuchung hierarchischer Strukturen über einen weiteren Bereich von Längen- und Zeitskalen durchführbar sind. Die Pulsstruktur zusammen mit der hohen Peak-Intensität ermöglichen sowohl Experimente mit höchster Energieauflösung als auch Experimente mit höchstem Neutronenfluss für z. B. neuartige kinetische Experimente mit hoher Zeitauflösung.

Damit ist die ESS von sehr großer Bedeutung für die deutschen Nutzer:innen. Um die Kapazität des ILL übernehmen zu können (s. Tab. 1) und um die weltweit führende Stellung langfristig zu sichern, ist es unbedingt notwendig, dass ein Ausbau auf 35 Instrumente erfolgt. Die ursprünglich geplante Leistung von 5 MW sollte angestrebt und erreicht werden (s. Abb.1).

Situation: Die Inbetriebnahme des Beschleunigers mit „Beam-on-Target“ ist für 2025 geplant. Die Inbetriebnahme erster Instrumente mit Testexperimenten für ‚First Science‘ ist 2026 möglich. Der Beginn des Nutzerbetriebs ist für die ersten Instrumente für Ende 2026, für die letzten Instrumente der ersten Ausbaustufe bis Anfang 2028 vorgesehen. Eine positive Entscheidung über die zusätzlich erforderliche Finanzierung zur Fertigstellung der ESS wurde 2023 getroffen. Die gemeinsame Finanzierung der ersten Ausbaustufe auf 15 Instrumente, der weitere Ausbau auf die ursprünglich geplante Beschleunigerleistung von 5 MW, sowie eine Erweiterung des Portfolios auf 35 Instrumente sind eine große Herausforderung für die Partnerländer. Sie ist jedoch folgerichtig und unbedingt erforderlich, um die Spitzenposition, Innovationskraft und Technologieführerschaft der europäischen Neutronenforschung zu sichern, und damit ihre

Wirkung in Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft. Diese Spitzenstellung der ESS muss durch Leistungsdaten gesichert werden, die von keiner weltweit anderen Quelle erreicht werden und Vorstöße in neue Forschungsbereiche ermöglichen.

III. Ein Beginn des Nutzerbetriebs der **ESS** im Jahr 2027/28 ist angesichts des Endes des Betriebs am ILL und zur Versorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen wesentlich. Ein zügiger Ausbau von zunächst 15 Instrumenten bei 2 MW im Jahr 2028 zur endgültigen Kapazität von 35 Instrumenten bei der vollen geplanten Leistung von 5 MW muss erreicht werden, damit eine mit dem ILL vergleichbare internationale Spitzenstellung gesichert wird. Diese Spitzenstellung wird durch von keiner weltweit anderen Quelle erreichte Leistungsdaten gesichert werden und wird Vorstöße in neue Forschungsbereiche ermöglichen.

Weitere europäische Neutronenquellen

Weitere europäische Neutronenquellen, die von deutschen Wissenschaftler:innen im Rahmen der regulären Proposalsysteme genutzt werden können, sind ISIS (Großbritannien) und SINQ (Schweiz), sowie BNC (Ungarn).

ISIS (Didcot, Großbritannien): ISIS Neutron and Muon Source ist eine gepulste Spallations-Neutronenquelle. Sie befindet sich am STFC Rutherford Appleton Laboratory (UK) und wird vom Science and Technology Facilities Council (STFC) betrieben. 31 Instrumente für die Neutronen- und Myonenforschung stehen zur Verfügung. Eine Erweiterung um bis zu 7 Instrumente ist geplant. ISIS besitzt besondere Expertise im Bereich der Neutronendiffraktion und Spektroskopie bei hohen Energieüberträgen. ISIS soll langfristig durch eine neue leistungsfähige MW Kurzpuls-Neutronenquelle ISIS-II ersetzt werden. Baubeginn ist für nach dem Jahr 2030 mit Inbetriebnahme um 2040 vorgesehen.

