

**Optimierung der Neutronenstromdichten komplexer
Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen einer
MW-Spallationsneutronenquelle unter dem Aspekt der
Strahlenschutzsicherheit**

- Monte-Carlo-Simulationen zum Zeitverhalten gepulster Neutronenfelder-

**Beim Fachbereich D, Abt. Sicherheitstechnik der
Bergischen Universität Wuppertal
zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Bettina Haft

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20050415

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20050415>]

Optimierung der Neutronenstromdichten komplexer Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen einer MW-Spallationsneutronenquelle unter dem Aspekt der Strahlenschutzsicherheit

- Monte-Carlo-Simulationen zum Zeitverhalten gepulster Neutronenfelder-

**Beim Fachbereich D, Abt. Sicherheitstechnik der
Bergischen Universität Wuppertal
zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Bettina Haft

1. Gutachter: Prof. Dr. rer.nat. D. Filges
2. Gutachter: Univ.-Prof.Dr.rer.nat. S.Hartwig

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 2004

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek verfügbar.

Inhalt

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Darstellung und Diskussion wellenlängen- und zeitabhängiger Neutronenstromdichten, die für ein materialabhängiges, dreidimensionales Geometrie-Konzept der geplanten Europäischen Spallationsquelle ESS mittels Monte-Carlo-Simulationen ermittelt wurden. Diese Ergebnisse dienen zur späteren Beurteilung der Leistung und dementsprechender technischer und strahlenschutzmäßiger Auslegung der gewählten Target-Moderator-Reflektor-Konzepte und Neutronenexperimente.

Die verwendete Monte-Carlo-Methode beschreibt die Neutronenproduktion, den Neutronentransport und die nach Neutronenwechselwirkung im Moderator zu erwartenden Neutronenausflüsse an der Moderatoroberfläche über den gesamten Energiebereich von der Protoneneinschussenergie im GeV-Bereich bis hinunter zu den Energien im kalten Bereich (meV-Bereich). Der Schwerpunkt der Berechnungen liegt auf der Ermittlung der Neutronenausflüsse aus verschiedenen Moderatorkonzepten. Es wurden beide geplanten ESS-Targetstationen berücksichtigt: Sowohl die Kurzpulstargetstation SPTS (Protonenpulsdauer: 50µs) als auch die Langpulstargetstation LPTS (Protonenpulsdauer: 2 ms).

Bei der SPTS wurden Wasser- und Wasserstoffmoderatoren untersucht in drei verschiedenen Konzepten: gekoppelt, entkoppelt, entkoppelt und vergiftet. Bei der LPTS wurden nur gekoppelte Moderatoren betrachtet (ein Wasser- und ein Wasserstoffmoderator). Weiterhin werden beim Wasserstoffmoderator die Auswirkung verschiedener Ortho-para-Verhältnisse auf die zu erzielenden Neutronenstromdichten untersucht und ein Vergleich zwischen den Ergebnissen mit einem 100%para-Wasserstoff und einem Festmethanmoderator gezogen. Außerdem wurden Berechnungen für alternative Moderatorkonzepte durchgeführt.

Der Vergleich zwischen den Monte-Carlo-Ergebnissen für die ESS mit Resultaten für andere Spallationsquellen zeigt ähnliche Neutronenintensitätsspektren bezüglich Form und auch Höhe, wenn auf die gleiche Leistung normiert wird, jedoch wird die ESS mit 5MW pro Targetstation als leistungsstärkste Spallationsneutronenquelle geplant.

Eine Betrachtung der zusätzlichen Nutzung der ESS als Bestrahlungseinrichtung für Fusionsmaterialien ergab, daß ähnliche Schädigungsraten wie bei dem geplanten Fusionsreaktor DEMO erzielt werden können.

Am Ende werden die berechneten Ergebnisse in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Moderatorkonzepte diskutiert, und es wird ein Ausblick für die Zukunft am Ende gegeben.

Abstract

This thesis is concerning the presentation and discussion of wavelength and time depending neutron current densities, which have been calculated with Monte Carlo simulations for a material depending three dimensional geometry concept of the planned European spallations source ESS. This results can be used for a later justification of the power and the technical and radiation safety construction of the choosen target moderator reflector assembly and neutron experiments.

The applied Monte Carlo method describes the neutron production, the neutron transport and the neutron output at the moderator surface coming out of the moderator after certain neutron interactions. It includes the whole energy range starting with the incident proton energy in GeV region coming down to energies in the cold region of some meV.

The concentration of the calculations is on the neutron output for different moderator concept. Both planned ESS target station have been considered: The short pulse target station SPTS (proton pulse length: 50 µs) and the long pulse target station LPTS (proton pulse length: 2ms).

For the SPTS water and hydrogen moderators have been investigated in three different concepts: coupled, decoupled and decoupled with additional poisoning. For the LPTS only coupled moderators have been regarded (one water and one hydrogen moderator).

Furthermore for the hydrogen moderator the effect on the gained neutron current densities with different ortho para ratios have been considered and a comparison has been made between the results of a 100% para hydrogen moderator and a solid methane moderator.

In addition calculations have been succeeded for alternative moderator concepts.

The comparison between Monte Carlo results for the ESS and for other spallation sources shows similar spectra of neutron intensities relating form and hight, if the results are normalized to the same power, but the ESS is planned as the most powerful spallations source with 5 MW each target station.

The consideration of an additional use of the ESS as radiation station for fusion materials shows similar damage rates as the planned fusion reactor DEMO.

At the end a discussion of the calculated results follows with special focus on the power of different moderator concepts and a look into the future.

Resumé

La présente thèse s'intéresse à présentation ainsi qu'à la discussion sur la longueur d'onde et le temps dépendant de la densité du courant des neutrons, lesquels sont tirés des calculs de simulation de Monte Carlo pour un matériel avec une géométrie tridimensionnelle, selon le concept de Spallation Européenne planifiée, en sigle ESS. Ces résultats peuvent être appliqués en vue d'une justification ultérieure de la puissance et de l'incrustation technique modérée de protection contre les radiations, incrustation du concept réflecteur modérateur cible et les expériences menées sur des neutrons.

La méthode de Monte Carlo utilisée décrit la production des neutrons, leur transport et leur émanation de la surface des modérateurs découlant de modérateur après leur certaine interaction. Ceci inclut la principale énergie déboutant avec l'incidente énergie de proton en GeV qui provient d'une région froide en meV. L'axe central des calculs se place sur la recherche du flux de neutrons provenant de différents concepts de modérateur. Les deux stations cibles planifiées ESS doivent être prises en considération. Aussi bien pour la courte station cible dit SPTS (durée de pulsation de neutron 50 μ s) que pour la longue station cible appelée LPTS (durée de pulsation de neutron : 2 ms).

S'agissant du SPTS, l'on examine le modérateur d'hydrogène sous trois différents concepts, à savoir : le couplé, le découplé et le découplé avec une intoxication additionnelle.

Quant au LPTS, l'on ne considère que le modérateur découplé (en modérateur d'eau et en modérateur d'hydrogène). En ce qui concerne le modérateur d'hydrogène à l'avenir, l'effet de différents Ortho para comportements sur la densité du courant de neutron sera étudié et une comparaison des résultats avec 100% para hydrogène et un solide modérateur de méthane sera établie. Par ailleurs, des calculs ont été faits en vue de trouver des concepts alternatifs de modérateur.

La comparaison des résultats de Monte Carlo pour le ESS avec ceux d'autres sources de spallation montre un similaire spectre d'intensité de neutron qui concerne aussi bien la forme que la hauteur, lorsque les résultats sont normalisés avec la même puissance, le ESS étant cependant planifié comme la plus puissante source de spallation avec 5 MW dans chaque station cible.

La considération d'une application supplémentaire sur le ESS comme station de radiation pour fusionner du matériel montre un similaire quote-part de détérioration comme DEMO.

Une discussion sur le résultat obtenu en vue de la fonctionnalité de différents concepts de modérateur et une vision pour le future sera épinglé à la fin.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Verwendete Rechenmodelle und Wirkungsquerschnitte	5
2.1 Physik der Spallation	5
2.2 Monte-Carlo-Teilchentransportsimulationen	7
2.3 Verwendete Wirkungsquerschnitte	9
3. Targets, Moderatoren, Reflektoren in einer Spallationsquelle	12
3.1 Targets für Spallationsquellen	13
3.2 Moderatoren für Spallationsquellen	15
3.2.1 Target-Moderator-Anordnungen in Spallationsquellen	15
3.2.2 Moderation der Neutronen und Auslegungskriterien für Moderatoren	16
3.2.3 Die Moderatormaterialien Wasser (H ₂ O) und schweres Wasser (D ₂ O) bei einer Temperatur von 300 K	25
3.2.4 Die Moderatormaterialien Wasserstoff (H ₂) und Deuterium (D ₂) bei einer Temperatur von 20K	26
3.2.5 Das Moderatormaterial Methan (CH ₄) bei einer Temperatur von 100K (flüssig) und bei einer Temperatur von 20K (fest)	28
3.2.6 Andere kohlenwasserstoffhaltige Moderatormaterialien	29
3.2.7 Vormoderatoren (Premoderatoren)	30
3.3. Reflektoren für Spallationsquellen	32
4. Die Europäische Spallations-Neutronenquelle ESS (European Spallation Source)	33
4.1 Das ESS-Konzept	33
4.2 Ionenquellen, Linac, Kompressorringe der ESS-Anlage	35
4.3 Allgemeines zu den Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen der ESS	36
5. Simulationsuntersuchungen für die Targetstationen der ESS: Kurzpulstargetstation SPTS (Short Pulse Target Station) und Langpulstargetstation LPTS (Long Pulse Target Station)	38
5.1 Kurzpulstargetstation SPTS	38
5.1.1 Die Geometriemodelle für die Kurzpulstargetstation SPTS und die verwendeten Parameter für die Simulationen	38
5.1.2 Berechnete Neutronenparameter und Normierung für die SPTS	41
5.1.3 Neutronenstromdichten für verschiedene Wellenlängen in den drei verschiedenen Wasser-Moderatorkonzepten (H ₂ O bei T=300K)	43
5.1.4 Neutronenstromdichten für verschiedene Wellenlängen in den drei verschiedenen vormoderierten Wasserstoff-Moderatorkonzepten (100% para-H ₂ bei T=20K)	46
5.1.5 Numerische Resultate für die Moderatorkonzepte der SPTS	48
5.1.6 Lebensdauer einer Gadolinium-Vergiftungsschicht für ESS-Moderatoren	50

5.2	Langpulstargetstation LPTS	51
5.2.1	Die Geometriemodelle für die Langpulstargetstation LPTS und die verwendeten Parameter für die Simulationen.....	51
5.2.2	Berechnete Neutronenparameter und Normierung für die LPTS	57
5.2.3	Simulationsergebnisse für ESS-LPTS-Moderatoren.....	57
5.2.3.1	Vergleich zwischen Fluxtrap- und Wing-Anordnung anhand der thermischen Neutronenflußdichten und der mittleren Neutronenstromdichten.....	58
5.2.3.2	Vergleich zwischen einfacher und erweiterter Wing-Anordnung anhand der thermischen Neutronenflußdichten und der thermischen Neutronenstromdichten.....	61
5.2.3.3	Thermische Neutronenflußdichten und thermische Neutronenstromdichten für verschiedene Abstände zwischen Target und Moderatoren in der erweiterten Wing-Geometrie	62
5.2.3.4	Thermische und mittlere Neutronenstromdichten für verschiedene Moderatordicken des kalten Wasserstoffmoderators	64
5.2.3.5	Thermische und mittlere Neutronenstromdichten für verschiedene des Verlängerungen Vormoderators in das Strahlrohr	65
5.2.3.6	Numerische Resultate für die Moderator-konzepte der LPTS	67
5.2.3.7	Thermische Neutronenstromdichten für einen vormoderierten Wasserstoffmoderator mit verschiedenen Reflektoren.....	69
6.	Mittlere Neutronenstromdichten für ortho-/para-Wasserstoff- und für Festmethanmoderatoren bei einer Moderator-temperatur von T=20K	71
6.1	Einfluß von verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen im Wasserstoffmoderator (T=20K) auf die mittleren Neutronenstromdichten.....	71
6.1.1	Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para- Verhältnissen in der SPTS-Geometrie - ohne Vormoderator	72
6.1.2	Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para- Verhältnissen in der SPTS-Geometrie - mit Vormoderator	74
6.1.3	Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para- Verhältnissen in der LPTS-Geometrie - ohne Vormoderator	75
6.1.4	Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para- Verhältnissen in der LPTS-Geometrie - mit Vormoderator.....	76
6.2	Vergleich von mittleren Neutronenstromdichten eines Festmethan- moderators (T=20K) und eines 100% para-Wasserstoffmoderators (T=20K) in der SPTS- und in der LPTS-Geometrie.....	77
7.	Alternative Moderator-konzepte für die ESS	79
7.1	Alternative Moderator-konzepte in der ESS-Kurzpulstargetstation SPTS.....	81
7.2	Alternative Moderator-konzepte in der ESS-Langpulstargetstation LPTS	84

8. Vergleiche des ESS-Konzeptes mit anderen Spallationsneutronenquellen	88
8.1 ISIS – Rutherford Appleton Laboratories, Großbritannien.....	88
8.2 SNS – Spallation Neutron Source –Oak Ridge National Laboratories, USA.....	91
8.3 JPARC – Japan Proton Accelerator Research Complex – Tokai, Japan.....	93
8.4 SINQ - Spallationsinduzierte Neutronenquelle Paul-Scherrer-Institut, Schweiz.....	95
9. Die ESS als intensive Neutronenquelle für ein Bestrahlungsprogramm von Fusionsreaktormaterialien	97
10. Zusammenfassung und Ausblick	107
11. Literaturangaben	110
Anhang	116
Abbildungsverzeichnis	125
Tabellenverzeichnis	128

1. Einleitung und Zielsetzung

Neutronen sind - neben Elektronen, Licht und Röntgenstrahlen - eine wichtige Sonde zur Untersuchung der Struktur und Dynamik von Festkörpern und Flüssigkeiten. Ihre Anwendung in der modernen Physik, Chemie, Medizin, Biologie und Materialforschung ist unverzichtbar.

Bislang waren Forschungsreaktoren die einzigen Neutronenquellen. Einen alternativen Weg, Neutronenstrahlen hoher Intensität zu erzeugen, bietet die Kernzertrümmerung (Spallation). Hier werden Protonen aus einem Teilchenbeschleuniger auf ein Schwermetalltarget (Blei, Wolfram oder Quecksilber) geschossen, um dessen Atomkerne zu zertrümmern und dabei schnelle Neutronen freizusetzen. Diese können dann - ähnlich wie in den Reaktoren - in sogenannten Moderatoren abgebremst und in den Strahlrohren zu den Experimentiereinrichtungen geleitet werden.

„Im Gegensatz zur Kernspaltung ist die Möglichkeit, Neutronen durch Spallation zu erzeugen, nicht auf wenige Sorten von Atomkernen beschränkt. Bei ihr wird keine Energie freigesetzt, sondern im Gegenteil sogar Energie verbraucht. Einerseits ist dies ein Nachteil, da dauernd Energie zugeführt werden muß; andererseits ist dies ein Vorteil, weil der Neutronenfreisetzungsvorgang sofort zum Stillstand kommt, sobald die ihn treibende Energiequelle - der Beschleuniger - abgeschaltet wird. Damit verbunden ist ein erheblich geringerer Aufwand an Sicherheitseinrichtungen und zudem die Möglichkeit, der Neutronenproduktion praktisch jede beliebige Zeitstruktur aufzuprägen [1].“

Insbesondere zur Analyse dynamischer Strukturen ist dies ein Vorteil. Bei Reaktoren werden sogenannte Chopper eingesetzt, um nur einen bestimmten Teil des Neutronenflusses zu nutzen. Doch diese Methode hat einen schwerwiegenden Nachteil: Der Neutronenstrahl aus dem Reaktor ist typischerweise zu 99% der Zeit unterbrochen. Mit anderen Worten: 99% der Neutronen werden nicht genutzt. Anders ist die Situation bei der gepulsten Neutronenquellen: Dort könnten die Wissenschaftler alle gelieferten Neutronen nutzen, weil diese direkt gepulst vorliegen.

Spallationsneutronenquellen geringer und mittlerer Leistung (d.h. Leistungen im kW-Bereich) sind seit einigen Jahren in England, in den USA und in Japan in Betrieb und haben die erwarteten Vorteile, die insbesondere in der Möglichkeit liegen, gepulste Neutronenstrahlen zu liefern, voll bestätigt. Zur Zeit sind in USA und in Japan Quellen im MW-Bereich im Bau. In Europa wird momentan ein Projekt für eine 10 MW-Spallationsquelle - die „*European Spallation Source (ESS)*“ - durchgeführt, das bis Ende 2003 ein realisierbares technisches Konzept, eine Kostenabschätzung und vor allem die wissenschaftliche Nutzung darlegen soll. Die Auslegung der Pulse ist 30- bis 50-mal kräftiger als die, mit der die Wissenschaftler bislang arbeiten - auch wenn die ESS zeitlich gemittelt nicht mehr Neutronen als ein üblicher Kernreaktor produzieren wird.

Das System, das die optimalen Neutronenstrahlen für die Neutronenstreuexperimente zur Verfügung stellt, ist bei einer Spallationsquelle die *Target-Moderator-Reflektor-Anordnung*. In dieser Anordnung werden die durch den Spallationsvorgang im *Target* der Anlage erzeugten schnellen Neutronen im sogenannten *Moderator* abgebremst, damit sie für die entsprechenden Neutronenstreuexperimente nutzbar sind. Der *Reflektor* minimiert die Verluste beim Neutronennutzfluß, indem er die Neutronen, die den Moderator verfehlen und verlassen, zum Teil in diesen zurücklenkt. Die Schnelligkeit, mit der diese Prozesse ablaufen, erlaubt den Betrieb einer solchen Quelle mit Neutronenpulslängen von ca. 30 µs, falls ein entsprechend gepulster Beschleuniger verfügbar ist.

Bei der Auslegung und Optimierung eines Target-Moderator-Reflektor-Systems bestehen wesentlich mehr Freiheiten als bei einem Forschungsreaktor, da die abgebremsten Neutronen nicht in das Target zurückgestreut werden müssen, um die neutronenerzeugende Reaktion in Gang zu halten. Die Anordnung von Materialien um das Target muß einem bestimmten Neutronennutzfluß angepaßt werden, der sich nach den entsprechenden Bedürfnissen der Experimente richtet. Dies ist ein sehr komplexer Optimierungsprozeß, in dem eine große Anzahl verschiedenster Parameter aufeinander abgestimmt werden muß.

In Abb. 1.1 sind schematisch die verschiedenen Parameter eines Target-Moderator-Reflektor-Systems zusammengestellt, die den optimalen Neutronennutzfluß der Anlage bestimmen.

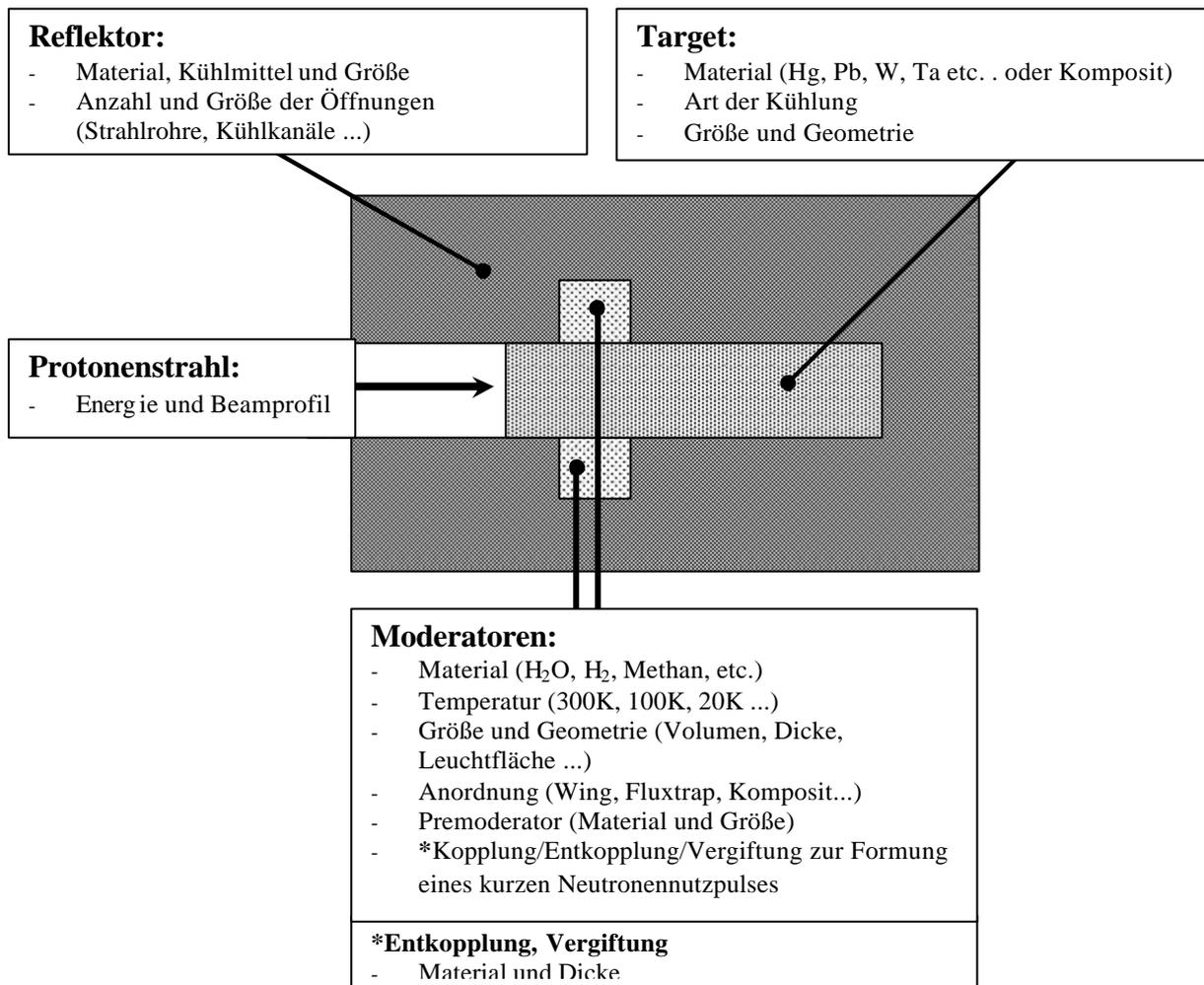


Abb. 1.1: Schematische Darstellung einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung und zugehörige Parameter, die den Neutronennutzfluß beeinflussen.