SINQ (Villigen, Schweiz): SINQ ist eine kontinuierliche Spallations-Neutronenquelle, die vom Paul Scherrer Institut (PSI) betrieben wird. An SINQ stehen 14 Instrumente für die Neutronenforschung zur Verfügung. SINQ besitzt besondere Expertise im Bereich hoher Magnetfelder, der Radiographie und Tomographie [16]. Eine zusätzliche Halle für den Betrieb von 7 zusätzlichen Instrumenten ist in Planung. Gegenwärtig wird SINQ durch die Betriebspausen von FRM II und ILL von deutschen Nutzer:innen stärker nachgefragt und weist eine sehr hohe Überbuchung auf.

BNC (Budapest, Ungarn): Das Budapest Neutron Center (BNC) betreibt für die Neutronenforschung 14 – 16 Instrumente. Der 10 MW-Reaktor wird vom Centre for Energy Research der Ungarischen Akademie der Wissenschaften betrieben. Der Reaktor besitzt einen Neutronenfluss von $1,2 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$ (z. Vgl. BER II: $2 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$). Ein Instrument (NEAT) wird vom Helmholtz-Zentrum Berlin zum BNC transferiert. Ein Modernisierungsprogramm mit einem Neustart des Reaktors ist 2024 geplant.

Kompakte beschleunigergetriebene Neutronenquellen

Kompakte beschleunigergetriebene Neutronenquellen nutzen Protoneneinfang („proton capture“) zur Erzeugung von Neutronen. Neueste Target-Moderator-Technologien ermöglichen die Entwicklung leistungsfähiger gepulster Neutronenquellen mit einer Peak-Brillanz von 10^{14} n/(cm²sÅsr). Damit sind Neutronenflüsse am Probenort erreichbar, die denen leistungsfähiger nationaler Reaktorquellen entsprechen. Technologie und Potential kompakter Neutronenquellen wurden im Conceptual Design Report (CDR) der High-Brilliance Source (HBS) 2020 erstmals beschrieben [10]. Der HBS Technical Design Report mit einem detaillierten Überblick über die Leistungsfähigkeit einzelner Instrumente wurde 2023 fertiggestellt [17].

Kompakte Neutronenquellen sind effizient und skalierbar in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Beschleunigers und die Anzahl der Target-Moderator-Module. Für den HBS-Demonstrator ist ein Target-Moderator-Modul mit einer ersten Gruppe von Instrumenten geplant. Aufbauend auf dem HBS-Demonstrator kann eine HBS mit mehreren Target-Moderator-Modulen mit unterschiedlichen Pulslängen für einen Betrieb von 25 Instrumenten realisiert werden.

Aufgrund der hohen Brillanz und des kleinen Strahldurchmessers besitzen diese Neutronenquellen Stärken im Bereich Strukturbilogie, Radiographie/Tomographie und Spektroskopie. Der Betrieb fällt nicht unter die Regelungen des Atomgesetzes, sodass ein flexibler Betrieb und ein einfacher Zugang für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen möglich sind. Die HBS erlaubt die Erzeugung sowohl protonenreicher als auch neutronenreicher medizinischer Isotope. Ein Teststand mit einer Target-Moderator-Einheit wird am Forschungszentrum Jülich gegenwärtig entwickelt. Erste Neutronenpulse konnten im Dezember 2022 erfolgreich erzeugt werden. Ein HBS-Demonstrator basierend auf einer Target-Moderator-Einheit könnte bis 2028 realisiert und das Leistungspotenzial der neuen Technologie damit demonstriert werden.

Kompakte Neutronenquellen werden in vielen Ländern (Frankreich, Spanien, Ungarn, Italien, Schweden, Finnland, Kanada, USA, Israel, China, Südkorea, Taiwan, Japan, Argentinien) als zukünftige nationale Neutronenquellen diskutiert [18]. So sieht das aktuelle Papier der französischen Nutzer-Community (SFN) den Bau einer nationalen Neutronenquelle auf der Basis einer kompakten Neutronenquelle (ICONE) vor [14].

IV. Mit Entwicklung und Bau eines beschleunigerbasierten **HBS-Demonstrators** soll schnellstmöglich begonnen werden, damit diese leistungsfähige effiziente Zukunftstechnologie für neue Neutronenquellen etabliert, Nutzer:innen zur Verfügung gestellt und bei Bedarf ausgebaut werden kann.

Situation in Europa

Die weltweite Führerschaft Europas im Bereich der Forschung mit Neutronen wird international anerkannt [19]. Die gegenwärtige Situation in Europa ist durch die Stilllegung zahlreicher Forschungsreaktoren geprägt. Außer den deutschen Forschungsreaktoren in Jülich, Geesthacht und Berlin wurden die Forschungsreaktoren in Saclay (2019) und Norwegen (2019) außer Betrieb genommen. Damit stehen in Europa nur noch fünf Neutronenquellen für europäische Nutzer:innen zur Verfügung: ILL (F), MLZ (D), ISIS (UK), SINQ (CH) und BNC (HUN). Gleichzeitig sind aufgrund knapper Finanzmittel und hoher Konkurrenz die Einwerbung europäischer und nationaler Fördermittel für Neutronenquellen zu einer Herausforderung geworden.

Deshalb haben sich führende europäische Neutronenquellen im Jahr 2018 zur League of Advanced Neutron Sources (LENS) zusammengeschlossen [20]. In LENS stimmen die europäischen Neutronenquellen ihre Betriebszyklen ab, koordinieren gemeinsame Projekte und Anträge, kooperieren mit anderen europäischen Netzwerken (ELENA [21], LEAPS [22], ARIE [23]) und stehen in engem Austausch mit europäischen und nationalen Zuwendungsgebern. Die Kooperation der Neutronenquellen soll weiter intensiviert werden, z. B. in Form eines European Laboratory for Neutron Scattering (ELNS), welches zurzeit diskutiert wird. Ziel ist der Erhalt und der Ausbau des Europa auszeichnenden erfolgreichen Netzwerks von Flaggschiff-Neutronenquellen und nationalen Neutronenquellen.

Situation in den USA

Die **USA** befanden sich 2018 in einer ähnlichen Situation wie Europa heute. Eine signifikante Reduktion der Verfügbarkeit von Neutronen in den 2010er Jahren und des damit verbundenen Knowhows drohte zu einer nachhaltigen Beeinträchtigung von Qualität und Quantität von Forschung und Entwicklung in Wissenschaft, Technologie, Medizin und Industrie, und damit der nationalen Innovationsfähigkeit zu führen. Das Zusammenspiel europäischer Neutronenquellen in einem Netzwerk aus Flaggschiff- und nationalen Quellen wurde als maßgeblich für die europäische Führungsposition und als beispielhaft betrachtet. Die Strategie „Neutrons for the Nation“ [19] sah folgerichtig einen umfänglichen Ausbau komplementärer Neutronenquellen und deren Instrumentierung vor. Die Maßnahmen umfassen ein Upgrade des SNS-Beschleunigers (ORNL) von 1,4 auf 2,0 MW (2024), den Bau einer zweiten SNS-Targetstation (2032), ein Instrument-Upgrade und eine Erneuerung des Reaktordruckbehälters des HFIR sowie eine Erneuerung der Kalten Quelle und ein Instrument-Upgrade bei NCNR (NIST). In einer US-Gesamtstrategie finden diese Maßnahmen abgestimmt mit Investitionen in die vierte Generation von Photonenquellen und in High-Performance Computing statt, um durch komplementäre Nutzung aller verfügbaren Methoden die Innovationskraft in Wissenschaft und Industrie weiter zu stärken.