Die in dieser Arbeit ausführlich betrachteten Target-Moderator-Reflektor-Systeme der geplanten Spallationsquelle ESS unterscheiden sich durch ihre Pulsformen. Bei der Kurzpuls-Targetstation SPTS (**S**hort**P**ulse**T**arget**S**tation) muß der Neutronenfluß auf hohe Spitzenintensität, schmale Pulsbreiten (ausgedrückt in $FWHM = \text{Full Width at Half Maximum}$) und auf kurze Abklingzeiten (kleine Pulszerfallskonstante τ_K) hin optimiert werden. Die Langpuls-Targetstation LPTS (**L**ong**P**ulse**T**arget**S**tation) ist konzeptionell auf maximale Neutronenflußintensität während der gesamten Pulsdauer und ebenfalls auf kurze Abklingzeiten (geringe Pulszerfallskonstante τ_L) hin optimiert werden.

Die beiden zu optimierenden Pulsformen sind in Abb. 1.2 dargestellt:

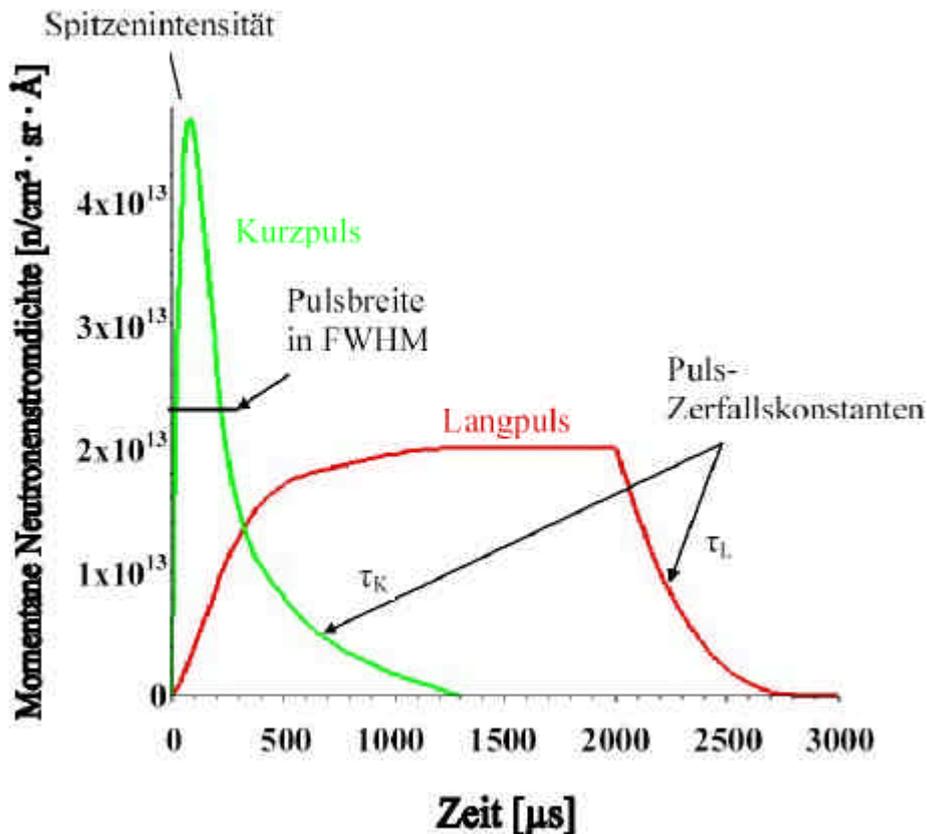


Abb. 1.2: Zu optimierende Pulsformen für kurz- bzw. langgepulste Spallationstargetstationen mit Spitzenintensität, Pulsbreite FWHM und Puls-Zerfallskonstanten τ_K und τ_L

Das Ziel der hier vorgelegten Arbeit ist, geeignete Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen der ESS für die Kurz- bzw. Langpulsstargetstation (SPTS bzw. LPTS) zu entwickeln, diese in entsprechende Material-/Geometrie-Konzepte zu transformieren und anschließend aufgrund der Simulationsergebnisse die zu erwartenden Neutronennutzflüsse auf Größen wie Spitzenintensität, Zeitverhalten und spektrale Verteilung für verschiedene Moderatorsysteme zu optimieren. Außerdem sollen die mittleren Neutronenstromdichten verglichen werden, die mit kaltem Wasserstoff ($T=20\text{K}$) und mit festem Methan ($T=20\text{K}$) als jeweiliges Moderatormaterial erzielt werden. Desweiteren sollen die berechneten Neutronenintensitäten der ESS mit denen von derzeit betriebenen und in Bau befindlichen Spallationsneutronenquellen verglichen und diskutiert werden.

Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen des Spallationsprozess, der verwendeten Simulationssysteme und Wirkungsquerschnitte.

In *Kapitel 3* werden die in einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung gebräuchlichen Materialien in Hinblick auf ihre neutronische Wirkungsweise vorgestellt.

Das Gesamtkonzept der europäischen Spallationsquelle ESS wird im *Kapitel 4* erläutert. Anschließend folgt eine ausführliche Darstellung und Diskussion der hier entwickelten dreidimensionalen, materialabhängigen Geometrien für die beiden Target-Reflektor-Moderator-Konzepte. Weiterhin folgt ein detaillierter Diskurs der in den Simulationen verwendeten Parameter.

Die Resultate der Monte-Carlo-Simulationen für die Moderatormaterialien Wasser (H_2O bei $T=300K$) und Wasserstoff (100% para- H_2 bei $T=20K$) bezüglich Neutronenstrom- und Neutronenflußdichten werden in *Kapitel 5* in graphischer und tabellarischer Form zusammengestellt, unterteilt nach denen für die Kurzpulsstation SPTS und für die Langpulsstation LPTS.

Kapitel 6 zeigt den Vergleich von Energiespektren der mittleren Neutronenstromdichten für 100%para-WasserstoffModeratoren und Festmethanmoderatoren.

Simulationsergebnisse für aktuelle, alternative Zweimoderatorkonzepte in den ESS-Targetstationen finden sich in *Kapitel 7*.

Kapitel 8 widmet sich dem Vergleich von berechneten energieabhängigen Neutronenstromdichten der hier vorgestellten ESS-Konzepte mit denen anderer Neutronenquellen wie ISIS (UK), SNS (USA) und JPARC (Japan).

Da Neutronen auch verwendet werden können für Materialbestrahlungen wird im *Kapitel 9* die Möglichkeit untersucht, in einem Target-Moderator-System der ESS Fusionsmaterial zu bestrahlen, die für zukünftig geplante Fusionsreaktoren diskutiert werden.

Im *Kapitel 10* werden die Ergebnisse zusammengefaßt und diskutiert.

2. Verwendete Rechenmodelle und Wirkungsquerschnitte

2.1 Physik der Spallation

Spallationsreaktionen werden durch das Auftreffen hochenergetischer ($E \geq 100\text{MeV}$) Teilchen auf einen Kern mit hoher Massenzahl, wie z.B. Hg, W, Ta, Pb, Th oder U, ausgelöst. Der Spallationsprozeß, wie er zur Zeit in physikalischen Modellen verwendet wird, gliedert sich in mehrere Phasen, die schematisch in Abb. 2.1 dargestellt sind:

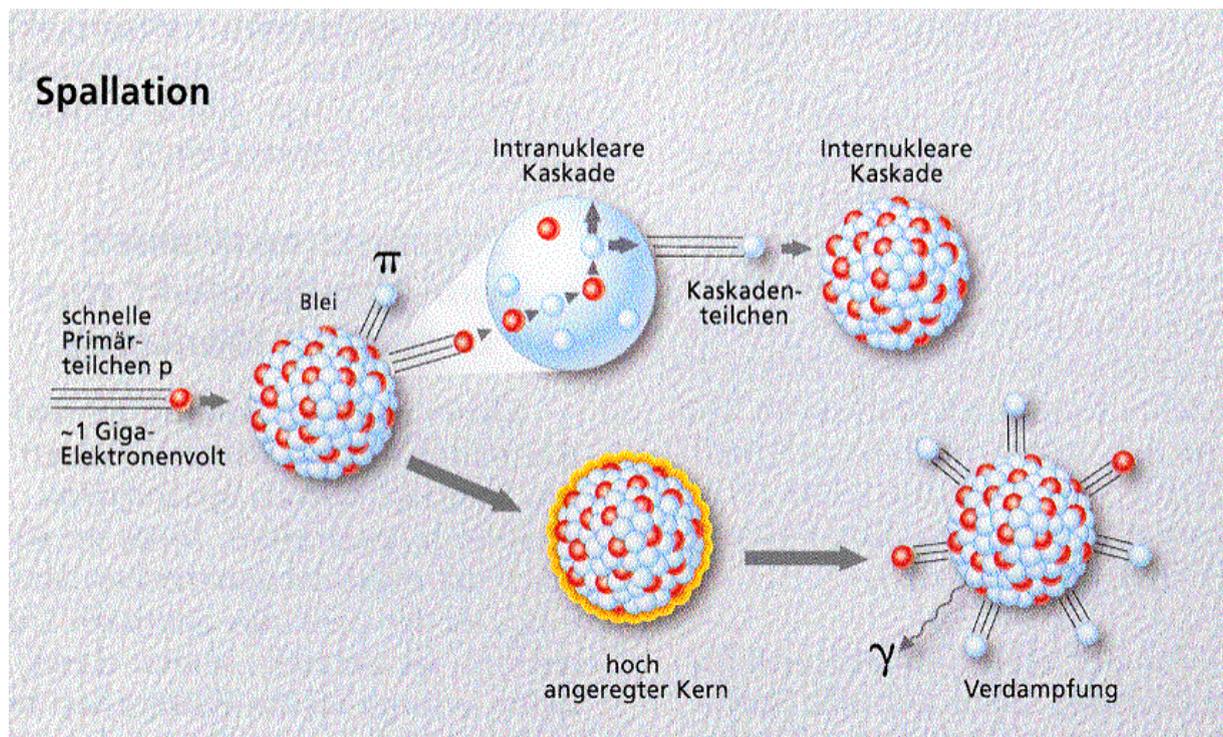


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Spallationsprozesse, hier am Beispiel von Blei (Pb), mit den Phasen intra- bzw. internukleare Kaskade und Verdampfung /fzj1999/

In der intranuklearen Kaskade werden hochenergetische Neutronen, Protonen und Pionen aus dem getroffenen Kern herausgelöst. Diese können dann auf benachbarte Kerne treffen und dort ebenfalls Teilchen herauslösen, was als internukleare Kaskade bezeichnet wird. Sind diese Vorgänge energetisch nicht mehr möglich, verbleibt ein angeregter Restkern, der durch Verdampfung von größtenteils Neutronen, Protonen und leichten Bruchstücken wie Deuteronen, Tritonen und Heliumkernen in einen angeregten Grundzustand übergeht. Diese Restanregungsenergie ist eine Quelle von Gammastrahlung mit Energien im MeV-Bereich. Bei einigen Targetmaterialien wie Thorium und Uran kann sogenannte „Hochenergiespaltung“ als Konkurrenz zur regulären Verdampfung auftreten. Nach Ablauf des Spallationsprozesses bleiben dann Restkerne übrig, auch Spallationsprodukte genannt, die radioaktiv sein können.

Beim Spallationsprozeß werden überwiegend Neutronen produziert, die zu über 90% aus der Verdampfungsphase stammen. Diese Verdampfungsneutronen eines Spallationstargets sind über einen Energiebereich bis $E_n \sim 20$ MeV verteilt und zeigen eine spektrale Verteilung ähnlich der einer Kernspaltung mit einer Energie von einigen MeV (siehe Abb. 2.2).

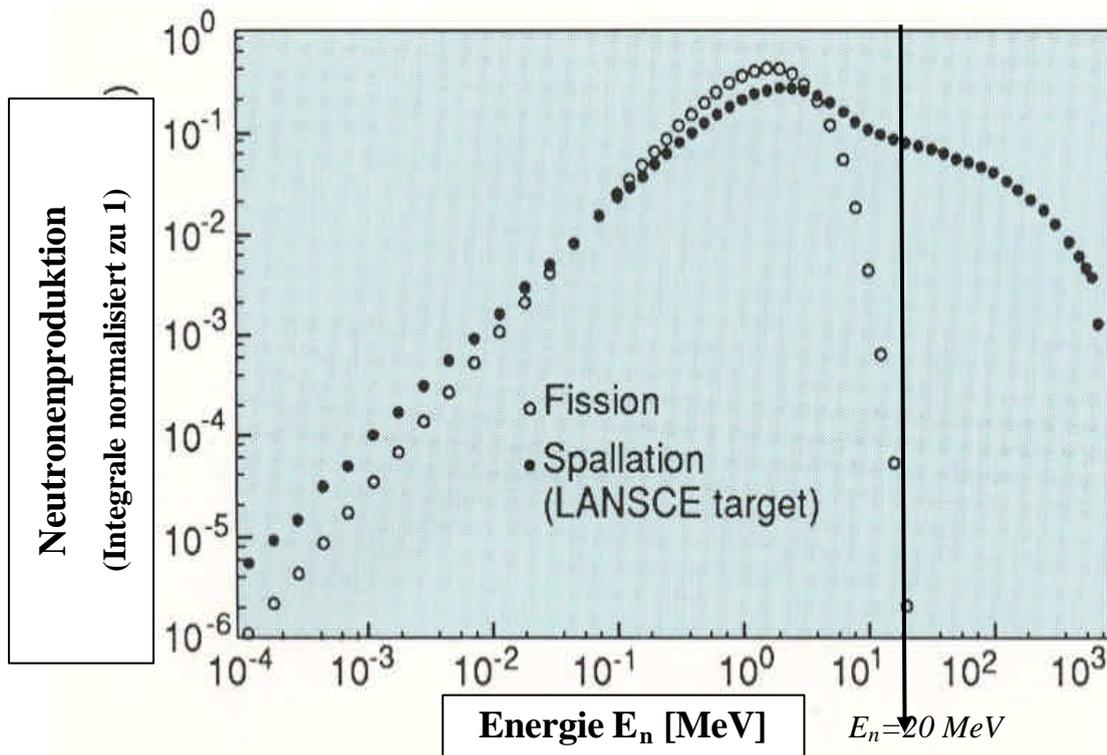


Abb. 2.2: Vergleich von Neutronenproduktionsspektren aus Spaltung (Fission) von Uran-235 und aus Spallation in einem Wolframtarget (LANSCE target) /rus1990/

Die in den Kaskaden erzeugten hochenergetischen Neutronen (oberhalb von $E_n \sim 20$ MeV bis hinauf zur Einschubenergie der Primärteilchen) bilden nur einen kleinen Prozentsatz der im Target erzeugten Neutronen, sind aber wegen ihrer hohen Energie und deren Durchdringungsfähigkeit ein Abschirmproblem. Deshalb ist es von großer sicherheitstechnischer Bedeutung, sich eine genaue Kenntnis über die Ausbreitung von Neutronen zu verschaffen, die in einem Target durch Spallation erzeugt werden. Ein Neutronenfeld kann in Energie, Raum und Zeit durch Teilchentransportsimulationsverfahren analysiert und dargestellt werden, insbesondere bei komplexen Materialzusammensetzungen wie in der Target-Moderator-Reflektor-Anordnung einer Spallationsquelle.

Der sogenannte Quelltherm, der die Spallationsreaktion und die Teilchenphysik im Hochenergiebereich beschreibt, ist durch umfangreiche Experimente am COSY-Beschleuniger des Forschungszentrums Jülich gut ausgemessen und durch Produktionsmodelle für den Spallationsprozeß validiert /fil2001/. So wird z.B. als Basis für die intranukleare Kaskade das Modell von Bertini verwendet aus den Referenzen /ber1963/ und /ber1969/. Er dient als Basis für weitere strahlenphysikalische Betrachtungen als auch für produzierte Radioaktivität, Energiedeposition und Materialschädigung durch hochenergetische Protonen und Neutronen, die wichtige Aspekte bei der sicherheitstechnischen Auslegung einer Spallationsquelle sind. Erste Abschätzungen darüber in Bezug auf die geplante europäische Spallationsquelle ESS finden sich in Referenz /tie2001/. Weitergehende Details zur Physik der Spallation und der Spallationsreaktion sind in den Referenzen /clo1988/, /apt1999/, /fil1992/ gegeben.

2.2 Monte-Carlo-Teilchentransportsimulationen

Mit Monte-Carlo-Verfahren und den heute zur Verfügung stehenden Computerleistungen ist es möglich, sehr komplexe dreidimensionale Teilchentransportprobleme zu lösen. Der Transport und die Wechselwirkung von Teilchen wie Hadronen (Protonen, Neutronen), Leptonen und Mesonen mit Materie werden durch die von Boltzmann 1872 aufgestellte Bilanzgleichung beschrieben, deren Lösungsformen in Fachliteratur zu Reaktorphysik oder Fusionstechnologie zu finden sind wie Referenzen /eme1969/ und /dol1982/.

Monte-Carlo-Verfahren zum Transport von Teilchen in Materie greifen auf diese Gleichung zurück und verwenden statistische Methoden, um die entsprechenden Observablen zu bestimmen. Für jedes Teilchenschicksal werden Zufallszahlen erzeugt, die verwendet werden, um mit entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen Vorhersagen über Streuwinkel und Weglängen zwischen bestimmten Wechselwirkungen der Teilchen mit Materie zu berechnen. Die Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten werden über energie-, winkel- und materialabhängige nukleare Teilchenwirkungsquerschnitte bestimmt. Mit entsprechenden Analysefunktionen werden die gewünschten Observablen, wie z.B. die winkelabhängige Teilchenflußdichte $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ oder die winkelabhängige Teilchenstromdichte in $\vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$, ermittelt.

In Abb. 2.3 ist die schematische Struktur zur Berechnung von Teilchenfeldern (insbesondere von Neutronen) in komplexen Spallations-Target-Moderator-Reflektor-Systemen dargestellt. Informationen zu verschiedenen Monte-Carlo-Teilchentransport-Simulationsverfahren finden sich in Referenz /fil1992/.

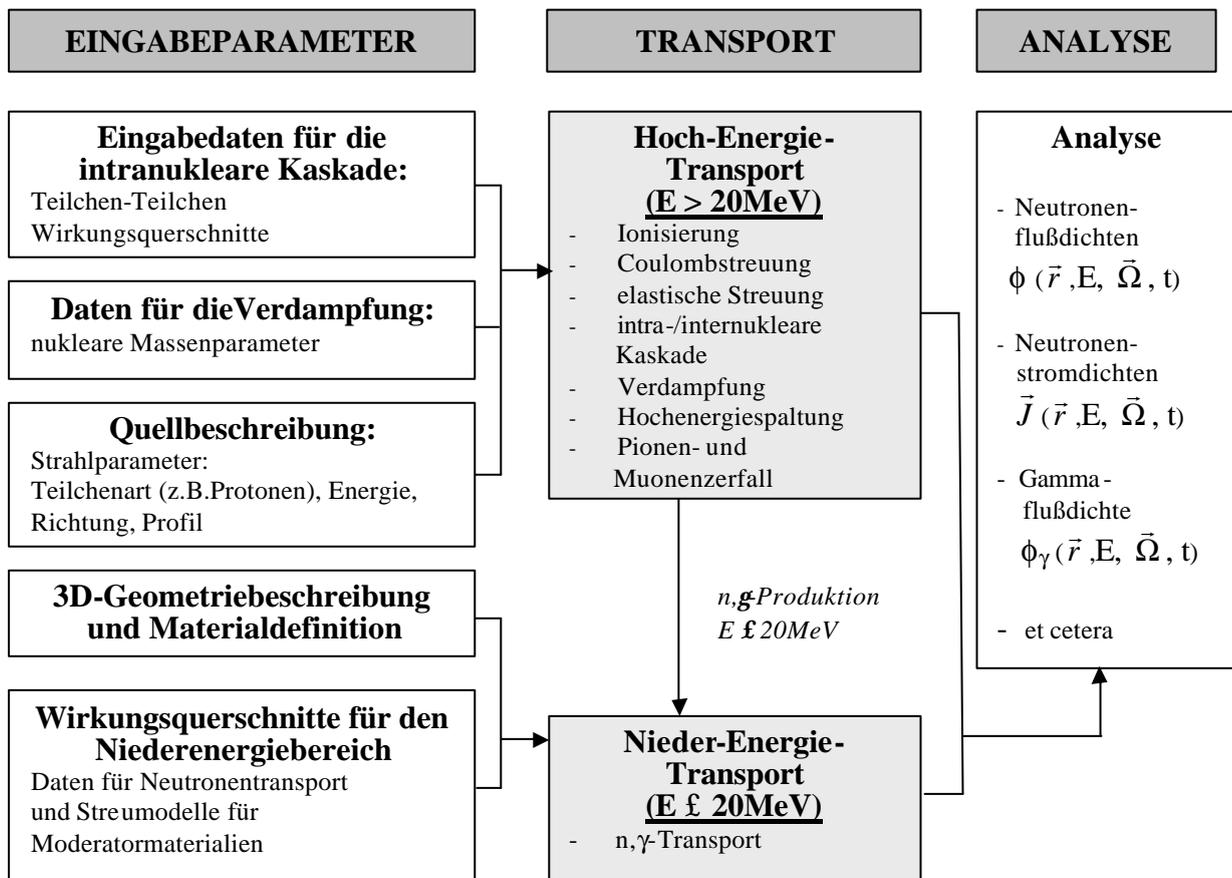


Abb. 2.3: Allgemeines Schema zur Berechnung von Neutronenfeldern mittels Monte-Carlo-Teilchentransport-Rechenverfahren: Eingabe-, Transport- und Analyseteil

Als Eingabeparameter werden die Daten für Teilchen-Teilchen-Wirkungsquerschnitte und nukleare Massenparameter für die Verdampfung aus Tabellen übernommen, um den Spallationsprozeß zu beschreiben (mit Priorität auf Produktion von Neutronen, d.h. intra-/internukleare Kaskade und Verdampfung). Weiterhin werden die Quelldaten festgelegt - insbesondere die Strahlparameter eines Protonenstrahls mit Energie, Richtung und Intensität - sowie die dreidimensionale Geometrie mit entsprechenden Materialdaten und Wirkungsquerschnitten für den Niederenergiebereich. Der Teilchentransport bei $E > 20$ MeV wird als Hoch-Energie-transport bezeichnet und bei $E \leq 20$ MeV als Nieder-Energie-transport. Ergebnisdaten aus dem Hoch-Energiebereich wie die Position, Richtung und Energie von Neutronen mit $E \leq 20$ MeV werden an den Nieder-Energiebereich über spezielle Dateien übergeben. Im niederenergetischen Teil können zusätzlich Neutronen entstehen, die auch in die Transportberechnungen miteinbezogen werden.