4.3 Kapazitätsbetrachtung

Eine Kapazitätsabschätzung für die maßgeblichen deutschen Nutzer:innen zur Verfügung stehenden Neutronenquellen ist nachfolgend auf der Basis von Instrument-Messtagen durchgeführt. Messzeiten werden von den Neutronenquellen nach Begutachtung der Messzeitanträge in einer Anzahl von Messtagen pro Instrument vergeben. Die Dauer einzelner Messungen ist je nach Neutronenmethode und Leistungsfähigkeit der Neutronenquelle unterschiedlich und kann zwischen Minuten und mehreren Tagen liegen. Aufgrund dieser und weiterer Abhängigkeiten wie z. B. dem Aufbau komplexer Probenumgebungen wird im Rahmen dieser Betrachtung von einer weiteren Differenzierung abgesehen. Für die Kapazitätsberechnungen in Tabelle 1 wird die Anzahl der deutschen Nutzer:innen mit 1500 [2], und die Anzahl der jährlichen Betriebstage der Neutronenquellen mit 200 angenommen.

Tabelle 1: Kapazitätsbetrachtung der für deutsche Nutzer:innen maßgeblichen Neutronenquellen. Zur Berechnung wurden 200 Betriebstage und eine Nutzergruppe von 1500 Nutzer:innen [2] angenommen.

	MLZ	ILL	ESS
Anzahl Instrumente	29 [11]	43 [13]	15 [24]
D-Anteil	~50 % [25]	~25 %	20 %
D-Instrumentage (jährlich) [26]	2900	2150	600
D-Instrumentage/D-Nutzer:innen	1,9	1,4	0,4

Aus der Betrachtung folgt, dass das MLZ maßgeblich die Grundversorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen sicherstellt. Die Sicherung des Betriebs des FRM II und das in der MLZ 2030-Strategie vorgesehene Upgrade (MORIS) und der Ausbau auf 33 Instrumente sind deshalb unbedingt erforderlich. Es ist notwendig, dass das ILL möglichst lange bei voller Kapazität betrieben wird. Weiterhin ist ersichtlich, dass die ESS im Vergleich zum ILL einen deutlich geringeren Beitrag zur Messzeitversorgung, also Kapazität, liefern wird. Dies ist umso schwerwiegender, als es sich um die europäische Flaggschiff-Neutronenquelle handelt, mit der einzigartige Experimente durchgeführt werden können, und die die Spitzenstellung der deutschen und europäischen Neutronenforschung gewährleisten soll. Deswegen, und auch um die hohen Betriebskosten pro Instrument zu verringern, ist ein Ausbau der ESS auf die ursprünglich vorgesehene Kapazität von 35 Instrumenten und eine Beschleunigerleistung von 5 MW erforderlich. Eine langfristige Strategie 2023 - 2045 berücksichtigt auch die begrenzte Laufzeit von Neutronenquellen. Zur Sicherstellung der zukünftigen Grundversorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen ist die frühestmögliche Entwicklung einer kompakten beschleunigerbasierten Neutronenquelle mit ausreichender Leistung und Kapazität deshalb unabdingbar.

Zur langfristigen Sicherstellung der Versorgung der deutschen Nutzer:innen mit Neutronen ist

- I. der Betrieb des FRM II und Ausbau der Instrumente des MLZ sowie die Fortführung der MLZ-Förderung / -Kooperation,
- II. der volle Betrieb des ILL bis mindestens 2030/33,
- III. die baldige Inbetriebnahme und ein nachfolgend vollständiger Ausbau der ESS
- IV. und die Entwicklung und Etablierung der Technologie einer HBS unbedingt notwendig.