Das Monte-Carlo-Simulationssystem MCNPX

Für die Transportsimulationen in dieser Arbeit wurde das Simulationssystem MCNPX Version 2.1.5 von Los Alamos verwendet, beschrieben in Referenzen /apt1999/ und /hug1997/. MCNPX ist eine Kombination des LAHET-Code (Los Alamos High Energy Transport Code /lah1980/) für den Hochenergie-transport bei Energien $E \geq 20$ MeV und des MCNP (Monte-Carlo Neutron and Photon Transport Code /mcn2000/) für den niederenergetischen (n, γ)-Transport bei Energien $E \leq 20$ MeV. Die Gründe für die Wahl von MCNPX anstelle anderer Monte-Carlo-Teilchentransportcodes sind:

- Der gesamte Energiebereich von GeV bis hinunter in den meV-Bereich (subthermische Neutronen) wird durch **e i n** System abgedeckt.
- Unterhalb von ca. 3 eV sind für den Neutronentransport und vor allem bei Streu- und Moderationseffekten besondere Modelle und Wirkungsquerschnitte notwendig (siehe Kap. 2.3), insbesondere entsprechenden Streumodelle für kalte Moderatoren ($T=20$ K). In der Datenbasis für MCNPX sind solche Streudaten und -gesetze für die am meisten verwendeten Moderatormaterialien vorhanden, beschrieben u.a. in Referenz /mcf1990/.
- Die Geometriebeschreibung in MCNPX erlaubt die Gestaltung sehr komplexer dreidimensionaler Systeme /mcn2000/.

Im MCNPX sind verschiedene Analysesysteme wählbar, um die gewünschten Observablen zu berechnen. Dies wird mit sogenannten Detektoren (Tallies) durchgeführt, die wie in einem Experiment entsprechende Meßgrößen bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Detektoren verwendet:

- Der orts-, energie-, winkel- und zeitabhängige Neutronenfluß $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$, aus dem die Flußdichte $\phi(\vec{r}, t)$ bestimmt werden kann:

$$\phi(\vec{r}, t) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \int_0^E dE \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$$

- Die orts-, energie-, winkel- und zeitabhängige Teilchenstromdichte $\vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$, aus der die Neutronenstromdichte $\vec{J}(\vec{x}, t)$ aus einer Oberfläche, z.B. in x-Richtung, bestimmt werden kann:

$$\vec{J}(\vec{x}, t) = 2\pi \int_0^{\pi} \sin \Theta d\Theta \int_0^E dE \cos \Theta \phi(\vec{x}, E, \vec{\Omega}, t)$$

Für Moderatoren und Reflektoren in einer Spallationsquelle spielen thermische Wirkungsquerschnitte eine besondere Rolle. Sie beinhalten neben den Gesetzen der Neutron-Kern-Streudynamik die atomaren Bindungen und thermischen Bewegungen der Kerne, die bei Energien unterhalb von 3eV mit sinkender Energie verstärkt wirksam werden. Da Neutronenstreuexperimente meist Neutronen aus diesem Energiebereich nutzen, sind die thermischen Wirkungsquerschnitte bei Berechnungen zur Abschätzungen von nutzbaren Neutronenströmen aus dem Moderator von immenser Bedeutung.

Für Moderatoren müssen auch die thermische Bewegung der Kerne und deren chemische Bindung berücksichtigt werden. Im MCNPX werden die notwendigen doppeldifferentiellen Streuquerschnitte für die Neutronenstreuung und dem Abbremsvorgang von Neutronen über die sogenannten $S(\alpha,\beta)$ - Streugesetze bestimmt /mcfl994/:

$$s(E \rightarrow E', \mathbf{m}) = s_B \cdot \frac{1}{2 \cdot k_B \cdot T} \cdot \sqrt{\frac{E'}{E}} \cdot S(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

$s(E \rightarrow E', \mathbf{m})$: doppelt differentieller Wirkungsquerschnitt [barn/eV]

E: Anfangsenergie des Neutrons [eV]

E': Endenergie des Neutrons [eV]

μ : Kosinus des Streuwinkels [dimensionslos]

σ_B : totaler gebundener Streuwirkungsquerschnitt (Definition siehe unten) [barn]

$k_B \cdot T$: thermische Energie [eV]

k_B = Boltzmannkonstante $1.381 \cdot 10^{-23}$ [J/K], T=Temperatur [K]

$S(\alpha,\beta)$: Streugesetz [dimensionslos]

Die Werte für den Impulsübertrag α und den Energietransfer β ergeben sich wie folgt:

$$\mathbf{a} = E' + E - 2 \cdot \sqrt{E' \cdot E} \cdot \frac{\mathbf{m}}{A \cdot k_B \cdot T}$$

$$\mathbf{b} = \frac{E' - E}{k_B \cdot T} \quad \text{positiv für Energiegewinn}$$

A: Massenzahl des betrachteten Materials, alle andere Parameter: siehe oben

Das Streugesetz ist materialabhängig und ergibt sich aufgrund experimenteller Ergebnisse und einer Streufunktion, die unter anderem auf Theorien von Van Hove und anderen basiert, siehe Referenzen /van1954/ und /whi1961/.

Der totale gebundene Streuwirkungsquerschnitt σ_B umfaßt die Streuung an einem Atom unter Berücksichtigung der Bindung. Er ergibt sich aus dem totalen, freien Streuwirkungsquerschnitt σ_F (für ein sich unabhängig bewegendes Atom; er ist mehr oder weniger konstant über einen weiten Energiebereich oberhalb von ca. 1eV) und der Streulänge bzw. Streuamplitude b, die materialspezifisch ist /bau1998/:

$$\sigma_B = \sigma_F \left(\frac{A+1}{A} \right)^2 = 4 \pi b^2$$

σ_B : totaler gebundener Streuwirkungsquerschnitt

σ_F : totaler freier Streuwirkungsquerschnitt

A: Massenzahl des betrachteten Materials

b: Streulänge bzw. Streuamplitude; materialspezifischer Parameter

Bei Energien oberhalb einiger eV ist z.B. der Streuquerschnitt σ_F von einem Molekül wie H₂O einfach die Summe der Streuquerschnitte von Sauerstoff und Wasserstoff. Bei Energien im meV-Bereich ist σ_B durch die Berücksichtigung der Bindungen zwischen den Sauerstoff- und Wasserstoffatomen und den Wasserstoffatomen untereinander ca. viermal größer als σ_F .

Im thermischen Bereich wird bei der Streuung unterschieden zwischen der kohärenten und der inkohärenten Streuung, jeweils mit *inelastischem* und *elastischem* Streuanteil.

Die kohärente Streuung liegt vor, wenn die gestreuten Neutronenwellen an benachbarten Atomen im Moderatormaterial untereinander interferieren. Es liegt ein kollektiver Effekt vor. Wenn kohärente Streueffekte eine Rolle spielen, wird der Streuprozess im thermischen Bereich nicht nur durch den totalen Streuquerschnitt σ_S bestimmt, sondern auch durch den kohärenten Streuquerschnitt σ_{Coh} , welcher die Intensität der kohärenten Streuung bestimmt. In vielen Fällen sind beide Querschnitte gleich, besonders bei Materialien mit regelmäßig aufgebauten Strukturen (z.B. für Beryllium $\sigma_S=7,54b$ und $\sigma_{Coh}=7,53b$ oder Graphit $\sigma_S=5,53b$ und $\sigma_{Coh}=5,50b$). Starke Unterschiede bestehen dagegen für Wasserstoff mit $\sigma_S=81,5b$ und $\sigma_{Coh}=1,79b$, d.h. Wasserstoff zeigt ein deutlich inkohärentes Streuverhalten.

Die inkohärente Streuung kommt zustande, wenn z.B. Moderatormaterial aus verschiedenen Isotopen mit verschiedenen Streuverhalten aufgebaut und somit die Neutronenstreuung individuell geprägt ist.

Bei beiden Streuarten ist der Hauptanteil *inelastische Streuung*. Thermische inelastische Streuung resultiert in einem Energieverlust (-gewinn) für das Neutron mit einer gleichzeitigen Anregung (Abregung) des Targetkerns, an dem es gestreut wird /mcf1994/.

Die *elastische Streuung* findet unterhalb von 1 eV mit sinkender Energie zunehmend ohne Energieaustausch /mcf1994/ und nur bei regelmäßig aufgebauten Festkörpern statt, weil die thermische elastische Streuung die Streuung am atomaren Gitter ist. Bei Flüssigkeiten und Gasen liegt kein Verbund vor, an dem elastische Streuung möglich ist /squ1997/. Die effektive Masse des Targets ist durch die Verbundwirkung wesentlich größer als bei einem einzelnen Targetkern. Dadurch kann das Neutron keine Energie im Streuprozess verlieren.

3 Targets, Moderatoren und Reflektoren in einer Spallationsquelle

Das System in einer Spallationsquelle, in dem die Neutronen produziert und für Neutronenstreuexperimente an Materie auf entsprechende Energien abgebremst werden, ist die Target-Moderator-Reflektor-Anordnung (TMRA), schematisch in Abb. 3.1 dargestellt.

Ein Protonenstrahl trifft auf das Target, in dem durch Spallation die Neutronen freigesetzt werden. Diese erzeugten Neutronen mit mittleren Energien von $E_n = 2-3$ MeV werden mittels Moderatoren auf Energien von einigen meV abgebremst, um sie für die Neutronenstreuung nutzbar zu machen. Der Reflektor streut Neutronen, die ansonsten nutzlos in den Raum emittiert würden, in das System zurück.

Dieses Kapitel gibt eine kurze Übersicht über die Funktionen und die Materialien der Einzelkomponenten Target, Moderator und Reflektor häufig verwendet werden. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf den Moderatoren.

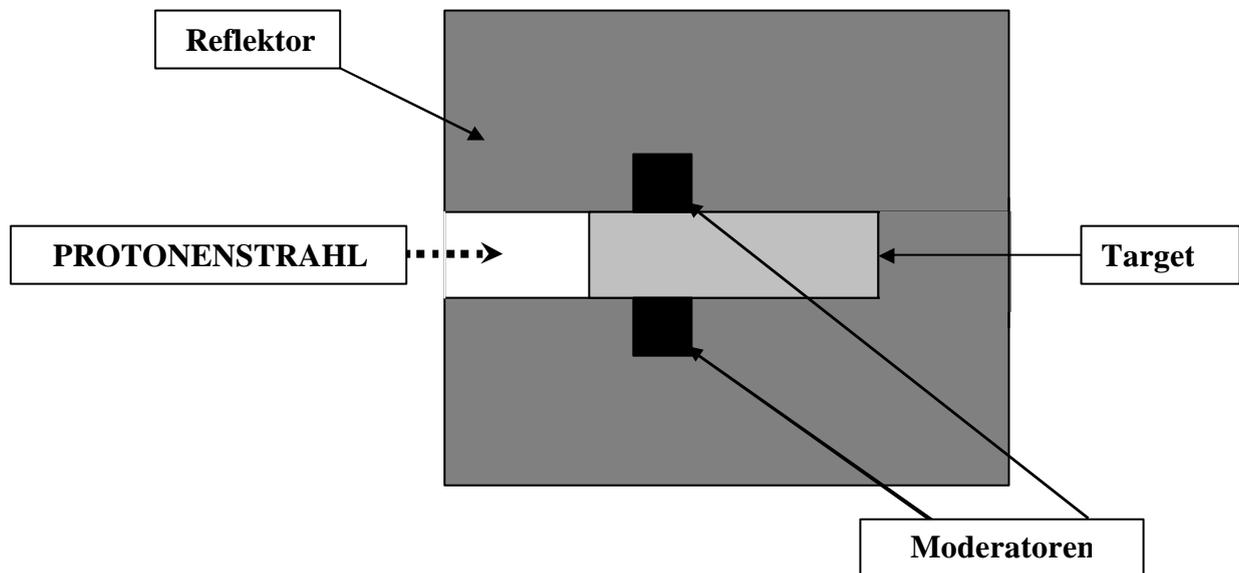


Abb. 3.1: Schematische Darstellung einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung in Seitenansicht

3.1 Targets für Spallationsquellen

Als Targetmaterialien für Spallationsquellen werden Schwermetalle verwendet, deren hohe Massenzahl eine hohe Neutronenausbeute garantiert. Einen Überblick über wichtige Targetmaterialien und deren physikalische Eigenschaften gibt Tabelle 3.1.

	Targetmaterial					
	Hg	W	Ta	Pb	Bi	U
Atomgewicht [g/mol]	200.6	183.84	180.95	207.2	209.0	238.02
Dichte bei 20°C [g/cm ³]	13.55 (flüssig!)	19.3	16.6	11.35	9.75	19.05
Schmelzpunkt bei 1 atm [°C]	-38.87	3410	3000	327.5	271.3	1135
Siedepunkt bei 1 atm [°C]	356.58	5700	5425	1740	1560	3930
Absorptionswirkungsquerschnitt für thermische Neutronen S_A [barn]	389	18.5	22	0.17	0.034	7.7

Tabelle 3.1: Physikalische Eigenschaften diverser Targetmaterialien /nün2001/+/isi2001/

Quecksilber (Hg) weist in der Tabelle gegenüber den anderen Materialien zwei Besonderheiten auf, die bei Verwendung als Spallationstarget von Bedeutung sind:

1. Quecksilber ist flüssig bei Raumtemperatur.

Ein Flüssigmetall wie Quecksilber kann Druckwellen, die bei kleinen Protonenpulsdauern und hoher Strahlleistung im Target entstehen, besser verteilen. Die freigesetzte Wärme kann im flüssigen Quecksilber besser verteilt werden als in einem Feststofftarget. Quecksilber ist gleichzeitig Target- und Kühlmaterial; dies führt zu einer höheren Dichte des Targetmaterials, da der Einsatz von komplexen Kühlsystemen wie in Feststofftargets im Flüssigmetalltarget verringert werden kann und somit eine höhere Neutronenausbeute erzielt wird. Durch die ständige Umwälzung von flüssigem Quecksilber lassen sich größere lokale Strahlenschäden vermeiden.

2. Quecksilber hat einen hohen Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen.

Quecksilber absorbiert nahezu alle thermischen Neutronen, die im Target selbst entstehen und die über die Umgebung in das Target wieder zurückgestreut werden. Der energieabhängige Absorptionswirkungsquerschnitt für Quecksilber im Vergleich zu dem von Wolfram und Tantal ist im Anhang A gegeben.

In einer gepulsten Spallationsquelle mit Quecksilbertarget wird durch die hohe Absorptionsrate das Abklingen eines Neutronenpulses aus dem Moderator günstig beeinflusst, da fast keine thermischen Neutronen aus dem Target in den Moderator gelangen können. Die Neutronenverteilung im thermischen Energiebereich $E \leq 413$ meV für eine Hg-Target-Moderator-Reflektor-Anordnung ist in Abb. 3.2. dargestellt und verdeutlicht die Wirkung von Quecksilber als Absorber für thermische Neutronen.

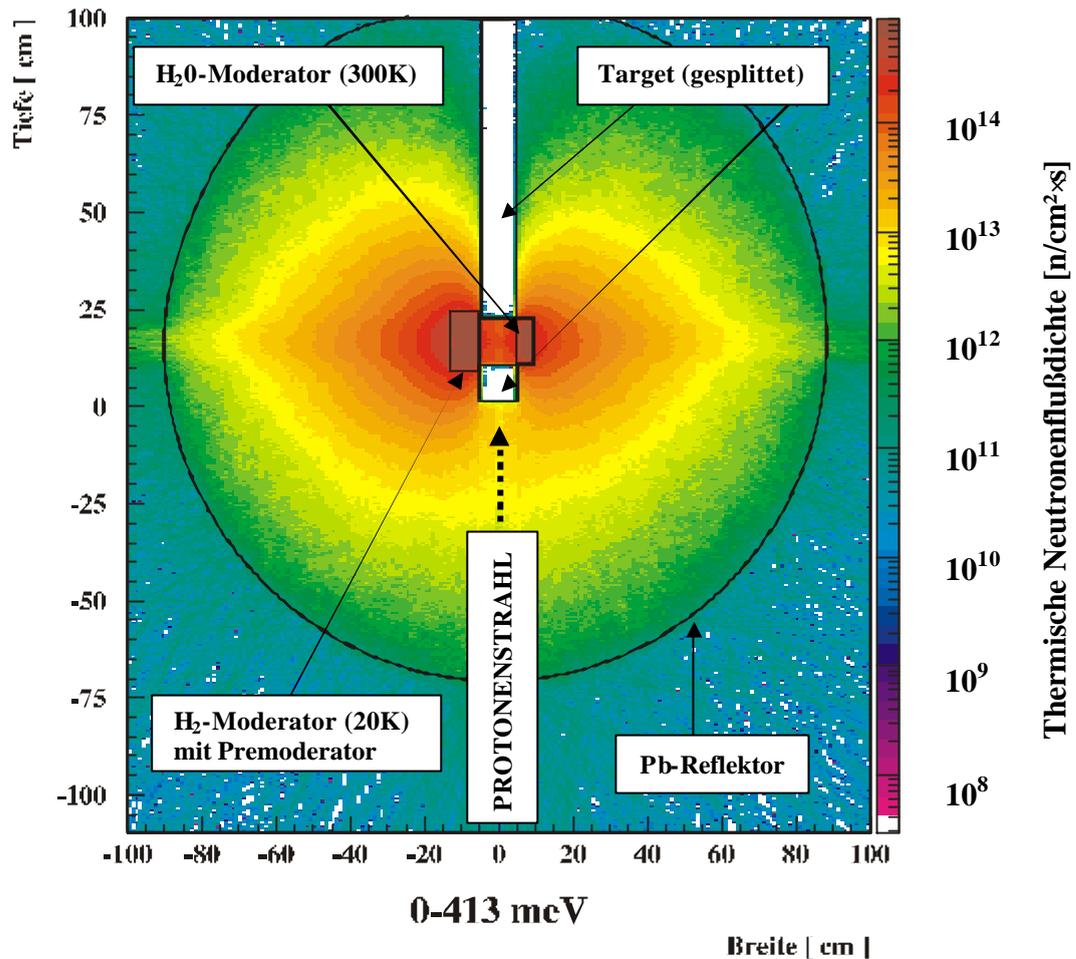


Abb. 3.2: Isolinien der thermischen ($E_n \lesssim 413\text{meV}$) Neutronenflußdichten bei einer mittleren Protonenstrahlleistung von 5MW in einem Quecksilbertargetsystem in sogenannter Fluxtrapanordnung (siehe nächste Seite) mit Reflektor und Moderatoren im horizontalen Schnitt.

Die rechte Skala zeigt die Intensität der Neutronenflußdichten [$\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$] in Falschfarben. Deutlich ist das Absorptionsverhalten des Quecksilbertargets zu sehen, weil das Target als weiße Fläche zu sehen ist, d.h. nahezu kein thermischer Neutronenfluß im Target

3.2 Moderatoren für Spallationsquellen

3.2.1 Target-Moderator-Anordnungen in Spallationsquellen

Bei Spallationsquellen ist ein Moderationsprozeß notwendig, um die aus dem Target und dem Reflektor kommenden hochenergetischen Neutronen (im MeV-Bereich) auf niedrigere Energiebereiche (meV) abzubremsen, in denen die Neutronen für Experimente nutzbar sind. Einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten, wie die Moderatoren, in denen der Moderationsprozeß stattfindet, um ein Target angeordnet werden können, gibt Abb. 3.3:

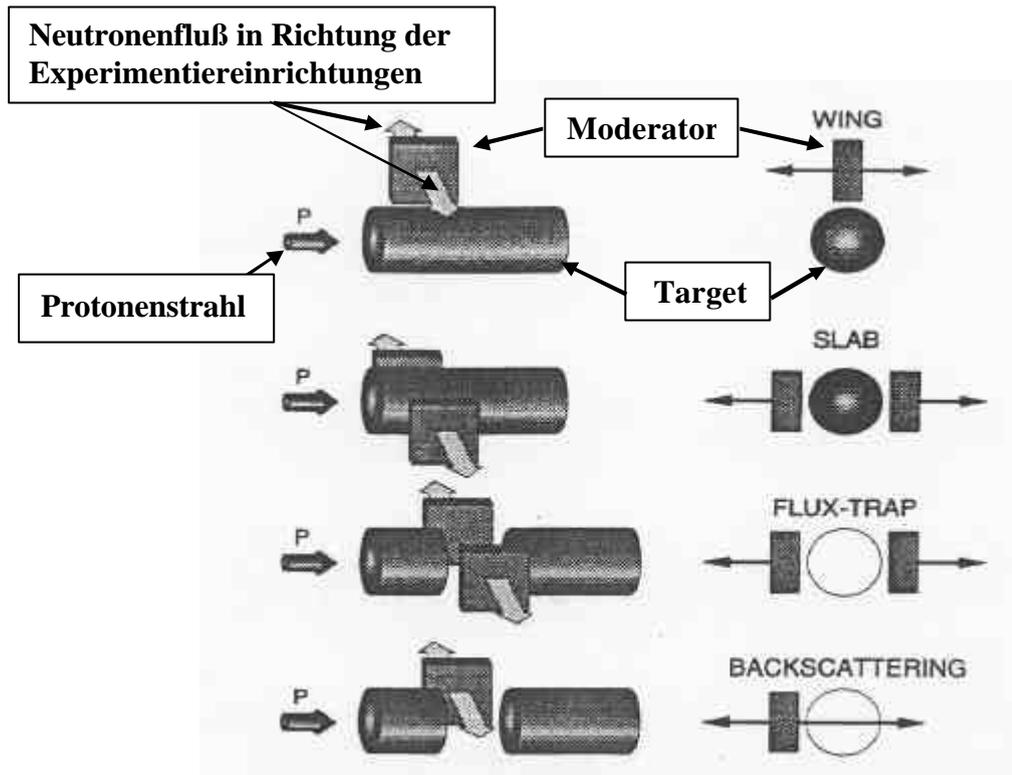


Abb. 3.3: Prinzip verschiedener Moderator-Target-Anordnungen am Beispiel zylindrischer Spallationstargets nach /rus2001/

Bei der **Wing**-Anordnung befinden sich die Moderatoren ober- bzw. unterhalb des Targets. Die Wing-Anordnung bietet zwei Vorteile: 1. Es sind zwei Moderatorflächen bei *einem* Moderator vorhanden, aus denen Neutronen in Richtung der Instrumente ausströmen können. 2. Durch die Wing-Anordnung wird der Neutronenausfluß aus dem Moderator nur wenig von schnellen Neutronen aus dem Target beeinträchtigt /jes2000/. Meistens werden die Moderatoren in Winggeometrie so angeordnet, daß die Moderatorflächen, aus denen die nutzbaren Neutronenflüsse kommen, um einen bestimmten Winkel zur Protonenstrahlachse versetzt sind, damit die Experimentiereinrichtungen optimal angeordnet werden können. Der Vorteil zweier nutzbarer Moderatorflächen *eines* Moderators ist weder bei der **Slab**-Anordnung gegeben - da die Moderatoren seitlich zum Target angeordnet sind - noch bei der **Fluxtrap**-Anordnung. Die Besonderheit der Fluxtrap-Anordnung liegt in einem geteilten Target, daß einen Zwischenraum - die Fluxtrap (Flußfalle) - dort aufweist, wo die höchsten Neutronenausflüsse aus dem Target zu erwarten sind, die dann ungehindert in den Moderator fließen können und somit einen hohen Neutronennutzfluß ermöglichen. Ein **Backscattering**-Moderator ist in Prinzip ein Fluxtrap-Moderator, der aber von zwei Seiten betrachtet wird.