4.4 Zukünftige Entwicklungen

Wissenschaft

Forschungsprojekte sind weltweit durch eine zunehmende Komplexität und Interdisziplinarität gekennzeichnet [27]. Neue Forschungsfelder entwickeln sich sowohl innerhalb bestehender Forschungsbereiche, wie z. B. Quantenmaterialien und mRNA-Wirkstoffe, als auch an Schnittstellen unterschiedlicher Forschungsgebiete, wie z. B. aktuell auf dem Gebiet der Energiematerialien und biologischen Materialien [28]. Angetrieben durch die großen gesellschaftlichen

Herausforderungen entstehen und wachsen vor allem im Bereich der Material- und Lebenswissenschaften neue Forschungsfelder. Diese beinhalten viele Forschungsbereiche, in denen Neutronenmethoden unabdingbar sind, wie im Bereich der Quantenmaterialien, des Magnetismus, der weichen und biologischen Materie, der Materialforschung, sowie der Teilchenphysik. Ein weiterer wichtiger Trend ist die Entwicklung von Grundlagenforschung zu anwendungsnaher Forschung, vor allem im Bereich der Materialforschung, Lebenswissenschaften und im R&D-Bereich der Industrie.

Neutronenquellen mit ihrem breiten, sich über viele Wissenschaftsbereiche erstreckenden Portfolio von Neutronenmethoden sind traditionell interdisziplinär, und mit Nutzergruppen aus allen Fachgebieten in engem Austausch. Zur Aufklärung komplexer multi-disziplinärer und multi-analytischer Fragestellung werden Neutronen zunehmend zusammen mit komplementären Methoden verwendet. Neutronenquellen sind deshalb immer unmittelbar und aktiv an Experimenten und der Entwicklung neuer Forschungsgebiete beteiligt, wie z. B. im Bereich neuer magnetischer Strukturen, der Batterietechnologie und mRNA-Impfstoffentwicklung.

Industrielle Nutzung

Neutronen erlauben die zerstörungsfreie nicht-invasive Untersuchung von Materialien. Ihre hohe Materialdurchdringung und ihr besonderer Kontrast im Vergleich zu anderen Sonden (Röntgen, Licht, Elektronen) ermöglichen die Untersuchung von Spannungen und Stadien der Materialermüdung von Bauteilen unter mechanischer oder thermischer Belastung unter realistischen Bedingungen. Neutronen werden zur präzisen Bestimmung von Struktur, Elementverteilung und Phasenverhalten von Legierungen eingesetzt. Nicht-invasive *operando*-Untersuchungen von Materialien und Komponenten in sich bewegenden Bauteilen, z. B. in Motoren und Bremsen, sind mit Hilfe der Neutronenbildgebung (Imaging, Tomographie, Stroboskopie) möglich. Die Neutronenanalytik kann zur genauen Bestimmung von Element- und Isotopenverteilung in der Prozessanalytik und zur Bestimmung von Herkunft und Originalität von Materialien eingesetzt werden. Neutronen werden zudem zur homogenen Silizium-Dotierung für Anwendungen in der Hochleistungselektronik und zur Herstellung medizinischer Isotope (^{99m}Tc , ^{177}Lu , ^{166}Ho , ^{161}Tb) für bildgebende und therapeutische Anwendungen in der Medizin, insbesondere in der Krebstherapie eingesetzt.

Die besondere Sensitivität von Neutronen für leichte Elemente wie Wasserstoff und Lithium wird für die Entwicklung und Tests von Batterien, Brennstoffzellen und Elektrolyseuren benutzt, ebenso wie für die Lokalisierung von Wasser, Feuchtigkeit und Korrosion in Materialien und Bauteilen. Die Lokalisierung von Wasserstoffatomen und die Möglichkeit der Isotopenmarkierung durch Deuterierung wird zur strukturellen Untersuchung von Lebensmitteln, Pflege- und Wirkstoffformulierungen, Kunststoffen, Filmen und Beschichtungen eingesetzt. Neutronen erlauben dabei *in situ* Untersuchungen während der Synthese, Fertigung und Anwendung. Zunehmend kommen Neutronen in der Biotechnologie für Design und Optimierung von Inhibitoren und Enzymen zum Einsatz. Dies zeigt den immer breiter werdenden Anwendungsbereich von Neutronen in der industriellen Forschung und Entwicklung.