Die Experimentiereinrichtung, die von der Seite kommt, welche beidseitig vom Target abgeschlossen wird, nutzt einen Neutronenfluß, der mit energiereichen Neutronen aus dem Target kontaminiert ist, so daß viele Experimente aufgrund dieser Kontamination nicht möglich sind. Außerdem sind maximal nur zwei Moderatoren möglich.

3.2.2 Moderation der Neutronen und Auslegungskriterien für Moderatoren

Neutronen werden bei dem Spallationsprozeß mit einem außerordentlich breiten Energiespektrum freigesetzt (siehe Abb. 2.2, Seite 6). Der überwiegende Teil stammt aus der Verdampfung und hat mittlere Energien um 2-3 MeV. Für Anwendungen in der Neutronenstreuung werden jedoch von einer Spallationsquelle nutzbare Neutronen mit typischen Energien um 10^{-5} eV gefordert. Die Energie der Verdampfungsneutronen muß also um etwa 8 bis 9 Größenordnungen reduziert werden. Dies geschieht im Moderationsprozeß, bei dem die Energie der Neutronen nur in nuklearen Stoßprozessen abgegeben werden kann. Bis zur Thermalisierung der Neutronen ist eine große Anzahl solcher Stöße notwendig.

Aufgrund der überwiegend zufälligen Natur der Neutronenmoderation ist nur ein kleiner Teil der ursprünglich erzeugten Neutronen auf diese Weise nutzbar zu machen, insbesondere, wenn die Experimente weit entfernt von der Moderatoroberfläche positioniert sind (zwischen einigen zehn bis einige hundert Metern). Die Größe des Bruchteils von Neutronen, der diese Bedingungen erfüllt, hängt stark von der Art und Anordnung des Moderators ab. Deshalb ist die Auswahl und Optimierung des Moderators ein wichtiger Kernbestandteil bei der Auslegung einer Spallationsquelle.

Bei der Moderation findet der stoßweise Bremsprozeß der hochenergetischen Neutronen ein Ende, wenn die Energie des Neutrons vergleichbar ist mit der Energie der thermischen Bewegung der Moderatorteilchen, d.h. ein thermisches Gleichgewicht erzielt wird. Der Bremsbereich geht asymptotisch in den thermischen Bereich über. Als obere Grenze für den thermischen Energiebereich wird häufig $E_{th} = 413$ meV angenommen¹.

Das Geschwindigkeitsspektrum bzw. die Flußverteilung $\phi(v)$ von Neutronen, die aus dem Moderator kommen und im meV-Bereich liegen, entspricht im Idealfall dem einer Maxwellverteilung (siehe Abb. 3.4, nächste Seite). Idealfall bedeutet, daß im Moderator ein thermisches Gleichgewicht herrscht. Das Maximum der Maxwellverteilung entspricht dabei der kinetischen Energie E von $E = k_B \cdot T$ ($k_B =$ Boltzmannkonstante $= 1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K], $T =$ Temperatur [K]). Für Moderatoren mit Temperaturen von 300 K ($= 27^\circ\text{C}$) beträgt die Energie der Neutronen etwa 25 meV, $T = 20\text{K}$ entspricht $E = 1,6$ meV.

Je ähnlicher das Neutronenflußspektrum eines Moderators dem Maxwellspektrum ist, desto effektiver ist der Moderator. Das thermische Gleichgewicht eines Moderators wird jedoch durch Neutroneneinfang und Neutronenausfluß beeinträchtigt, so daß nur in einem unendlich ausgedehnten Moderator das Erreichen des idealen thermischen Gleichgewichts möglich wäre /gur1968/. Bei der Auslegung eines Moderators für eine Spallationsquelle spielen aber auch Faktoren wie Kühlung, räumliche Gegebenheiten usw. eine Rolle.

Um den Energiebereich einer Spallationsneutronenquelle, bei der die Neutronen mit den Moderatoren im thermischen Gleichgewicht stehen, nach oben und unten zu erweitern, benutzt man Moderatoren, deren Temperatur über oder unter der Umgebungstemperatur gehalten wird (sogenannte „heiße“ oder „kalte“ Quellen).

¹ Die Energie $E = 413$ meV entspricht der Abscheidekante von Kadmiun, (siehe Absorptionswirkungsquerschnittverlauf im Anhang E), d.h. Neutronen mit Energien unterhalb dieser Grenze (thermische Neutronen) absorbiert Kadmiun

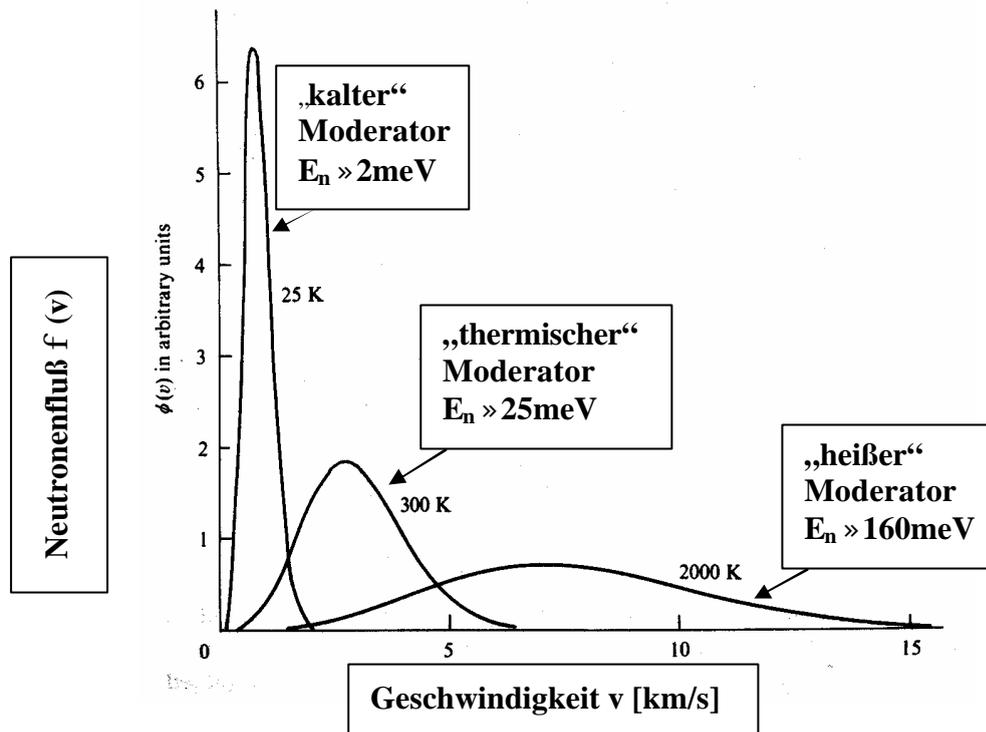


Abb. 3.4: Maxwellverteilungen von Neutronenflüssen $f(v)$ für verschiedene Moderator-Temperaturen /squ1997/

Aufgrund ihrer charakteristischen Temperatur in der spektralen Energieverteilung, die mit der Maxwellverteilung unmittelbar in Zusammenhang steht, wird unterschieden zwischen *heißen* Moderatoren (Maximum im 160meV-Bereich), *thermischen* (Maximum im 25meV-Bereich, Temperatur ca. 300 K) und *kalten* Moderatoren (Maximum im 2meV-Bereich, Temperatur ca. 20K), wie in Abb. 3.4 dargestellt. Die Energie E in meV ist dann $5,277 v^2$, wobei v die Geschwindigkeit des Neutrons ist. Für $E=25\text{meV}$ beträgt $v=2.2$ km/s.

Die Effektivität eines Moderatormaterials, Neutronen zu thermalisieren, hängt zu einem großen Teil von dessen totalem Wirkungsquerschnitt σ_t ab, der alle Wirkungsquerschnitte für Neutronenstreuung σ_s und -absorption σ_a (z.B. (n,γ) -, (n,p) - oder (n,α) -Reaktionen) zusammenfaßt. Neutronenvermehrende Anteile, wie $(n,2n)$ -Reaktionen und Spaltung werden nicht betrachtet, da sie bei niedrigeren Energien für den Moderationsprozeß eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Absorptionswahrscheinlichkeit je Stoß ist $P_a=\sigma_a/\sigma_t$. Für einen effektiven Moderator muß P_a je Stoß so klein sein, daß eine ausreichende Zahl von Neutronen den Bremsvorgang überlebt und letztendlich eine ausreichende Anzahl Neutronen im gewünschten Energiebereich zur Nutzung verfügbar ist. P_a und die Zahl der Thermalisierungsstöße bestimmen in einem unendlich ausgedehnten Moderator die Wahrscheinlichkeit, den thermischen Energiebereich zu erreichen.

Während des Abbremsvorgangs gibt das Neutron bei jedem Stoß im Mittel einen festen Bruchteil seiner Energie ab, der im Wesentlichen von der Masse des gestoßenen Kerns abhängt. Der Mittelwert des Verhältnisses der Energien E_2 (vor dem Stoß) und E_1 (nach dem Stoß) ist also für ein gegebenes Moderatormaterial eine Konstante. Man kann daraus das „mittlere logarithmische Energiedekrement“ ξ ableiten, das wie folgt definiert ist (alle folgenden Formeln bis incl. S. 19 entnommen aus /eme1969/:

$$\mathbf{x} = \ln \frac{E_2}{E_1}$$

- ξ : mittleres logarithmisches Energiedekrement
 E_1 : Neutronenenergie vor dem Stoß
 E_2 : Neutronenenergie nach dem Stoß

Ausgehend von der Anfangsenergie E_0 der Neutronen läßt sich schreiben:

$$\mathbf{x} = \ln \frac{E_0}{E_1} \cdot \frac{E_2}{E_0} = \ln \frac{E_0}{E_1} - \ln \frac{E_0}{E_2}$$

Führt man die „Neutronenlethargie“ $U = \ln \frac{E_0}{E}$ ein, so erkennt man sofort, daß ξ derjenige Wert ist, um den die Lethargie pro Stoßprozeß im Mittel zunimmt.

$$\mathbf{x} = U_1 - U_2 = \Delta U$$

- ξ : mittleres logarithmisches Energiedekrement
 U_1 : Neutronenlethargie vor dem Stoß
 U_2 : Neutronenlethargie nach dem Stoß
 ΔU : Neutronenlethargiedifferenz

Die Zahl der Stöße n , die ein Neutron beim Durchlaufen eines Lethargieintervalls ΔU erleidet, ist:

$$n = \frac{\Delta U}{\mathbf{x}}$$

Für die elastische Streuung, d.h. Streuung, die ohne Kernreaktion oder Kernanregung abläuft, gilt unabhängig von der Neutronenenergie näherungsweise

$$\mathbf{x} = \frac{2}{A + 2/3}$$

Für eine Massenzahl von $A \geq 2$ ist die Näherung sehr gut, für $A=1$ (Wasserstoff) ist $\xi=1$.

Bei der inelastischen Streuung, bei der eine Kernreaktion oder eine Kernanregung ausgelöst wird, ist ξ von der Energie und damit von U abhängig, jedoch ist diese Art der Neutronenstreuung unter 1 MeV, dem Energiebereich, in dem der überwiegende Teil der Bremsstöße erfolgt, von untergeordneter Bedeutung. Allerdings ist bei Moderatoren die inelastische Streuung der Neutronen im thermischen Bereich (siehe Seite 10) von enormer Bedeutung, da sie zu Neutronenenergieverlusten – Abbremsung – führt und nur mittels ihr die Nutzbarmachung der Neutronen möglich ist.

Der Beitrag eines einzelnen Neutrons zum zeitintegrierten, energieabhängigen Neutronenfluß ist dessen zurückgelegter Weg beim Durchlaufen eines Energieintervalls, d.h. je Stoß ist das die mittlere freie Weglänge λ - demnach $n\lambda$ - im Intervall ΔU . Bei einer Neutronenquelle, die in der Zeiteinheit Q Neutronen emittiert, erhält man den Neutronenfluß im Abbremsbereich zu:

$$\boxed{f(\Delta U) = n \cdot Q \cdot l = \frac{Q \cdot l}{x} \cdot \Delta U} \quad \text{oder} \quad \boxed{f(U) = \frac{Q \cdot l}{x}}$$

$\phi(\Delta U)$:	Neutronenfluß im Lethargieintervall ΔU
n :	Anzahl der Stöße
λ :	mittlere freie Weglänge
ξ :	mittleres logarithmisches Energiedekrement
U :	Neutronenlethargie

Die Wirksamkeit eines Moderators, d.h. wie „gut“ er moderiert, wird anhand der flächentreuen Lethargiedarstellung deutlich. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 3.5, die das Neutronenspektrum eines kalten Wasserstoff-Moderators (H_2 , $T=20K$) zeigt, einmal mit und einmal ohne Vormoderator*.

* Der Begriff „Vormoderator“ wird im Kapitel 3.2.7, Seite 30f. erläutert

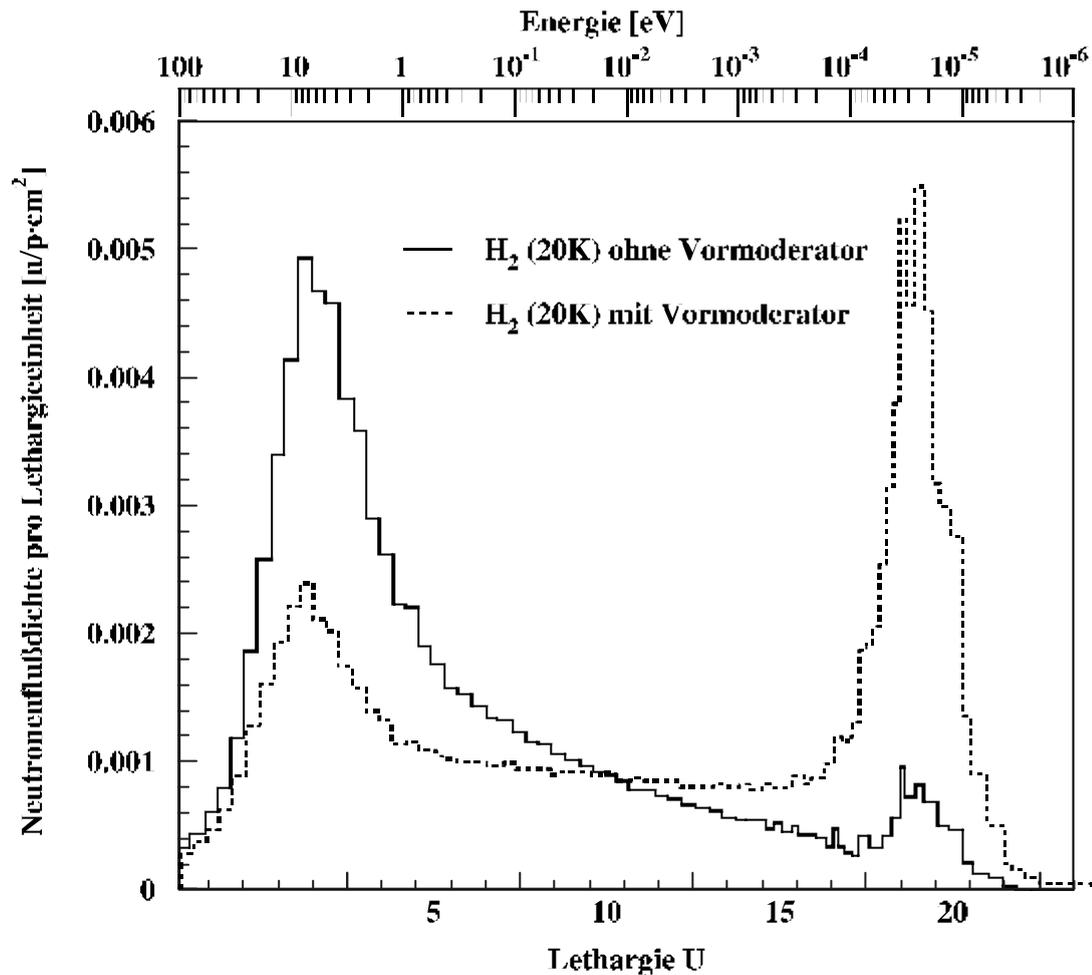


Abb. 3.5: Lethargiedarstellung von Neutronenflußdichten für einen kalten Wasserstoff-Moderator (H_2 bei $T=20K$) mit und ohne Vormoderator

Deutlich ist der Bereich der Quellneutronen (links, kleine U-Werte), der Absorptionsbereich mit $1/e$ -Verlauf (Mitte) und der thermische Bereich zu erkennen (rechts, hohe U-Werte). Die Maxima auf der linken Seite sind bei hohen Energien im MeV-Bereich (Lethargie U klein), auf der rechten Seite sind die Maxima bei niedrigen Energien im meV-Bereich (Lethargie U groß). Ist das linke Maximum hoch und das rechte klein, so sind noch viele Neutronen bei hohen Energien vorhanden \Rightarrow es liegt ein wenig effektiver Moderator vor wie in Abb. 3.5 Wasserstoff ohne Vormoderation. Der Vormoderator bewirkt beim Wasserstoff eine erhebliche Veränderung der Relation zwischen linkem und rechtem Maximum. Das Maximum bei niedrigen Energien ist wesentlich höher als das bei hohen Energien, d.h. das System Wasserstoffmoderator H_2 + Vormoderator ist ein effektiverer Moderator als ein Wasserstoffmoderator ohne Vormoderation.

Prinzipiell ist das Ziel einer Moderatorauslegung, einen möglichst hohen Anteil der erzeugten Quellneutronen in solche Neutronen umzuwandeln, die für Experimente optimal nutzbar sind. Bei einer Spallationsquelle wie der ESS sind die Auslegungskriterien für die Moderatoren aber sehr stark von den entsprechenden Anwendungen abhängig. Die verschiedenen Anwendungen und zugehörige Optimierungsziele für den Neutronenutzfluß sind:

1. *Strahlrohrexperimente mit Flugzeitmessungen*, bei denen der Spitzenfluß möglichst hoch sein soll
2. *Strahlrohrexperimente*, bei denen der zeitlich gemittelte Fluß möglichst hoch sein soll.
3. *Strahlrohrexperimente, bei denen die Streuungen höherer Ordnung durch Flugzeiteffekte getrennt und durch Messungen in bestimmten Zeitintervallen eliminiert werden.* Hierbei soll der Neutronenfluß nach Ende des Protonenpulses genügend schnell abklingen.
4. *Bestrahlungsexperimente*, die ein großes Volumen mit hohem thermischem (kalten) Fluß benötigen.

Der Neutronenpuls, der sich aus den Neutronen ergibt, die den Moderator in Richtung Strahlrohr bzw. Neutronenstreulinstrumente verlassen, setzt sich im Prinzip aus drei Komponenten zusammen:

- die Neutronen, die vom Moderator selbst abgebremst werden und diesen schnell verlassen
- die vom Moderator selbst abgebremsten Neutronen, die sich vor dem Verlassen noch einige Zeit im Moderator selbst aufhalten und
- die thermischen Neutronen, die aus dem Reflektor kommen.

Man unterscheidet aufgrund des zeitlichen Verhaltens des aus der Moderatoroberfläche kommenden Neutronenpulses zwischen *hoher Intensität* (hohe zeitintegrierte Intensität) und *hoher Auflösung* (schmale Pulsbreite und möglichst schnelles Abklingen des Neutronenpulses).

Für eine *hohe Intensität* ist es wichtig, daß der Moderator direkt von möglichst viel Reflektormaterial, also von Material, daß die Neutronen in den Moderator zurückstret und einen geringen Absorptionsquerschnitt hat. Ein solcher Moderator wird als **gekoppelt** bezeichnet. Um einen Puls zu erzeugen, der über eine *hohe Auflösung* verfügt, d.h. dessen Halbwertsbreite möglichst schmal ist, können zwei Methoden angewandt werden: Entkoppeln und Vergiften.