Neutronenquellen und Instrumentierung

Diese Entwicklungen stellen Herausforderungen an die Instrumentierung der Neutronenquellen dar. In den Material- und Lebenswissenschaften sind zunehmend zeitliche Abläufe von

Prozessen mit der Erfassung transienter Zwischenzustände von Interesse, z. B. während der Herstellung der Materialien, während des Gebrauchs und Betriebs von Komponenten, bei Früherkennung von Alterungsprozessen, oder bei strukturellen Veränderungen von Proteinen. Deshalb sind schnellere zeitaufgelöste Messungen (*in situ*, *operando*, stroboskopisch) mit simultaner Erfassung weiterer Längen- und Energiebereiche von zunehmender Bedeutung. Neue Forschungsfelder erfordern Experimente bei extremeren Bedingungen von Temperatur, Druck, magnetischen und elektrischen Feldern, Scherung, und Dehnung. Eine dritte wichtige Entwicklungsrichtung ist die Verkleinerung von Neutronenstrahl und Probenumgebungen zur Verbesserung der räumlichen Auflösung, der Untersuchung kleinerer Probenolumina, der Erzeugung größerer Gradienten und schnellerer Feldänderungen. Für alle Experimente sind höhere räumliche, zeitliche und spektrale Auflösung notwendig, sowie bei magnetischen Strukturen eine 2D- oder 3D-Polarisationsanalyse. Die Bedeutung der Deuterierung zur selektiven Kontrastierung und Kontrastvariation synthetischer organischer und biologischer Materialien wird weiter zunehmen. Komplexe Fragestellungen erfordern die Verfügbarkeit von Komplementärmethoden (Röntgenmethoden, Elektronenmikroskopie, Hochleistungs-computer) und von multi-modalen Detektionsmethoden.

I. Ein Upgrade-Programm (MORIS) für die Instrumentierung am MLZ ist für die Sicherstellung der zukünftigen Versorgung mit Neutronen und die Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen unbedingt notwendig. Eine auskömmliche Weiterfinanzierung des MLZ ist essenziell.

Digitalisierung und Datenanalyse

Zeitaufgelöste und automatisierte Hochdurchsatzexperimente, größere Detektoren mit höherer Auflösung und die simultane Nutzung multi-analytischer Methoden führen zu zunehmenden Datenraten und Datenvolumina. Dies stellt eine Herausforderung an Datenerfassung, Datenreduktion und Datenanalyse dar. Gleichzeitig sind die Anforderung an das Datenmanagement durch hohe Datenvolumina und Open Access Policies gestiegen. Die Unterstützung der Nutzer:innen während des gesamten Erkenntniszyklus von Experimentidee, Planung, Durchführung, Auswertung und Publikation ist für eine effizientere Nutzung und schnelleren Erkenntnisgewinn, Veröffentlichung und Innovation unbedingt erforderlich. Deshalb ist die Entwicklung Digitaler Zwillinge („digital twins“) zur Schulung und zur Unterstützung bei der Experimentplanung und Messzeitbeantragung, von KI-gestützten automatisierten Experimenten, von Nutzer-Feedback in Echtzeit zur Experimentsteuerung, von automatisierter Datenreduktion und KI-gestützter remote Datenanalyse, und die Integration in nationale und europäische Dateninfrastrukturen (NFDI, EOSC) von großer Bedeutung.

Effizienzsteigerung und Remote-Zugang

Angesichts der begrenzten Verfügbarkeit von Neutronen ist eine Steigerung der Effizienz der Experimente unbedingt notwendig. Durch unterstützende Maßnahmen entlang des Erkenntniszyklus ist bereits eine Steigerung der Effizienz erreichbar. Weiterhin soll die Effizienz von Experimenten durch Automatisierung, Robotik und Durchführung von Hochdurchsatz-Serien

gesteigert werden. Eine durch die Covid-19-Pandemie beschleunigte Entwicklung ist die Zunahme von mail-in und remote-Experimenten.