Beim **entkoppelten** Moderator wird der Moderator mit einem Material umgeben, daß den Moderator „neutronisch“ vom Reflektor trennt, d.h. die thermischen Neutronen aus dem Reflektor werden zurückgehalten durch ein Material mit extrem hohen thermischen Absorptionswirkungsquerschnitt. Als Entkoppler wird z.B. Kadmium oder Borkarbid verwendet (Absorptionsquerschnitte siehe Anhang E). Die Auswirkung unterschiedlicher Entkopplungsmaterialien auf die Neutronenpulsbreite wird anhand einiger Simulationsergebnisse für die japanische Spallationsquelle JPARC in Abb. 3.6 deutlich:

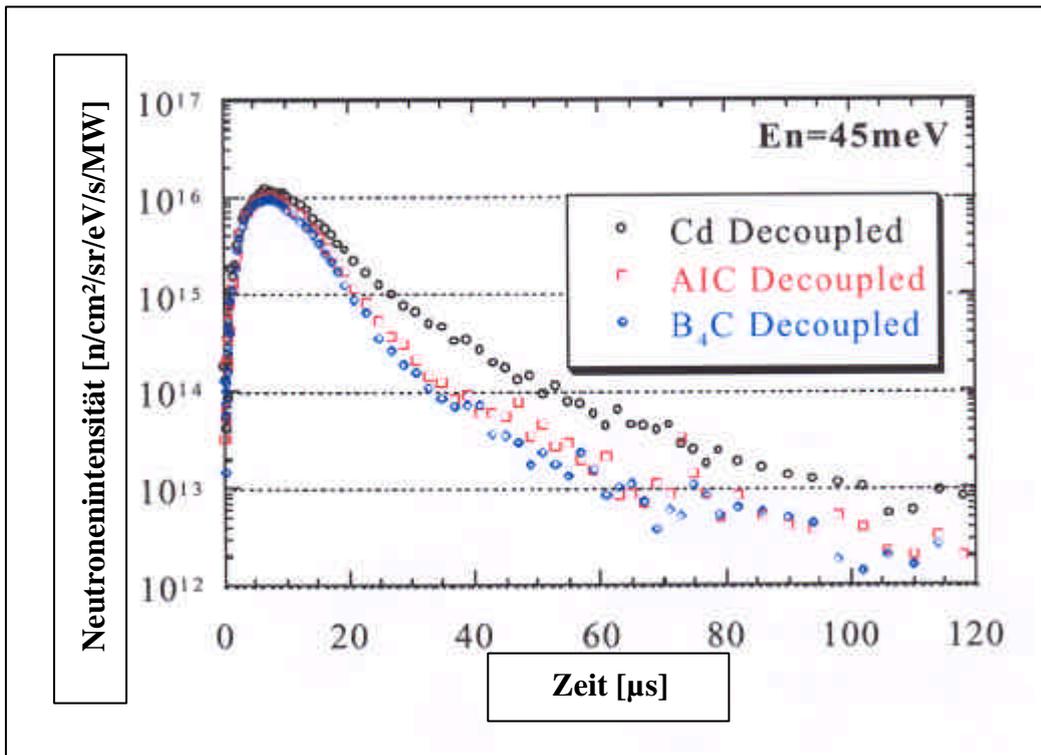


Abb. 3.6: Einfluß verschiedener Entkopplungsmaterialien auf die Pulsbreite eines entkoppelten („decoupled“) Wasserstoffmoderators bei einer Neutronenenergie von $E_n \approx 45 \text{ meV}$ /mot2001/
Die drei Materialien besitzen unterschiedliche Entkopplungsenergien E_D :
Cd: $E_D = 0.4 \text{ eV}$; AIC bzw. AgInCd: $E_D = 1 \text{ eV}$; B_4C : $E_D = 2.5 \text{ eV}$

Die Auswahl des Entkopplermaterials hängt davon ab, welcher Kompromiß zwischen maximaler Intensität und Pulsbreite gewählt wird. Aus obiger Abbildung wird deutlich, daß die Entkopplungsenergie E_D , unterhalb der die Neutronen absorbiert werden, besonders die Pulsbreite bzw. den Pulszerfall bestimmt. Diese Energie wird in den jeweiligen Absorptionsquerschnitten deutlich, wie z.B. in dem von Kadmium (siehe Anhang E) mit $E_D = 0.413 \text{ eV}$.

Die technische Realisierung ist ebenfalls ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Auswahl des Entkopplers, da die Kühlung und der Abbrand des Materials miteinbezogen werden müssen. Hierbei werden verschiedene Konzepte verfolgt: Bleche aus ^{10}B -Al sind kommerziell erhältlich und können gut gekühlt werden aufgrund der thermischen Konduktivität des Aluminiums. Außerdem können sie gleichzeitig als Teil der Moderatorhülle verwendet werden /cra1998/. Flüssige Entkopplungsmaterialien (z.B. Gadoliniumsulfate oder Borsäuren) hätten den Vorteil, daß sie leichter zu kühlen und auszuwechseln sind, jedoch verstärken sie die Komplexität des Moderatorsystems und die Leistungsinstabilität /cra1998/.

Damit zusätzlich die Lebensdauer der Neutronen im Moderator selbst begrenzt wird, werden „Vergiftungen“ direkt in den Moderatorbehälter gesetzt. Vergiftungsmaterialien - wie Gadolinium - besitzen wie die Entkopplungsmaterialien einen hohen thermischen Absorptionsquerschnitt (siehe Anhang E).

Der Wirkungsgrad der Vergiftung hängt entscheidend davon ab, in welcher Position sich das Vergiftungsmaterial befindet. Abb. 3.7 zeigt die Berechnung des thermischen Neutronenstroms aus der Oberfläche eines entkoppelten Wassermoderators. W ist die Dicke des Moderators (im Beispiel: 5cm). Die einzelnen Kurven gelten für Gadoliniumbleche in unterschiedlichen Abständen zu der betrachteten Moderatorfläche ($W/2=2.5\text{cm}$, $W/4=1.25\text{cm}$, $W/8=0.625\text{cm}$). Der stärkste Einfluß der Vergiftung ist zu sehen, wenn das Gadoliniumblech nahe an der Moderatoroberfläche sitzt (Abstand: $W/8=0.625\text{cm}$).

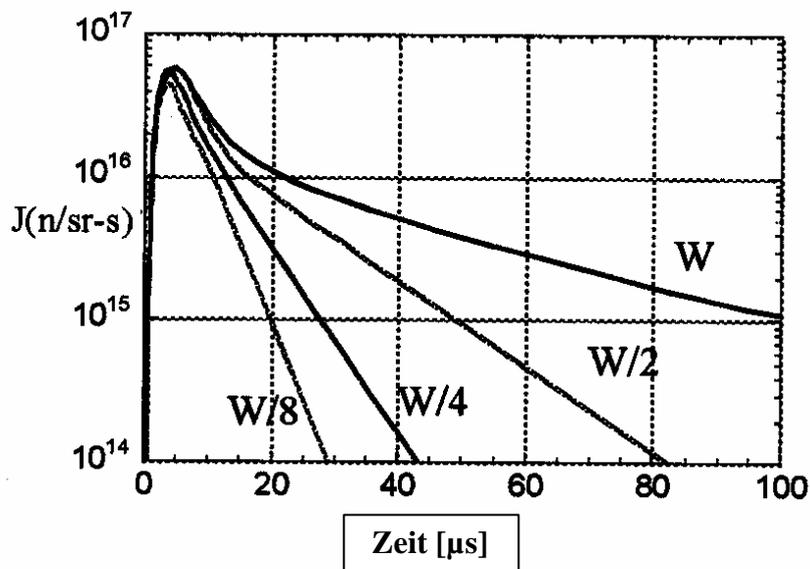


Abb. 3.7: Einfluß der Position des Vergiftungsbleches auf die Neutronenpulsbreite der Neutronenstromdichte J [$\text{n/sr}\cdot\text{s}$] eines entkoppelten, vergifteten Wassermoderator für ein Wellenlängenintervall von $0.6-1\text{\AA}$, W = Moderatordicke, Position = Abstand Vergiftungsblech zur betrachteten Moderatorfläche als Bruchteil der Moderatordicke /gab1998/

Die Anforderungen an ein effektives Moderatormaterial sind folgende /bau1998/:

- hohe Wasserstoffteilchendichte für eine kleine mittlere freie Weglänge zwischen zwei Wechselwirkungen
- ein hoher Streuwirkungsquerschnitt σ_B für eine große Wechselwirkungswahrscheinlichkeit
- kleiner Neutronenabsorptionswirkungsquerschnitt σ_A
- der Energietransfer pro Wechselwirkung (ξ) soll hoch sein
- geeignete Anregungsmechanismen im meV-Bereich
- die Wärmeabfuhr soll möglichst auch bei niedrigen Temperaturen effizient sein
- chemische Stabilität unter radioaktiver Bestrahlung

Eine Übersicht wichtiger Eigenschaften verschiedener Moderatormaterialien ist in den Tabellen 3.2a und 3.2b gegeben, unterteilt nach Elementen wie H und Verbindungen wie H_2O :

	Elemente							
	H	D	Be	C	O	Fe	Hg	Pb
Massenzahl A [g/mol]	1	2	9.01	12.01	16	55.85	200.6	207.19
Dichte r [g/cm ³]	0.07	0.163	1.85	2.3	1.13	7.9	13.55	11.3
Teilchenzahldichte N [Teilchen/cm ³]	0.042	0.049	0.124	0.115	0.16	0.96	1.08	0.36
S _F [barn]	20.51	3.4	6.18	4.73	3.75	11.21	26.53	11.01
S _B [barn]	82.02	7.64	7.63	5.551	4.232	11.62	26.8	11.118
S _{Inc} [barn]	80.27	2.05	0.0018	0.001	0.008	0.4	6.6	0.003
S _A [barn]	0.3326	0.0005	0.0076	0.0035	0.0002	2.56	372.3	0.171
S [barn]	0.86	0.17	0.76	0.55	0.6	10.76	28.65	3.96
x	1.000	0.725	0.206	0.158	0.120	0.035	0.010	0.010
Mittlere Bremslänge [cm]	3.47	21.37	13.58	24.51	108.83	59.86	187.06	576.49

Tabelle 3.2a: Moderationseigenschaften verschiedener Materialien - Elemente /bau1998/

	Verbindungen		
	H ₂ O	CH ₄	D ₂ O
Massenzahl A [g/mol]	18	16	20
Dichte r [g/cm ³]	1	0.453	1.1
Teilchenzahldichte N [Teilchen/cm ³]	0.033	0.017	0.033
S _F [barn]	44.8	86.8	10.5
S _B [barn]	168.3	333.6	19.5
S _{Inc} [barn]	160.5	321.1	4.1
S _A [barn]	0.665	1.334	0.001
S [barn]	1.50	1.48	0.35
x	0.926	0.951	0.510
Mittlere Bremslänge [cm]	2.11	2.09	13.51

σ_F : freier Streuwirkungsquerschnitt

σ_B : gebundener Streuwirkungsquerschnitt

σ_{Inc} : Wirkungsquerschnitt für inkohärente Streuung

σ_A : Absorptionswirkungsquerschnitt

Σ : makroskopischer Wirkungsquerschnitt
 $\Sigma = \sigma_F \cdot N$

ξ : logarithmisches Energiedekrement, gibt die mittlere Energieabgabe des Neutrons für einen Stoßprozess an (siehe Kap. 3.2.2, S. 17 ff.)

Tabelle 3.2b: Moderationseigenschaften verschiedener Moderatormaterialien - Verbindungen /bau1998/

3.2.3 Die Moderatormaterialien Wasser (H₂O) und schweres Wasser (D₂O) bei einer Temperatur von T=300K

Wasser (H₂O) und schweres Wasser (D₂O) werden als Moderatormaterial vorwiegend in der Reaktortechnik verwendet. Die Moderationseigenschaften sind genau bekannt und durch die langjährige Erfahrung ist die technische Handhabung von Wasser bzw. schwerem Wasser als Moderatormaterial insbesondere bezüglich der Radiolyse als sehr erprobt und sicher anzusehen.

	H ₂ O	D ₂ O
hohe Dichte für große Wechselwirkungswahrscheinlichkeit	ja	ja
hoher Streuwirkungsquerschnitt	ja	nein
kleiner Absorptionswirkungsquerschnitt	ja	ja
Energietransfer pro Wechselwirkung hoch	ja	ja
geeignete Anregungsmechanismen	ja	ja
Wärmeabfuhr effizient	ja	ja
chemische Stabilität unter Bestrahlung	Radiolyse	Radiolyse

Tabelle 3.3: Moderationseigenschaften von Wasser (H₂O) und schwerem Wasser (D₂O) bei einer Temperatur von T=300 K

H₂O ist ein fast komplett inkohärent streuendes Material, wohingegen D₂O ein nahezu kohärenter Streuer ist. Wasser hat im Vergleich zu schwerem Wasser einen höheren Streuwirkungsquerschnitt und einen höheren Absorptionsquerschnitt (siehe Anhang B1). Deswegen muss ein Wassermoderator für gepulste Anwendungen ein möglichst kleines Volumen von ca. 1-2 l haben. Das Volumen eines D₂O-Moderators sollte hingegen möglichst groß dimensioniert werden wegen der großen Bremslänge (siehe Tabelle 3.2, Seite 24).

Die Struktur von Wasser und schwerem Wasser wird aus Molekülen gebildet, die über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verknüpft sind. Die thermischen Neutronen wirken größtenteils nicht mit den einzelnen Atomkernen des Moleküls, sondern sehen es als einen Verband an, der Schwingungen ausführen kann /kei1973/. Die Streudynamik dieses Verbundes ist deshalb für eine Beschreibung der thermischen Streuung besonders wichtig. Die heutigen, mathematischen Beschreibungen der Streufunktion für Wasser und schwerem Wasser sind Erweiterungen des Nelkinmodells /nel1960/. Eine detaillierte Beschreibung der Modelle findet sich in /mcf1994/.

3.2.4 Die Moderatormaterialien Wasserstoff (H₂) und Deuterium (D₂) bei einer Temperatur von 20K

Wasserstoff (H₂) und Deuterium (D₂) werden bei 20 K im flüssigen Zustand als sogenannte „kalte“ Moderatoren verwendet. Ein großer Vorteil von Wasserstoff und Deuterium ist die chemische Stabilität unter radioaktiver Bestrahlung. Nachteile sind die geringen Teilchenzahldichten und der weite Zündbereich, so daß bei der Verwendung von Wasserstoff als Moderatormaterial eine hohe Explosionsgefährdung gegeben ist.

	H ₂	D ₂
hohe Dichte für eine große Wechselwirkungswahrscheinlichkeit	nein	nein
hoher Streuwirkungsquerschnitt	ja	nein
kleiner Absorptionswirkungsquerschnitt	nein	ja
Energietransfer pro Wechselwirkung hoch	ja	ja
geeignete Anregungsmechanismen	nein	nein
Wärmeabfuhr effizient	ja	ja
chemische Stabilität unter radioaktiver Bestrahlung	ja	ja

Tabelle 3.4: Moderationseigenschaften von Wasserstoff (H₂) und Deuterium (D₂) bei einer Temperatur von T=20 K

Der Absorptionswirkungsquerschnitt von Wasserstoff ist im Vergleich zum Streuquerschnitt ($\sigma_T - \sigma_A$) sehr gering (siehe Anhang C1). Thermische Neutronenstreuquerschnitte liegen für H₂ und D₂ bei T=20K aufgrund des flüssigen Zustands nur für die inelastische Streuung vor (siehe Anhang C2).

Es gibt zwei verschiedene Spinzustände in H- bzw. D-Atomen: ortho und para. Im ortho-Zustand sind die Spins parallel zueinander ausgerichtet; im para-Zustand antiparallel. Bei Raumtemperatur liegt der „normale“, gasförmige Wasserstoff mit einem ortho-Anteil von 75% und einem para-Anteil von 25 % vor. Deuterium existiert bei Raumtemperatur zu 2/3 im Orthozustand und zu 1/3 im Parazustand /ber1989/.

Bei einer Temperatur von 20 K, bei der die kalten Moderatoren betrieben werden, ist im thermischen Gleichgewicht über 99% para-H₂ bzw. über 99% ortho-D₂ vorhanden. Sowohl mit Wasserstoff als auch mit Deuterium ist kein ideales thermisches Gleichgewicht für die Neutronenstromdichten zu erzielen, weil die Energieaustauschprozesse für sehr langsame Neutronen behindert werden und demzufolge mehr schnelle als langsame Neutronen aus der Moderatoroberfläche emittiert werden. Dies führt dann zur Verschiebung des Maximums hin zu höheren Energien und nur einer angenäherten Form einer Maxwellverteilung. Flüssiger para-Wasserstoff hat beispielsweise sein Maximum im Neutronenspektrum bei $E_n \approx 4$ meV (T=48 K) statt bei $E_n = 1,6$ meV, was einer Temperatur von T=20 K entspricht.

Auch die Spinumklappung von Ortho- zu Para-Zuständen und umgekehrt hat zur Folge, daß sich kein Maxwellspektrum einstellen kann /gur1968/. Eine solche Spinumklappung kann unter Bestrahlung erfolgen oder durch Katalysatoren. Gleichzeitig findet eine Rekombination der im Strahlenfeld erzeugten Wasserstoff- bzw. Deuterium- und Sauerstoffionen statt.

Anhand der Streuwirkungsquerschnitte für die beiden Spinzustände von Wasserstoff und Deuterium (Anhang C2) wird deutlich, warum das ortho/para-Verhältnis für die Neutronenintensitäten bedeutsam ist. Im Bereich kalter Neutronen mit Energien von einigen meV existiert eine Differenz der entsprechenden Wirkungsquerschnitte von bis zu zwei Größenordnungen.

Bislang läßt sich das Mischungsverhältnis von ortho- zu para-Wasserstoff in einem Moderator nur anhand des sich ergebenden Neutronenspektrums bestimmen. Es werden zurzeit verschiedene Möglichkeiten diskutiert, diese Verhältnisse direkt im Moderator zu messen und zu steuern. Die Simulationsergebnisse in Kapitel 6 zeigen den Einfluß verschiedener ortho-/para-Verhältnisse auf die Neutronenintensitäten von verschiedenen Wasserstoffmoderatoren in der ESS.

Die Streuung langsamer Neutronen an molekularen Gasen ist von Sachs und Teller in /sat1941/ beschrieben worden. Das Streumodell für flüssigen Wasserstoff basiert auf dem Modell von Young und Koppel /you1964/, das für gasförmigen Wasserstoff entwickelt wurde. Die H₂- und D₂-Moleküle sind aus je zwei Atomen aufgebaut und besitzen somit sechs Freiheitsgrade: drei der Translation, zwei der Rotation und einen der Vibration.

Das Young-Koppel-Modell beinhaltet Spinkorrelationen, Rotationen und Vibrationen des Moleküls, wobei freie Translationen für das Molekül angenommen wurden. Nach neueren Erkenntnissen ist für flüssigen Wasserstoff die Annahme der freien Translationen nicht richtig /ber1989/. Die Translationen werden im aktuellen Modell als behindert angesehen und mittels einer Frequenzverteilung beschrieben; die Rotation wird als freie Rotation eines einzelnen Moleküls betrachtet. Zwischen den H₂-Molekülen wirken Van-der-Waals-Kräfte /ber1989/, deshalb können Wasserstoffmoleküle weder freie Rotationen noch freie Translationen ausführen. In gegenwärtigen Streumodellen wird Wasserstoff als „Cluster“ betrachtet, bei dem ein Wasserstoffmolekül in einer Gruppe von 20 Molekülen gebunden ist. Dieser „Cluster“ durchläuft Vibrationen ähnlich denen eines Wasserstoffmoleküls in einem Feststoff. Sie behindern die Translationsbewegungen.

Die hier im Zusammenhang mit MCNPX verwendeten thermischen Streudaten für flüssigen Wasserstoff bei T=20 K basieren auf der Beschreibung der Neutron-Kern Streudynamik von Bernnat et al. /ber1989/. Sie beinhaltet die innermolekulare Wechselwirkung und die zwischenmolekulare Wechselwirkung. Da Wasserstoff bei T=20 K als Flüssigkeit vorliegt, wurden zusätzlich zum Young-Koppel-Modell Diffusionsbewegungen und harmonische Gitterschwingungen wie in einem Festkörper eingefügt. Das Streumodell für Deuterium ist ähnlich aufgebaut wie das für Wasserstoff. Es basiert ebenfalls auf der Beschreibung von Bernnat /ber1989/. In die Entwicklung des Modells sind Messdaten von relevanten Streuquerschnitten /sei1970/ miteingeflossen.

3.2.5 Das Moderatormaterial Methan (CH_4) bei einer Temperatur von 100 K (flüssig) und bei einer Temperatur von 20 K (fest)

Methan ist ein Moderatormaterial, daß sowohl im flüssigen Zustand bei 100 K als thermischer Moderator und im festen Zustand bei 20 K als kalter Moderator verwendet wird.

	100K	20K
hohe Dichte für eine große Wechselwirkungswahrscheinlichkeit	ja	ja
hoher Streuwirkungsquerschnitt	ja	ja
kleiner Absorptionswirkungsquerschnitt	ja	ja
Energietransfer pro Wechselwirkung hoch	ja	ja
geeignete Anregungsmechanismen	ja	ja
Wärmeabfuhr effizient	ja	nein
chemische Stabilität unter radioaktiver Bestrahlung	nein	nein

Tabelle 3.5: Moderationseigenschaften von Methan (CH_4) bei einer Temperatur von 100 K (flüssig) und bei einer Temperatur von 20K (fest)

Hervorzuheben sind die hohe Wasserstoffdichte in Methan und niedrigliegende Anregungsmechanismen, die im Vergleich zu H_2 bei 20 K eine viel effektivere Thermalisierung im meV-Energiebereich erlauben. Diese ist auf die Anregung von Rotationsniveaus zurückzuführen, die im Methanmolekül fast frei durchgeführt werden.

Flüssiges Methan zeigt denselben Streuwirkungsquerschnittverlauf (siehe Anhang D) im thermischen Bereich wie viele wasserstoffhaltige Materialien, d.h. er steigt monoton mit sinkender Neutronenenergie. Bei festem Methan liegt zudem elastische Streuung mit einem ähnlichen Verlauf wie Polyethylen (siehe Anhang F2) vor.