Alle Maßnahmen erfordern eine intensivere Vorbereitung und vor-Ort-Betreuung. Sie tragen insgesamt zur Steigerung der Effizienz von Neutronen-Instrumenttagen und damit zur Erhöhung der wissenschaftlichen Produktivität und Wirkung in Industrie und Gesellschaft bei. Die Herausforderungen in Instrumentierung, Digitalisierung und Effizienzsteigerung können nur durch enge Zusammenarbeit von Neutronenquellen und Nutzergemeinschaft bewältigt werden.

V. Die erfolgreichen, vom BMBF geförderten Programme ErUM-Pro und ErUM-Data sollen weitergeführt werden, um zukünftige Entwicklungen zu gestalten und um Kompetenz von Universitäten und Forschungsinstituten an den Neutronenquellen einzubinden.

Zugang zu ausländischen Neutronenquellen

Bis zur Wiederherstellung eines vollumfänglichen Instrumentbetriebs am FRM II und der Inbetriebnahme der ESS ist die Versorgung deutscher Nutzer:innen mit Neutronen besonders kritisch. Messreisen zu europäischen und außereuropäischen Neutronenquellen würden die Situation unmittelbar deutlich verbessern. Die damit verbundenen Kosten können jedoch von vielen Arbeitsgruppen, insbesondere von Nachwuchswissenschaftlergruppen, nicht aus ihren Forschungsetats finanziert werden. Ein Reisefonds zur finanziellen Unterstützung von Messreisen zu ausländischen Neutronenquellen, bei denen keine Reisekostenübernahme durch die Neutronenquelle erfolgt wie beim ILL, würde die Situation deutlich verbessern, und sehr zu einer positiven Entwicklung der deutschen Nutzergemeinschaft beitragen.

VI. Deutsche Nutzer:innen sollen bei Messreisen zu ausländischen Neutronenquellen finanziell unterstützt werden.

Gemeinsames Vorgehen der Stakeholder

Die gegenwärtigen Herausforderungen erfordern eine enge Abstimmung aller Stakeholder im Bereich der Neutronenforschung. Dazu gehören die Zuwendungsgeber (BMBF, StMWK, HGF, TUM), die Betreiber der deutschen Neutronenquellen und Instrumente (TUM, FZJ, Hereon), sowie die Nutzergemeinschaft (KFN). Damit können alle für die deutschen Akteure maßgeblichen Themen institutionsübergreifend in engem Austausch diskutiert, Empfehlungen ausgearbeitet und Entscheidungen vorbereitet werden.

VII. Eine gemeinsame Koordinierungsgruppe von BMBF, KFN, TUM und HGF, die einen unmittelbaren und regelmäßigen Informationsaustausch zwischen Zuwendungsgebern, Nutzer:innen und Betreibern von Neutronenquellen und Instrumenten erlaubt, ist vordringlich zu etablieren.