Das größte Problem bei der Verwendung von Methan – sowohl flüssig als auch fest – ist die chemische Instabilität unter Bestrahlung. Durch Radiolyse entstehen Polymere, die sich im Moderatorbehälter absetzen. Diese Polymere verändern im Verlauf der Bestrahlung die Neutronenausbeute. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 3.8, in dem die gemessenen Neutronenzählraten zu Beginn und nach Ende der Bestrahlung eines Flüssigmethanmoderators der Spallationsquelle ISIS (siehe dazu Kapitel 7.1) zu sehen sind:

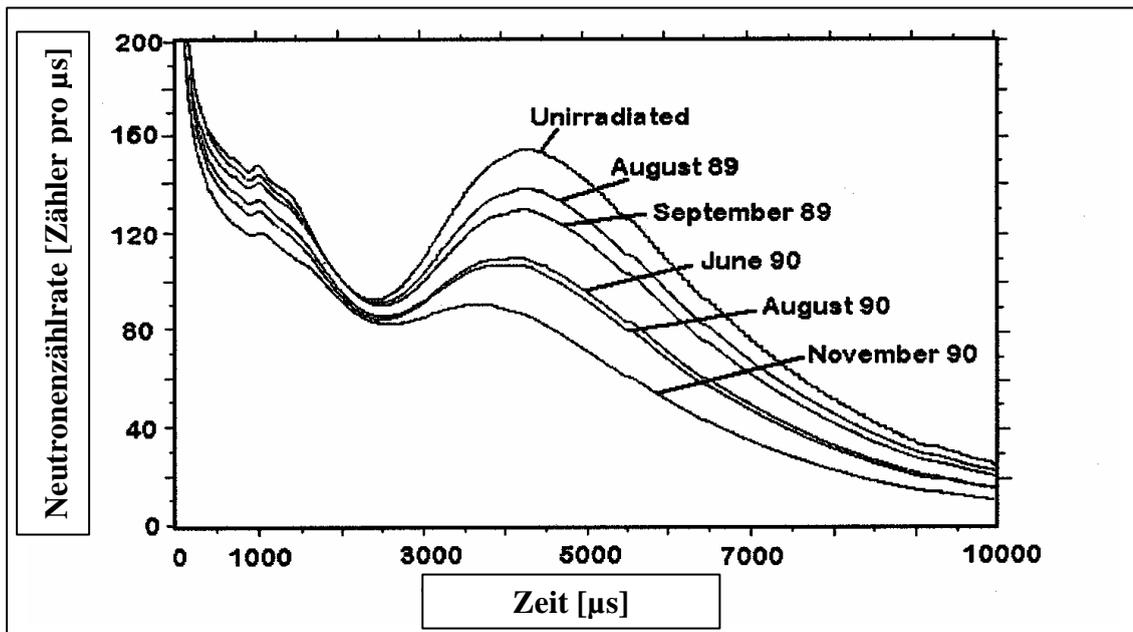


Abb. 3.8: Gemessene Neutronenzählraten vom ISIS-Moderator mit flüssigem Methan (100K) vor (unirradiated) und während Bestrahlung /bru1998/; die Anzahl langsamer Neutronen, deren Flugzeit etwa 4500 μs beträgt, nahm während der Bestrahlung laufend ab und erreichte im November 90 nur noch etwas mehr als die Hälfte wie zu Beginn der Bestrahlung

Außer der Polymerisation unter Bestrahlung tritt bei festem Methan auch noch ein weiteres Phänomen auf, das sogenannte „burping“. Von Methanmolekülen werden durch schnelle Neutronen und Rückstoßprotonen einzelne Wasserstoffatome herausgelöst, die sich zu Wasserstoffgas formieren, das in das Umgebungsmaterial diffundiert. Die verbleibenden Methylradikale formieren sich, wenn sie nahe genug aneinander kommen, zu Paaren, z.B. zu Ethan, und setzen dabei Wärme frei. Dieses Freisetzen erfolgt mitunter lawinenartig und wird als „burping“-Phänomen bezeichnet. Das schnelle Freisetzen von Energien in Höhe von 336 kJ/mol stellt ein Sicherheitsproblem dar /sha1998/.

Ein Material mit ähnlichen Eigenschaften wie Methan jedoch mit einer größeren radiochemischen Stabilität ist Methanhydrat (Methan in einem Käfig aus Wasserstoffmolekülen). Es erzeugt ein breites Neutronenenergiespektrum im kalten Bereich. Erste experimentelle Ergebnisse finden sich in /nün2003/.

3.2.6 Alternative Moderatormaterialien

Bei der Suche nach neuen, geeigneten Moderatormaterialien stößt man unter diesen zwei Gesichtspunkten auf Kohlenwasserstoffe. Dabei sind vor allem organische Komponenten im Blickpunkt /cse1998/, da sie ähnliche Siedepunkte und Schmelzpunkte wie Wasser besitzen. Lange Kohlenwasserstoffketten oder eine hohe Anzahl aliphatischer Kohlenwasserstoffe an Benzolringen steigern die Wasserstoffteilchendichte. Jedoch erfordert die radiochemische Stabilität eine möglichst geringe Anzahl möglichst kurzer Ketten, so daß ein bestmöglicher Kompromiß gefunden werden muß.

Ein effektives organisches Moderatormaterial muß zwei Bedingungen erfüllen: 1. Soviel Wasserstoffgehalt pro Volumen wie möglich für eine effektive Abbremsung und Moderation der Neutronen. 2. Eine hohe radiochemische Stabilität.

Ein möglicher Kandidat für einen thermischen Moderator ist 1,3,5-Trimethylbenzen (Mesithylen), da es eine hohe Wasserstoffteilchendichte (nahezu dieselbe wie Methan) und drei kurze aliphatische Ketten - die Methylgruppen – besitzt. Diese liegen weit genug auseinander, um die Rotationsfreiheit der Methanmoleküle nicht zu sehr zu beeinträchtigen, die wichtig ist für eine effektive Neutronenabbremung. Mesithylen ist bei Raumtemperatur flüssig (Siedepunkt: 437 K) und hat einen hohen Zündpunkt (823 K).

Unter Gammabestahlung hat sich gezeigt, daß Mesithylen fast eine Größenordnung stabiler ist als Methan, jedoch ist nichts über die Radiolyseeffekte bei Neutronenbestrahlung bekannt. Bislang sind nur an zwei Quellen Mesithylenmoderatoren eingesetzt worden: An der Kyoto-University /uts1977/ und im Cornell 500 kW TRIGA-Reaktor /ünl1995/. Diese beiden Quellen haben jedoch nur geringe Intensitäten, deshalb können deren Ergebnisse nicht auf hochintensive Spallationsquellen übertragen werden. Untersuchungen über die Eignung von Mesithylen als Neutronenmoderator von Spallationsquellen laufen derzeit.

Ein Material mit ähnlichen Eigenschaften wie Methan jedoch mit einer größeren radiochemischen Stabilität ist Methanhydrat (Methan in einem Käfig aus Wasserstoffmolekülen). Es erzeugt ein breites Neutronenenergiespektrum im kalten Bereich. Erste experimentelle Ergebnisse finden sich in /poh2003/.

Unterhalb von 20 K sind alle organischen Materialien fest, deshalb muß bei diesen Temperaturen nach Kandidaten für kalte Moderatoren gesucht werden, welche die Neutronen allein durch Rotationsanregung thermalisieren können /gab1998/. Materialien, die ähnlich viele Anregungsmechanismen bei kleinen Energien haben wie Methan sind Krypton in festem Methan oder Metallhexamine wie $\text{Ca}(\text{NH}_3)_6$. Da letzteres metallisch ist, ist die Wärmeabfuhr und Kühlung effizienter. Die Wasserstoffteilchendichte ist größer als beim Methan. Die radiochemische Stabilität und die Wirkung des hohen Absorptionswirkungsquerschnitts von Stickstoff auf den Neutronenfluß aus dem Moderator sind bislang noch nicht experimentell untersucht worden /gab1998/.

3.2.7 Vormoderatoren(Premoderatoren)

Die Neutronenintensitäten eines H_2 -Moderators können im Bereich niedriger Energien (meV-Bereich) durch den Einsatz sogenannter Vormoderatoren oder auch Premoderatoren gesteigert werden. Diese werden zwischen dem Reflektor und dem Moderator angebracht und bremsen Neutronen auf thermische Energien ab, die dann vormodert in den kalten Moderator gelangen, dort weiter abgebremst werden und so zu einer höheren Ausbeute an kalten Neutronen beitragen.

Als Materialien für einen Vormoderator wurden Zirkoniumhydrid, Wasser und Polyethylen getestet /ogw1999/. Einen Überblick über die thermischen Streuwirkungsquerschnitte dieser Materialien ist im Anhang (F1 und F2) gegeben. Bei hochintensiven Spallationsquellen wird Wasser als Vormoderatormaterial bevorzugt. Die optimale Schichtdicke eines Wasser-Vormoderators (Schicht zwischen Reflektor und eigentlichem Moderator) liegt zwischen 2-3 cm bei einer Wasserstoffmoderatordicke von 5-10cm /ogw1999/.

In Abb. 3.9 ist der Einfluß eines Vormoderators auf Neutronenflussdichte und Wärmeentwicklung eines Wasserstoff-Moderator (20K) dargestellt. Ohne Vormoderator ergeben sich 100%, d.h. ein Ratio von 1.

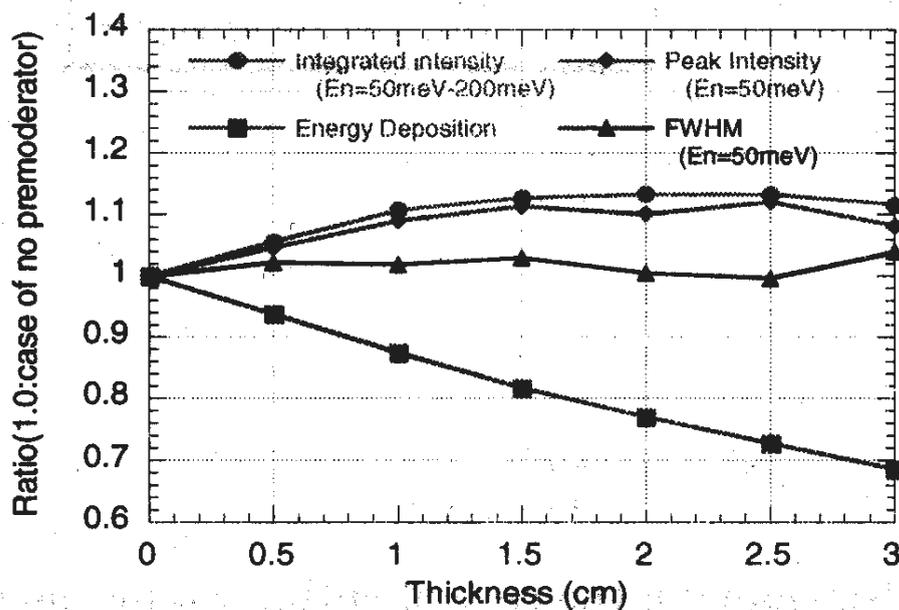


Abb. 3.9: Einfluß der Vormoderatordicke (thickness) auf die integrierte Intensität (integrated intensity, große Punkte), Spitzenintensität (Peak intensity, kleine Punkte), Energiedeposition (Energy deposition, Quadrate) und Pulsbreite (FWHM, Dreiecke) eines H_2 -Moderators /har2000/. Das Ratio bezeichnet das Verhältnis von Ergebnissen eines Wasserstoffmoderators mit zu denen ohne Vormoderator (Ratio=1). Besonders die Energiedeposition wird durch einen Vormoderator erheblich gesenkt.

Sowohl die integrierte (integrated intensity) als auch die Spitzenintensität (Peak intensity) eines Wasserstoffmoderators nehmen im Beispiel durch einen Vormoderator um ca. 10% zu. Die Pulsbreite in FWHM bleibt dabei fast gleich. Ein Vormoderator sorgt für eine geringere Wärmedeposition (Energy deposition) im kalten Moderator von bis zu 30%. Dadurch wird eine effektivere Kühlung des kalten Moderators erreicht und dafür aufzuwendende Kosten werden gesenkt /cha1998/.

Die Verwendung und Auslegung eines Vormoderators, besonders in Bezug auf die Dicke, hängt auch vom verwendeten Moderator material ab. So kann ein Vormoderator bestimmter Dicke für einen Wasserstoffmoderator zur Intensitätssteigerung führen, jedoch erfordert der Einsatz eines Vormoderators bei einem Methanmoderator eine erneute Dickenoptimierung (siehe dazu Kap. 6.2, S. 77 ff.).

3.3 Reflektoren für Spallationsquellen

Der Reflektor einer Spallationsneutronenquelle kann vier verschiedene Funktionen übernehmen:

1. generell: thermische Neutronen in den Moderator zurückzustreuen
2. schnelle Neutronen zur weiteren Moderation in den Moderator zu streuen
3. selber Neutronen zu thermalisieren und in den Moderator zu reflektieren (thermischer Reflektor)
4. als Teil der Hochenergieneutronenabschirmung der Target-Moderator-Anordnung wirken /rus2001/

Die Streu- und Absorptionswirkungsquerschnitte der für Spallationsquellen wichtigsten Reflektormaterialien D₂O, Beryllium, Blei und Graphit sind im Anhang zusammengestellt (siehe Anhang G1 und G2).

Thermische Reflektormaterialien sind z.B. D₂O und Beryllium. Beryllium kann auch die zweite Funktion erfüllen und wird deshalb oft in gepulsten Spallationsquellen eingesetzt, insbesondere wenn bei entkoppelten Wasserstoffmoderatoren ohne Vormoderator gleichzeitig eine hohe Intensität erreicht werden soll. Graphit - in der Reaktortechnik gebräuchliches Moderator/Reflektormaterial - ist ebenfalls ein thermalisierendes Reflektormaterial, das jedoch für die zweite Funktion aufgrund des relativ geringen totalen Wirkungsquerschnitts weniger effektiv ist als Beryllium.

Das für die ESS favorisierte Reflektormaterial ist Blei mit D₂O-Kühlung. Blei wirkt als schneller Reflektor und liefert Neutronenpulse mit einer schnellen Abklingzeit, demnach mit hoher Auflösung.

4. Die Europäische Spallations Neutronenquelle ESS (European Spallation Source)

Die europäische Spallationsquelle ESS (European Spallation Source) ist eine gepulste Spallationsneutronenquelle.

Die für eine Spallations-Neutronenquelle günstige Protonenenergie liegt zwischen 800 und 1500 MeV und kann durch Beschleunigung von Protonen in einem Linearbeschleuniger erreicht werden. Vom Linearbeschleuniger gelangen die Protonen entweder direkt in die sogenannte Langpulstargetstation oder werden in einem Kompressorring in Pulsen von weniger als einer Mikrosekunde komprimiert. Diese kurzen und hoch verdichteten Protonenpulse werden dann auf das Kurzpulstarget gelenkt.

In einem Target können also im gleichmäßigen Rhythmus Neutronen freigesetzt werden. Da bei vielen Neutronenstreuexperimenten ohnehin die Flugzeit zur Energieanalyse der Neutronen benutzt wird, bildet eine solche gepulste Neutronenquelle dafür eine gute Voraussetzung. Sie erlaubt prinzipiell höhere Maximalflüsse als eine kontinuierliche Quelle.

Da Forschungsreaktoren in der Regel kontinuierlich betrieben werden und ihre Neutronenausbeute an technische Grenzen stößt (der Hochflußreaktor HFR – Grenoble liefert einen mittleren Neutronenfluß von ca. $\phi_{\text{therm}} = 1 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$), sind gepulste Spallationsquellen mit Spitzenflüssen bis zu $\phi_{\text{therm}} \sim 10^{17} \text{ n/cm}^2\text{s}$ die Zukunft für die Neutronenstreuung. Zurzeit sind drei gepulste Quellen der MW-Klasse im Bau oder projektiert:

- SNS - Spallation Neutron Source (US-amerikanisches Projekt im Bau, siehe Kap. 8.2)
- J-PARC - Japan Proton Accelerator Research Complex (japanisches Projekt im Bau, siehe Kap. 8.3)
- ESS - European Spallation Source (europäisches Projekt)

4.1 Das ESS Konzept

Die ESS wird als beschleunigerbetriebene gepulste Anlage mit einer Targetstation im Kurzpulsbetrieb (SPTS) und einer Targetstation im Langpulsbetrieb (LPTS) geplant. Hauptziel der ESS ist es, eine Quelle mit hoher Intensität für die Neutronenforschung und Neutronenstreuung zu entwickeln, um Europa als führenden Standort der Neutronenforschung zu erhalten und weiter auszubauen.

Die wichtigsten Parameter der beiden Targetstationen sind in nachfolgender Tabelle 4.1 zusammengefasst /ESS2002/:

AUSLEGUNGSPARAMETER	TARGETSTATION	
	SPTS	LPTS
Protonenstrahlleistung	5MW	5W
Protonenenergie	1.334GeV	1.334GeV
Protonenpulsdauer	1.4 μ s	2.0 ms
Energie eines Protonenpulses	100 kJ	300 kJ
Protonenpulsfrequenz	50 Hz	16.667 Hz
Protonenstrahlprofil am Target (elliptische oder parabolische Dichteverteilung)	6x 20 cm ²	6x 20 cm ²
Targettyp	Flüssiges Hg Horizontaler Einschuß	Flüssiges Hg Horizontaler Einschuß
Anzahl Moderatoren	2-4	2-4
Erwarteter mittlerer thermischer Fluß im H ₂ O-Moderator	3.1 x 10 ¹⁴ n/cm ² s	3.1 x 10 ¹⁴ n/cm ² s
Erwarteter thermischer Spitzenfluß im H ₂ O-Moderator	1.3 x 10 ¹⁷ n/cm ² s	1.0 x 10 ¹⁶ n/cm ² s
Abklingzeit des Flusses	150 μ s	150 μ s

Tabelle 4.1: Geplante Auslegungsparameter der ESS-Anlage für die Kurzpulstargetstation (SPTS) und für die Langpulstargetstation (LPTS)

Details zur ESS-Anlage sind in den Referenzen /ess1996/ und /ESS2002/ zu finden. Ein Schema der Anlage mit den wichtigsten Komponenten ist in Abb. 4.1 zu sehen.

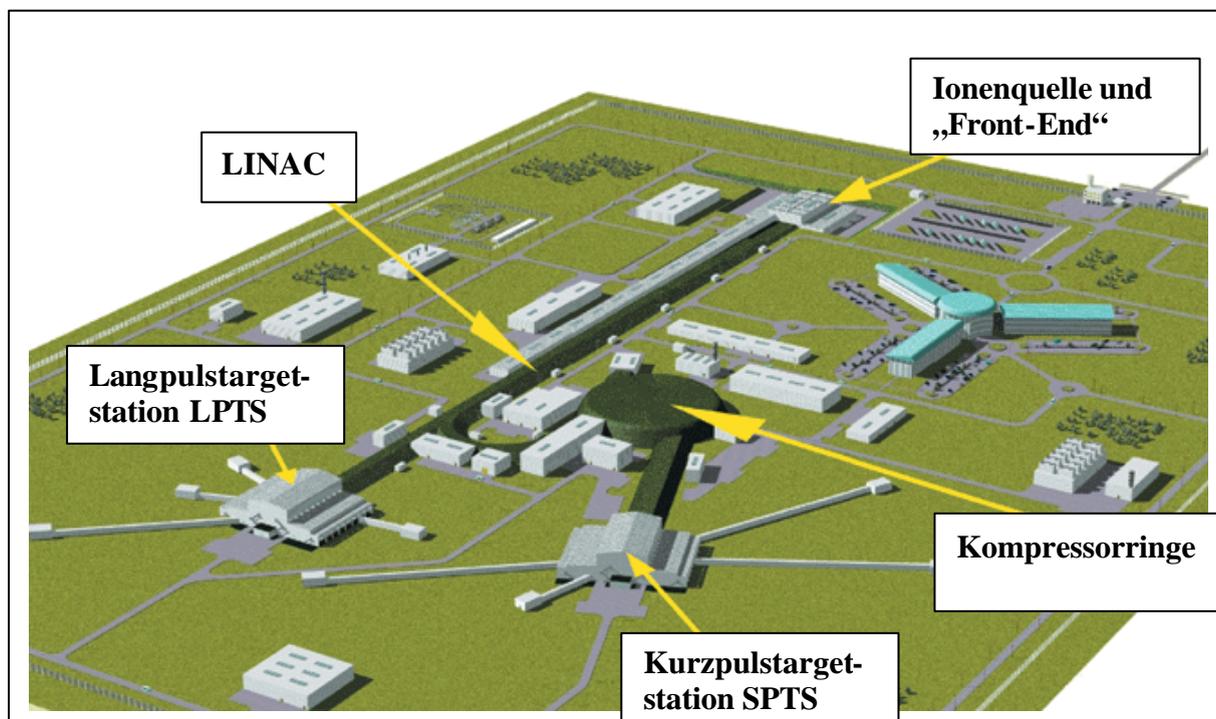


Abb. 4.1: Schema der ESS-Anlage /ess2002/

Mittels der Ionenquellen werden zwei H⁻-Ionenstrahlen erzeugt, die mit Hilfe eines Linearbeschleunigers (Linac) auf eine Endenergie von 1.334 GeV beschleunigt werden. Ein Protonenstrahl mit 5MW Leistung und einer Pulslänge von 2ms wird direkt zur Langpulstargetstation (LPTS) geführt, der andere wird über Kompressorringe in die Kurzpulstargetstation (SPTS) geleitet mit einer Pulsdauer von insgesamt 1.4 µs und ebenfalls 5MW Protonenstrahlleistung..

4.2 Ionenquellen, Linac, Kompressorringe der ESS-Anlage

Die *Ionenquellen* liefern je nach Konzept H⁻-oder H⁺-Ionen, die für die beiden Targetstationen separat zusammengeführt werden; im *Linac* bzw. in den *Kompressorringen* werden für die SPTS und die LPTS jeweils 5MW Protonenstrahlleistung zur Verfügung gestellt. Nach der Beschleunigung beträgt die Endenergie 1.334 GeV. Sie ist ein Kompromiß zwischen hoher Neutronenausbeute und minimalen Verlusten während der Injektion in die Kompressorringe, die für die SPTS notwendig sind /ess1996/.

Die SPTS-Targetstation ist für kurze, scharfe Neutronenpulse mit möglichst hoher Intensität geplant. Deshalb ist eine kurze Protonenpulsdauer von 1.4 µs wichtig. Die Pulsfrequenz ist 50 Hz. Der mittlere Protonenstrom beträgt für beide 3,75 mA, was einer Leistung von 5MW entspricht. Aus technischen Gründen ist eine kurze Pulsdauer bei hoher Protonenzahl wie bei der SPTS nur möglich, indem der Strahl nach der Beschleunigung in zwei Kompressorringen komprimiert wird.

Die maximale Anzahl von Teilchen, die in einem einzigen Ring gespeichert werden kann, beträgt rund $2 \cdot 10^{14}$, so daß man nur mit zwei Ringen auf die geforderte Gesamtprotonenzahl $4.68 \cdot 10^{14}$ Protonen pro Puls kommt.

Werden für die LPTS-Station H⁻-Ionen statt H⁺-Ionen verwendet, müssen die H⁻-Ionen über eine Umladefolie auf H⁺-Ionen gestrippt werden. Der Protonenstrahl trifft danach mit einer Frequenz von 16,667 Hz und einer Dauer von 2 ms auf das Langpulstarget. Die Protonenzahl beträgt pro *langem* Puls $1.404 \cdot 10^{15}$ Protonen, der Protonenstrom 3.75 mA.

Für den Linearbeschleuniger ist eine supraleitende Version geplant.

4.3 Allgemeines zu den Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen der ESS

Der neutronenerzeugende Teil einer Spallationsneutronenquelle ist die Target-Moderator-Reflektor-Anordnung. Ein prinzipieller Aufbau einer ESS-Anordnung mit vier Moderatoren in Winggeometrie ist in Abb. 4.2 dargestellt.

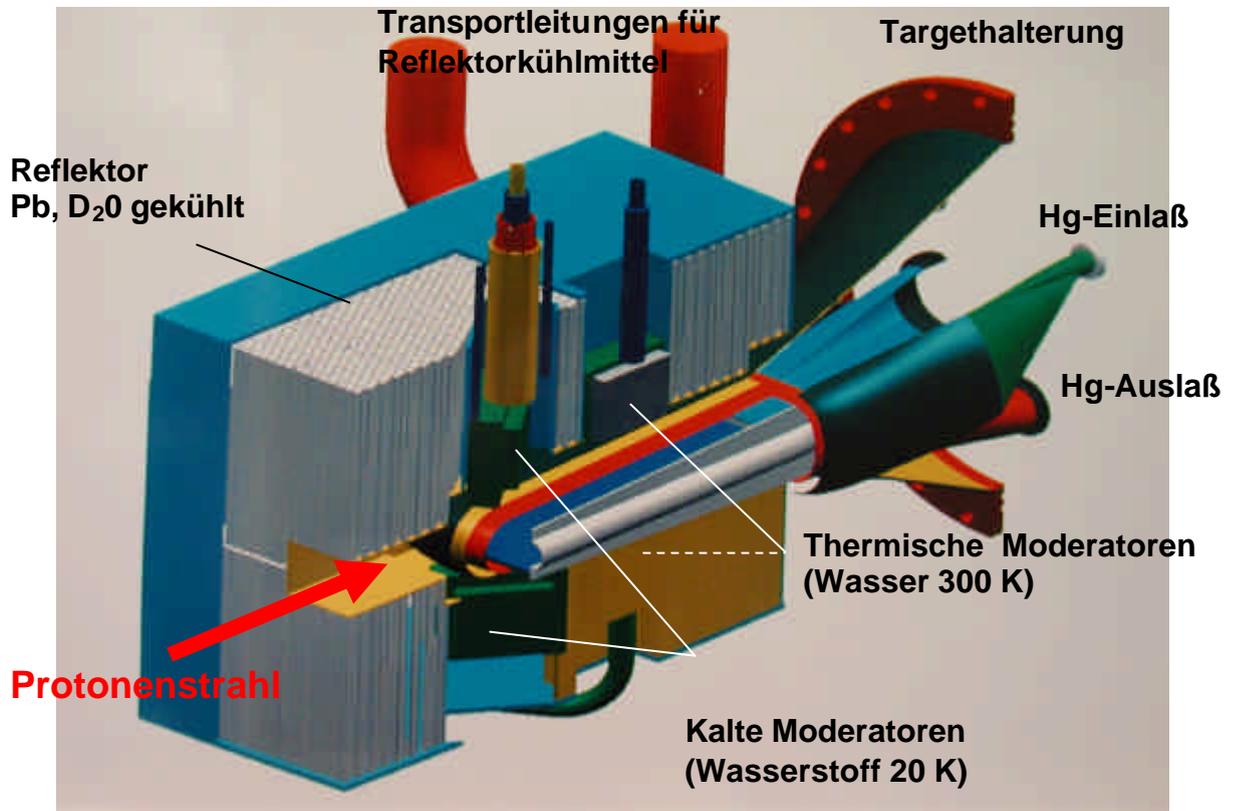


Abb. 4.2: Prinzip einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung für die ESS nach /ess1996/

Als Targetmaterial ist für beide Targetstationen Quecksilber vorgesehen (siehe Kapitel 3.1, S. 13f.). Für beide Targetstationen ist dasselbe Target mit den Maßen: $B \times H \times T$: $30\text{cm} \times 15\text{cm}(\text{variiert}) \times 90\text{cm}$ vorgesehen. Das Target ist von einem Sicherheitsbehälter umgeben, der im Falle eines Lecks das Quecksilber auffängt.

Modellrechnungen haben gezeigt, daß mit Quecksilber als Targetmaterial eine optimale Neutronenquellrate möglich ist. Das Maximum des Neutronenflusses befindet sich bei ca. 8-10 cm Tiefe. Dies ist die sogenannte „brillante“ Position. Liegt der Moderatormittelpunkt auf dieser Achse, so werden höchste Intensitäten erzielt.

In Abb. 4.3 sind zum Vergleich die Neutronenausflußverteilungen gezeigt, die das ESS-Target mit Wolfram (W) und Tantal (Ta) als Targetmaterial erzielen würde. Bei Wolfram und Tantal werden Kühlkanäle benötigt (als Kühlmittel wird z.B. H_2O oder D_2O verwendet), die die Dichte des Targetmaterials vermindern, somit niedrigere Neutronenausflußraten aus dem Target bewirken und letztendlich die Neutronenstromdichten aus der Moderatoroberfläche verringern. In den Ergebnissen aus Abb. 4.3 ist 15-20Vol% als Kühlmittel für Wolfram und Tantal berücksichtigt worden.

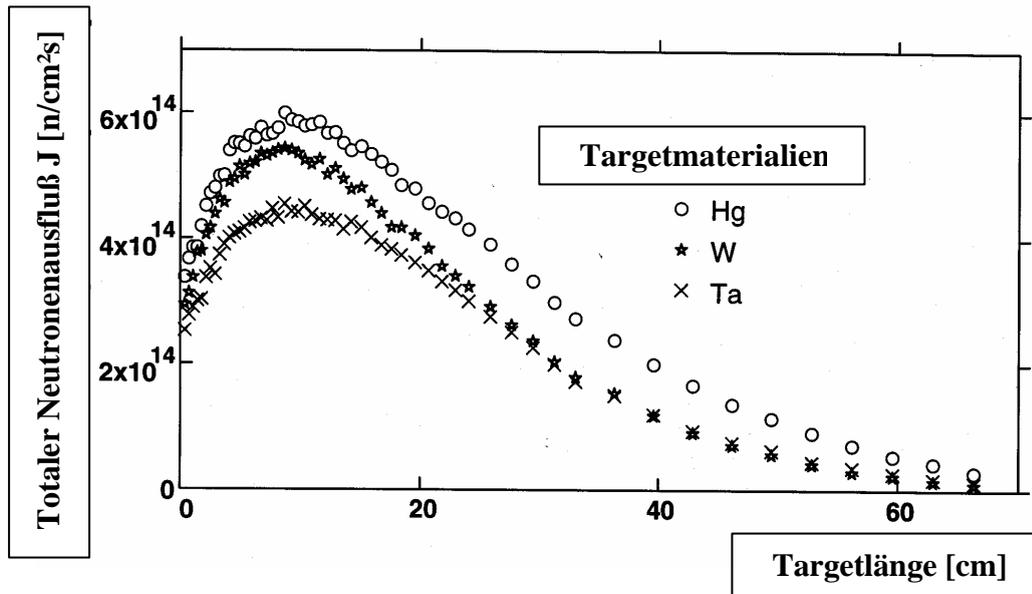


Abb. 4.3: Neutronenausflüsse für verschiedene Targetmaterialien in der ESS-Geometrie als Funktion der Targetlänge /ess1996/

Beide Targetstationkonzepte haben das gleiche Reflektorkonzept und das gleiche Targetsystem. Das favorisierte Targetmaterial ist Quecksilber. Als Reflektormaterial ist für beide Targetstationen Blei mit D_2O -Kühlung vorgesehen (85Vol% Pb und 15Vol% D_2O). Als Standardmoderatoren sind im Referenzdesign Wassermoderatoren bei 300 K /ess1996/ bzw. flüssiger Wasserstoff $T=20\text{K}$ /ESS2002/ geplant. Die Moderatoren haben im Referenzdesign die Maße $B \times H \times T: 15\text{cm} \times 12\text{cm} \times 5\text{cm}$; andere vorgeschlagene Dimensionen sind u.a. im Kapitel 5.2 und Kapitel 7 berechnet worden.

Sowohl Target, Moderatoren und Reflektor müssen austauschbar sein, da die Lebensdauer dieser Komponenten aufgrund der entstehenden Strahlenschäden begrenzt ist.

5. Simulationsuntersuchungen für die Targetstationen der ESS : Kurzpulstargetstation SPTS (Short Pulse Target Station) und Langpulstargetstation LPTS (Long Pulse Target Station)

Die hier durchgeführten Teilchentransportsimulationen zur Optimierung der neutronischen Parameter insbesondere zur Bestimmung des Neutronennutzflusses orientieren sich an den vorläufigen technischen Vorschlägen, wie sie in den Referenzen /ess1996/ und /ESS2002/ beschrieben werden. Im Folgenden sind die dreidimensionalen Geometriemodelle mit den verwendeten Materialkompositionen für die SPTS und die LPTS dargestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse einer Optimierung der neutronischen Leistungsparameter für beide Targetstationen zusammengefaßt. Die Einflüsse verschiedener Parameter werden erläutert.

5.1 Kurzpulstargetstation SPTS

Die Geometriemodelle für die Kurzpulstargetstation SPTS und die verwendeten Parameter für die Simulationen

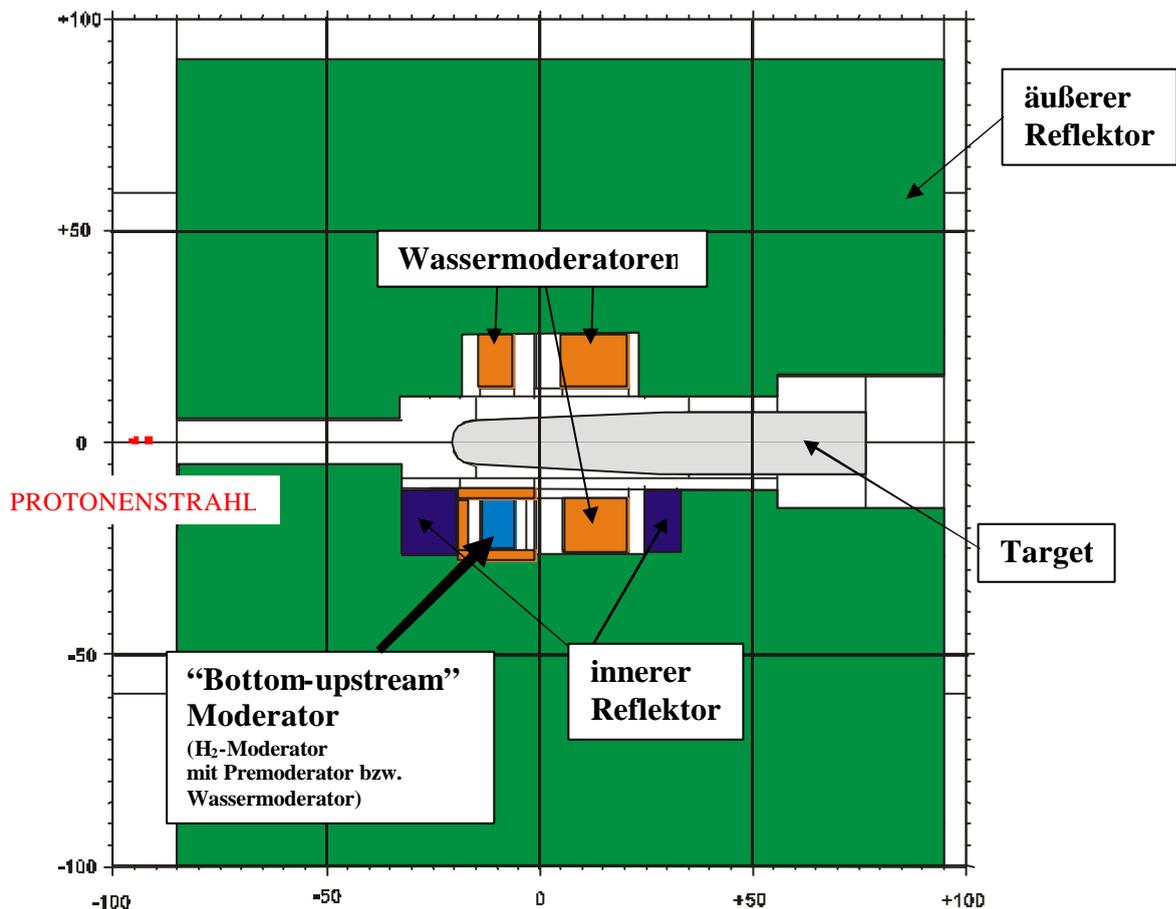


Abb. 5.1: Vertikaler Schnitt durch das Geometriemodell für die Target-Reflektor-Moderator-Anordnung der Kurzpulstargetstation SPTS

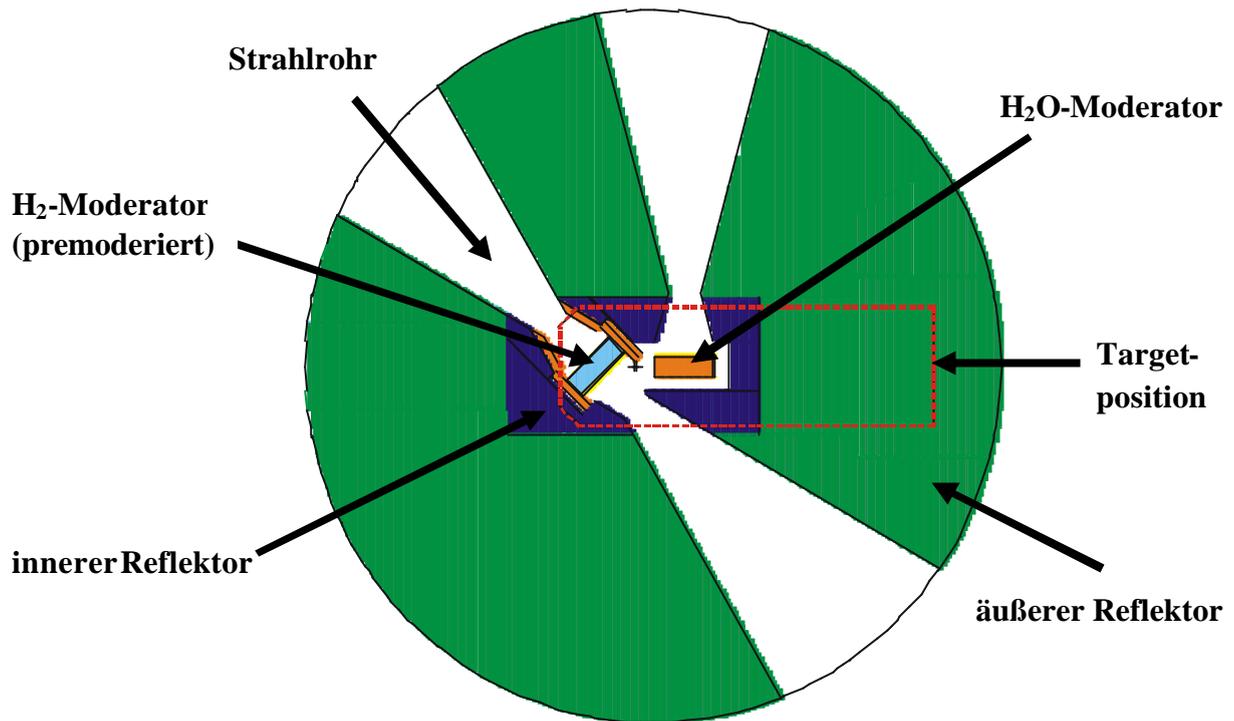


Abb. 5.2: Horizontaler Schnitt durch die Ebene des Wasserstoffmoderators im Geometriemodell für die Target-Reflektor-Moderator-Anordnung der SPTS /ESS2002/

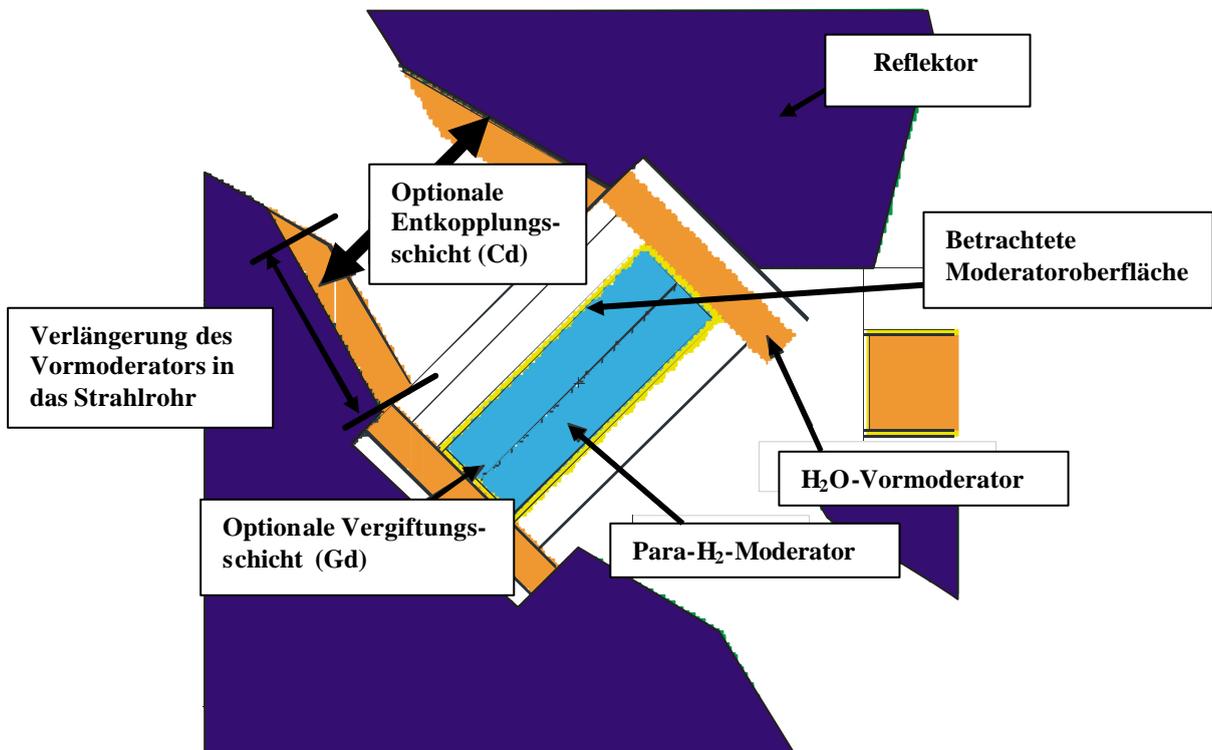


Abb. 5.3: Detailansicht des Wasserstoffmoderators mit Vormoderator, optionaler Entkopplungsschicht (Cd), optionaler Vergiftungsschicht (Gd) und der Verlängerung des Vormoderators in das Strahlrohr für die Target-Reflektor-Moderator-Anordnung der Kurzpulstargetstation SPTS /ESS2002/

Verwendete Parameter für die Simulation:

- **Target:** *Material:* Quecksilber (Hg), *Maße:* 30cmx15cm(variiert)x90cm. Die Distanz zwischen Targetwand und nächster Moderatorkante beträgt für die vorderen Moderatoren im Mittel 7cm.
- **Moderatoren:**
Die vier Moderatoren sind in Wing-Anordnung (siehe Kap. 3.2.1.5, S.15) platziert. Die gezeigten Ergebnisse sind für den Austauschmoderator ermittelt worden, der in „brillanter Position“ (siehe Kap. 4.3, S. 36) angeordnet ist. Die Simulationen wurden für jeweils drei Moderatorkonzepte des Wassermoderators und des Wasserstoffmoderators mit Premoderator durchgeführt: gekoppelter, entkoppelter und entkoppelter Moderator mit zusätzlicher Vergiftung.
Material: drei Wassermoderatoren (T=300K) und ein Austauschmoderator („bottom-upstream“-Moderator), der optional mit Wasser (H₂O, T=300K) gefüllt wird ohne Vormoderator, oder bei Füllung mit 100% para-Wasserstoff (para-H₂, T=20K) von einem Wasser- Premoderator (H₂O, T=300K) umgeben wird.
Maße der Moderatoren sind: BxHxT: 15cmx12cmx5cm. Alle Moderatoren sind von einem Aluminiumbehälter mit einer Wandstärke von 3mm umgeben. Der Premoderator hat eine Dicke von 2cm und eine Verlängerung in das Strahlrohr von 12,5cm (siehe Abb. 5.3).
Die Entkopplungsschicht ist 3 mm dick. Neben der in Abb. 5.3 dargestellten Schicht wird anstelle des Aluminiums im Moderatorbehälter Kadmium eingesetzt, wobei aber die Moderatorwand in Richtung Strahlrohr aus Aluminium bestehen bleibt.
Die Vergiftungsschicht besteht aus 500 µm Gadolinium.
- **Reflektor:** *Material:* sowohl innerer als auch äußerer Reflektor Blei (Pb), D₂O gekühlt (85Vol%Pb+15Vol%D₂O), *Maße:* Zylinder mit Durchmesser 180cm und Höhe 180cm. Der Reflektor wird von konischen Strahlrohren durchbrochen, die einen Öffnungswinkel von 30° besitzen.

Die für die Simulationen verwendeten Protonenstrahlparameter sind:

Strahlparameter	SPTS
Strahlenergie	1.334 GeV
Strahlprofil	Ellipse 20cmx6cm Protonenintensitätsverteilung gaußverteilt Abschneidung ($\pm x$)= $\pm 10\text{cm} = 3\sigma$ Abschneidung ($\pm y$)= $\pm 3\text{cm} = 3\sigma$
Mittlerer Strom	3.75 mA
Protonenanzahl	2.34×10^{16} Protonen/Sekunde bzw. 4.684×10^{14} Protonen/Puls
Pulslänge und Frequenz	1.4 µs/50 Hz

Tabelle 5.1: Protonenstrahlparameter SPTS /ESS2002/

5.1.2 Berechnete Neutronenparameter und Normierung für SPTS

In den Simulationen wurden die Neutronenflußdichten $f(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ und die Neutronenstromdichten $\vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$ berechnet. Die Werte stellen Mittelwerte über das gesamte Moderatorvolumen ($\sim 900\text{cm}^3$) bzw. über die gesamte Moderatoroberfläche (180cm^2) dar.