5. Literatur

- [1] Neutrons for science and technology, ENSA, 2017; <https://www.sni-portal.de/de/Dateien/ensa-brochure-neutrons-for-science-and-technology/view>
- [2] Neutronenforschung in Deutschland – Für Wissenschaft und Gesellschaft, Perspektiven und Empfehlungen 2020, Komitee Forschung mit Neutronen (KFN); <https://www.sni-portal.de/de/Dateien/kfn-strategiepapier-neutronenforschung-in-deutschland-fuer-wissenschaft-und-gesellschaft/view>
- [3] Schmidt, S. M., Brückel, T., Förster, S., Müller, M., Strategy Paper on Neutron Research in Germany: 2020 – 2045, 2019; https://www.sni-portal.de/en/files/2020_01_08_German_Strategy_Neutron_Research.pdf/view
- [4] Zukunftstrategie Forschung und Innovation, BMBF, 2022; <https://www.bmbf.de/Shared-Docs/Downloads/de/2022/zukunftsstrategie-fui.pdf?blob=publicationFile&v=2>
- [5] Sustainable Development, United Nations; <https://sdgs.un.org/goals>
- [6] Neutron Science in Europe: A Vision, Strengthening world-class research and innovation. Delivering economic and societal impact, League of Advanced European Neutron Sources (LENS), 2022; https://lens-initiative.org/wp-content/uploads/2022/08/LENS-Report-fin_doublepages.pdf
- [7] Gutberlet, T., Tunger, D., Zeitler, P., Brückel, T., Do neutrons publish, 2018; <https://arxiv.org/pdf/1804.07185.pdf>
- [8] Neutron scattering facilities in Europe – present status and future perspectives, ESFRI, 2016; https://www.esfri.eu/sites/default/files/NGL_CombinedReport_230816_Complete%20document_0209-1.pdf
- [9] Andersen, K., Update on Neutron Facilities, BESAC Meeting 2021
- [10] Brückel, T., Gutberlet, T. (Eds.) Conceptual Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS), 2020; <https://www.fz-juelich.de/en/jcms/jcms-2/downloads/conceptual-design-report-hbs/@@download/file>
- [11] <https://mlz-garching.de/englisch/instruments-und-labs.html>; ohne Instrument RESI; ohne im Bau befindliche Instrumente; PGAA/NAA gezählt als ein Instrument
- [12] MLZ Report 2014 – 2017, Long-term goals: Vision MLZ 2030, S. 146.
- [13] <https://www.ill.eu/users/instruments/instruments-list>; ohne Instrumente der Nuclear and Particle Physics Group
- [14] Société Française de la Neutronique (SFN): French Neutron Scattering Facilities: The Need for a National Strategy, 2023; http://www.sfn-asso.fr/fileadmin/user_upload/documents/SFN_statement.pdf
- [15] UK Neutron Scattering Group: Position on the Future of the ILL, 2023

- [16] Neutron Science Roadmap for Research Infrastructures 2025-2028 by the Swiss Neutron Science Community, 2021; https://boris.unibe.ch/156933/1/327_Neutron_Science_Roadmap_2021.pdf
- [17] Brückel, T., Gutberlet, T. (Eds.) Technical Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS), 2023; <https://www.fz-juelich.de/en/jcns/jcns-2/expertise/high-brilliance-neutron-source/conceptual-and-technical-design>
- [18] LENS Report Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources, 2021; <https://lens-initiative.org/wp-content/uploads/2021/02/LENS-Report-on-Low-Energy-Accelerator-driven-Neutron-Sources.pdf>
- [19] Neutrons for the nation – discovery and applications while minimizing the risk of nuclear proliferation, American Physical Society, 2018; <https://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/upload/APSNeutronsfortheNation.pdf>
- [20] League of Advanced European Neutron Sources (LENS); <https://lens-initiative.org/>
- [21] ELENA: European Low Energy accelerator-based Neutron facilities; <https://elena-neutron.iff.kfa-juelich.de/>
- [22] League of European Accelerator-based Photon Sources (LEAPS); <https://leaps-initiative.eu/>
- [23] Analytical Research Infrastructures in Europe (ARIE); <https://arie-eu.org/>
- [24] <https://europeanspallationsource.se/instruments>
- [25] MLZ Report 2018, S. 104; <https://mlz-garching.de/media/jb-2018-online.pdf>
- [26] $D\text{-Instrumenttage} = 200 \text{ Betriebstage} * x\% \text{ D-Nutzung} * \text{Anzahl Instrumente}$
- [27] Facilitating interdisciplinary research, National Academy of Science, 2005; <https://nap.nationalacademies.org/download/11153>
- [28] Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung, BMBF, Bundesanzeiger; <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2022/10/2022-10-12-Bekanntmachung-Technik.html>