Die aus der Moderatoroberfläche in Richtung Neutronenstreulinstrumente auströmenden Neutronen unterliegen einer Kosinus-Verteilung. Da üblicherweise die Entfernung zwischen Moderatoroberfläche und Neutronenstreuexperiment einige 10 m bis 100 m beträgt, sehen die Detektoren der Experimente im Wesentlichen nur die senkrecht aus der Moderatoroberfläche austretenden Neutronen. Deshalb erfolgt für die Neutronenstromdichten eine Normierung auf den Raumwinkel von $\pm 2^\circ$. Die Simulationen der wellenlängenabhängigen Neutronenstromdichten wurden zunächst für einen Raumwinkel von 2π durchgeführt, um eine bessere Statistik zu erzielen. Für die Umrechnung auf einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$ wurde das Verhältnis der gesamten thermischen Neutronenstromdichten ($E \leq 413\text{meV}$) für einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$ und einen Raumwinkel von 2π bestimmt und damit die Resultate für einen Raumwinkel von 2π faktorisiert. D.h., die Ergebnisse für die wellenlängenabhängigen Neutronenstromdichten entsprechen dem Neutronenstrom, den ein Streuexperiment in weiter Entfernung von der Moderatoroberfläche sieht.

Im Einzelnen wurden berechnet:

- thermische ($E \leq 413\text{meV}$) Neutronenflußdichten ϕ_{th} in Abhängigkeit der Zeit t (nur gekoppelter Moderator)
- thermische ($E \leq 413\text{meV}$) Neutronenstromdichten J_{th} in Abhängigkeit der Zeit t (nur gekoppelter Moderator)
- Neutronenstromdichten in Abhängigkeit von Zeit t und Energie (bzw. Wellenlänge) λ

Es werden folgende Simulationsergebnisse detailliert diskutiert: a) die Spitzenneutronenstromdichten, b) die Pulsbreiten in Form der FWHM* und c) die mittleren Neutronenstromdichten jeweils als Funktion der Wellenlänge. Die mittlere Neutronenstromdichte ist das pro Energie-(bzw. Wellenlängen-)Intervall errechnete Integral der Neutronenstromdichte, was dem Integral des Neutronenpulses über die Zeit für das jeweilige Intervall entspricht. Die Energien werden zum Teil als Wellenlängen zur besseren Kompatibilität mit Angaben für die Neutronenstreuexperimente angegeben. Dabei lautet die Umrechnung wie folgt:

$$E[\text{meV}] = \frac{82\text{meV} \cdot \text{\AA}^2}{(\lambda [\text{\AA}])^2}$$

- E: Neutronenenergie [meV]
 λ : Wellenlänge [\AA ; $1 \text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$]

* FWHM=Full Width at Half Maximum, Pulsbreite bei der Hälfte des Maximums in [μs]

Normierung der *thermischen* ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichte $F_{th}(t)$:

$$\Phi_{th}(t) = \mathbf{f}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot 4.68 \cdot 10^{14} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2} \right]$$

Normierung der *thermischen* ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte $J_{th}(t)$:

$$J_{th}(t) = \vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot \frac{4.68 \cdot 10^{14}}{180 \cdot 2 \cdot \mathbf{p}} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}} \right]$$

Normierung der Neutronenstromdichte $J(t, l)$ in Abhängigkeit von Zeit t und Neutronenwellenlänge l :

$$J(t, l) = \vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot \frac{4.68 \cdot 10^{14}}{180 \cdot 2 \cdot \mathbf{p} \cdot \Delta l} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Å}} \right]$$

Normierung der mittleren Neutronenstromdichten $J(l)$ in Abhängigkeit der Neutronenwellenlänge l :

$$J(l) = \vec{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot \frac{2.34 \cdot 10^{16}}{180 \cdot 2 \cdot \mathbf{p}} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Å}} \right]$$

Es wurden folgende Parameter bei der Normierung für die SPTS verwendet:

Die Protonenzahl pro Puls:	$4.68 \cdot 10^{14}$
Die Pulsfrequenz:	50 Hz
Die mittlere Protonenzahl:	$4.68 \cdot 10^{14} \cdot 50 = 2.34 \cdot 10^{16}$
Die Moderatoroberfläche:	180 cm ²
Das jeweilige Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ in der Einheit Å	

5.1.3 Neutronenstromdichten für verschiedene Wellenlängen in den drei verschiedenen Wasser-Moderatorkonzepten (H₂O bei T=300K)

In Abb. 5.4 sind die wellenlängen- und zeitabhängigen Neutronenstromdichten zusammengestellt.

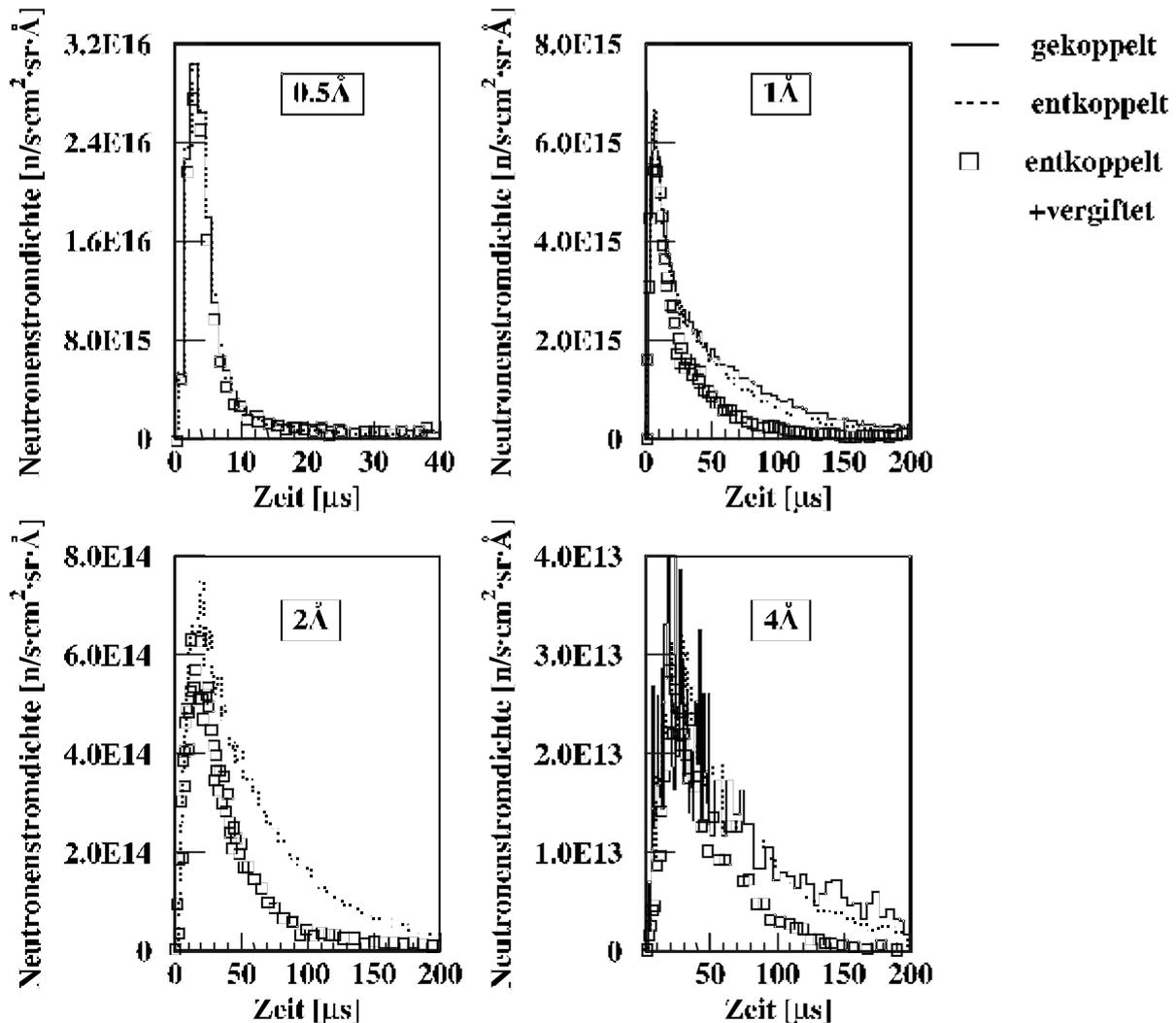


Abb. 5.4: Neutronenstromdichten der Wassermoderatorkonzepte als Funktion der Zeit für verschiedene Wellenlängen bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Mit steigender Wellenlänge verbreitert sich der Puls, da Neutronen mit niedrigeren Energien langsamer sind und nur durch längere Laufzeiten, die die Stoßwahrscheinlichkeit erhöhen, eine Abbremsung erfolgen kann.

Beim Wassermoderator führt die Entkopplung mit Kadmium nur zu einer sehr geringen Veränderung gegenüber dem gekoppelten Wassermoderator, weil Blei ein schneller Reflektor ist - auch mit 15Vol.% homogen verteiltem D₂O Kühlmittel - und somit kaum thermische Neutronen aus dem Reflektor in den Moderator gelangen. Der Effekt der Entkopplung kann sich verstärken, wenn technisch bedingt größere Volumenkonzentrationen von Kühlmittel in

der Nähe des Moderators erforderlich sind. Alternative Entkopplungsmaterialien mit höheren Entkopplungsenergien und demzufolge größerem Effekt wären z.B. Borkarbid BC_4 .

Abb. 5.5 gibt einen Überblick über den Verlauf der Spitzenneutronenstromdichten, der Pulsbreiten (FWHM) und der mittleren Neutronenstromdichten für einen Wassermoderator in der Kurzpulstargetstation SPTS in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Neutronen.

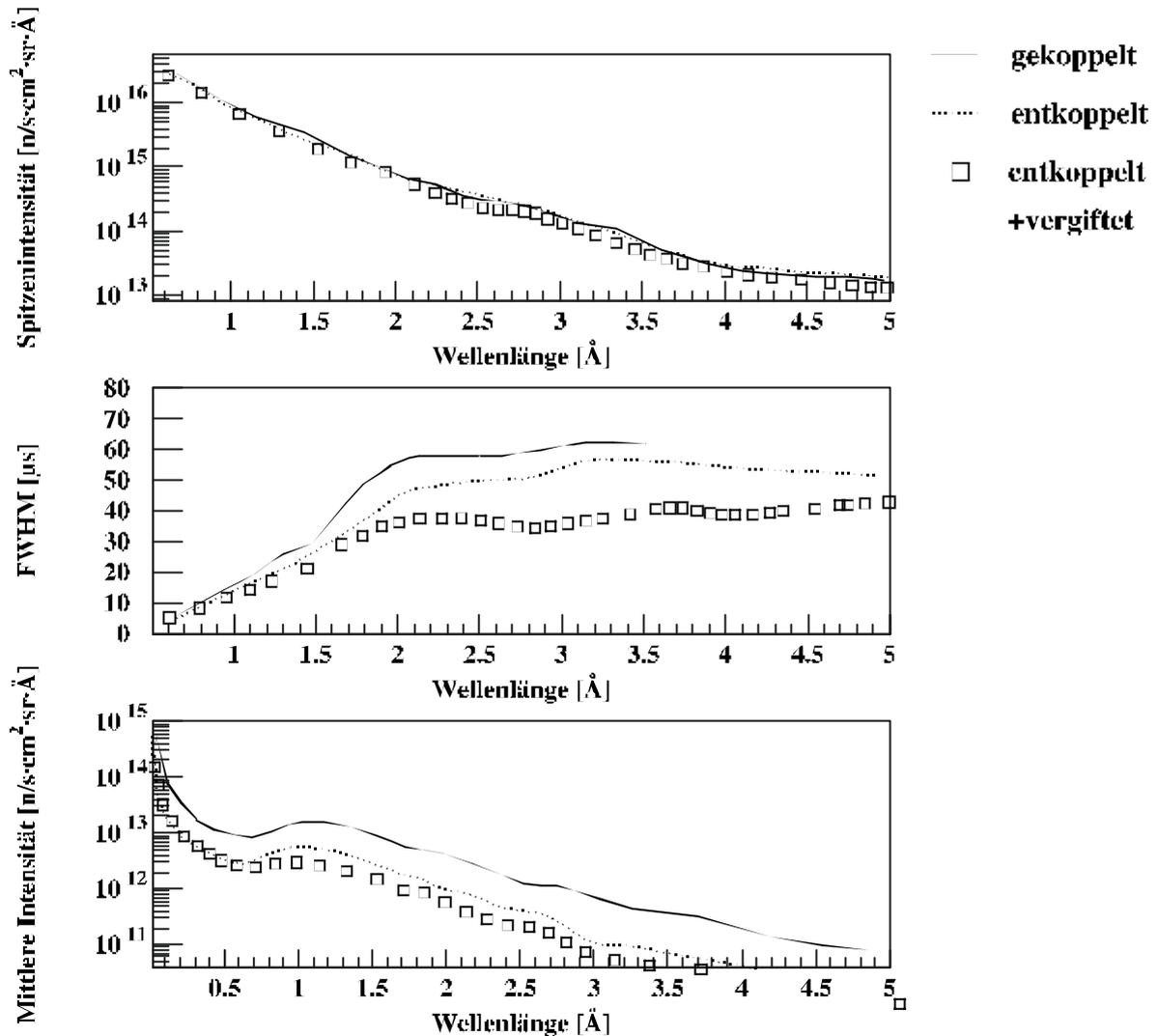


Abb. 5.5: Spitzenneutronenstromdichten, Pulsbreiten in FWHM und mittlere Neutronenstromdichten für die Wassermoderatorkonzepte in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Spitzenneutronenstromdichten:

Die maximalen Neutronenstromdichten verhalten sich nahezu über alle Wellenlängen umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Bei Neutronenwellenlängen oberhalb von 4\AA ist fast keine Änderung mehr feststellbar. Für die maximalen Neutronenstromdichten ergeben sich beim Wassermoderator nur marginale Unterschiede zwischen den drei Konfigurationen. Dies bedeutet, daß in den Neutronenpulsen aus Abb. 5.4 im Maximum fast nur Neutronen vorhanden sind, die direkt im Moderator abgebremst wurden und eine kurze Aufenthaltsdauer im Moderator selbst haben, d.h. weder vom Entkoppler noch vom Vergiftungsmaterial beeinflußt werden.

Pulsbreiten in FWHM:

Die Breite der zeitabhängigen Neutronenpulse nimmt besonders mit der Vergiftung stark ab, weil die Breite der Pulse mitbestimmt wird von Neutronen, die sich längere Zeit im Moderator aufgehalten haben und längere Laufzeiten haben. Diese werden von der Vergiftungsschicht im Moderator absorbiert.

Bedingt durch die Statistik können für die hier berechneten Neutronenstromdichten bei höheren Wellenlängen auch größere Abweichungen auftreten.

Mittlere Neutronenstromdichten:

Das Maximum der mittleren Neutronenstromdichten liegt bei ca. 1.3\AA - bei einer Energie von ca. 25 meV - weil Wasser ein thermischer Moderator ist und bei einer Temperatur von $T=300\text{K}$ betrieben wird.

Die mittleren Neutronenstromdichten zeigen ansonsten einen typischen Verlauf. Zuerst sinkt die Intensität bis auf ein Minimum bei ca. 0.5\AA . Danach steigt sie wieder bis zu einem Maximum bei ca. 1.3\AA , um dann stetig zu fallen.

Der erste abfallende Teil ($\lambda < 0.5\text{\AA}$) stellt den Teil abgebremster Neutronen dar, die vom Reflektor kommend durch den Moderator die Moderatoroberfläche erreichen und nicht oder nur teilweise abgebremst wurden. Dieser Teil des Spektrums verläuft stetig weiter nach unten, wird aber ab $\lambda = 0.5\text{\AA}$ überlagert von dem Teil der Neutronen, die im Moderator thermalisiert werden und relativ schnell den Moderator verlassen. Im Maximum hat sich ein thermisches Gleichgewicht eingestellt ($\lambda = 1.3\text{\AA}$).

Mit zunehmender Wellenlänge ($\lambda > 1.3\text{\AA}$) verlassen Neutronen die Moderatoroberfläche, die eine längere Aufenthaltsdauer im Moderator haben. Insbesondere diese Neutronen können mittels Vergiftung absorbiert werden, um die Pulsauflösung zu verbessern (kleine FWHM).

Der Verlauf eines Energiespektrums der mittleren Neutronenstromdichten ist prinzipiell bei allen Moderatoren gleich, nur die Lage der Minima und Maxima und die Steigungsfaktoren unterscheiden sich.

5.1.4 Neutronenstromdichten für verschiedene Wellenlängen in den drei verschiedenen vormoderierten Wasserstoff-Moderatorkonzepten (100% Para- H_2 bei $T=20K$)

In Abb. 5.6 werden die Ergebnisse für die zeitabhängigen Neutronenstromdichten des Wasserstoffmoderators mit Vormoderator in drei verschiedenen Konfigurationen für verschiedene Wellenlängen gezeigt.

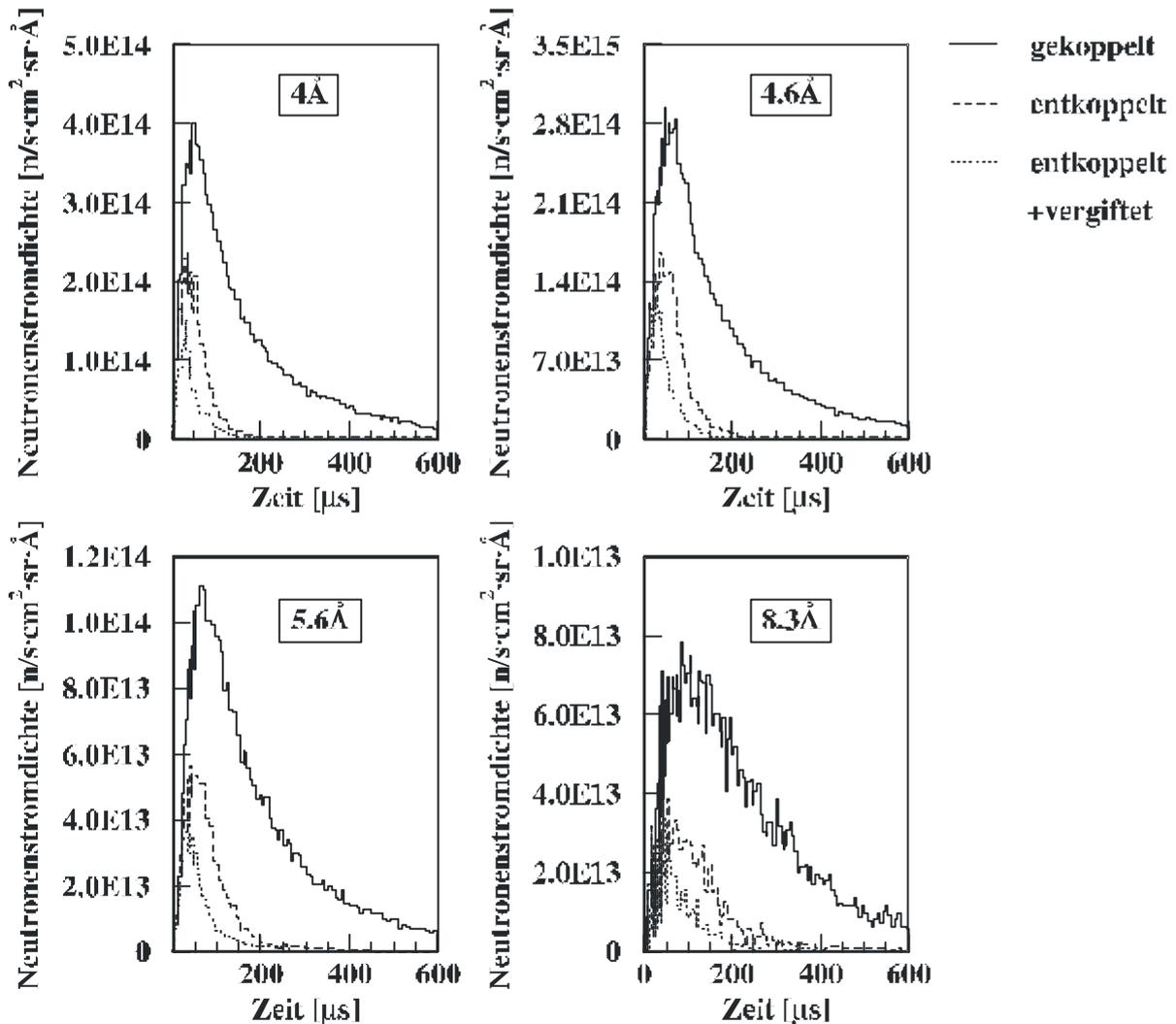


Abb. 5.6: Neutronenstromdichten der vormoderierten Wasserstoff-Moderatorkonzepte als Funktion der Zeit für verschiedene Wellenlängen bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Interessant ist hier die deutlich größere Abweichung der drei Systeme gegenüber dem Wassermoderator in Abb. 5.5. Die Entkopplung macht sich sehr deutlich bemerkbar. Die Ursache dafür ist vor allem im Vormoderator zu suchen. Er bremst Neutronen aus dem Reflektor ab, die dann zum großen Teil in den Wasserstoffmoderator weiterwandern, wo sie weiter hin zu niedrigeren Energien moderiert werden. Die Entkopplungsschicht sitzt jedoch zwischen Vormoderator und eigentlichem Moderator, deshalb werden die Neutronen aus dem Vormoderator absorbiert. Dies führt zu einer deutlichen Verringerung des Neutronenausflusses im kalten und thermischen Bereich direkt aus dem Wasserstoffmoderator.

Die Vergiftung bringt nochmals kleinere FWHM für den resultierenden Neutronenpuls, weil sie die Neutronen zurückhält, die sich sehr lange im Moderator aufhalten.

Abb. 5.7 zeigt die Spitzenintensitäten, die Pulsbreiten FWHM's und die mittleren Neutronenstromdichten für die vormoderierten Wasserstoffmoderatorenkonzepte.

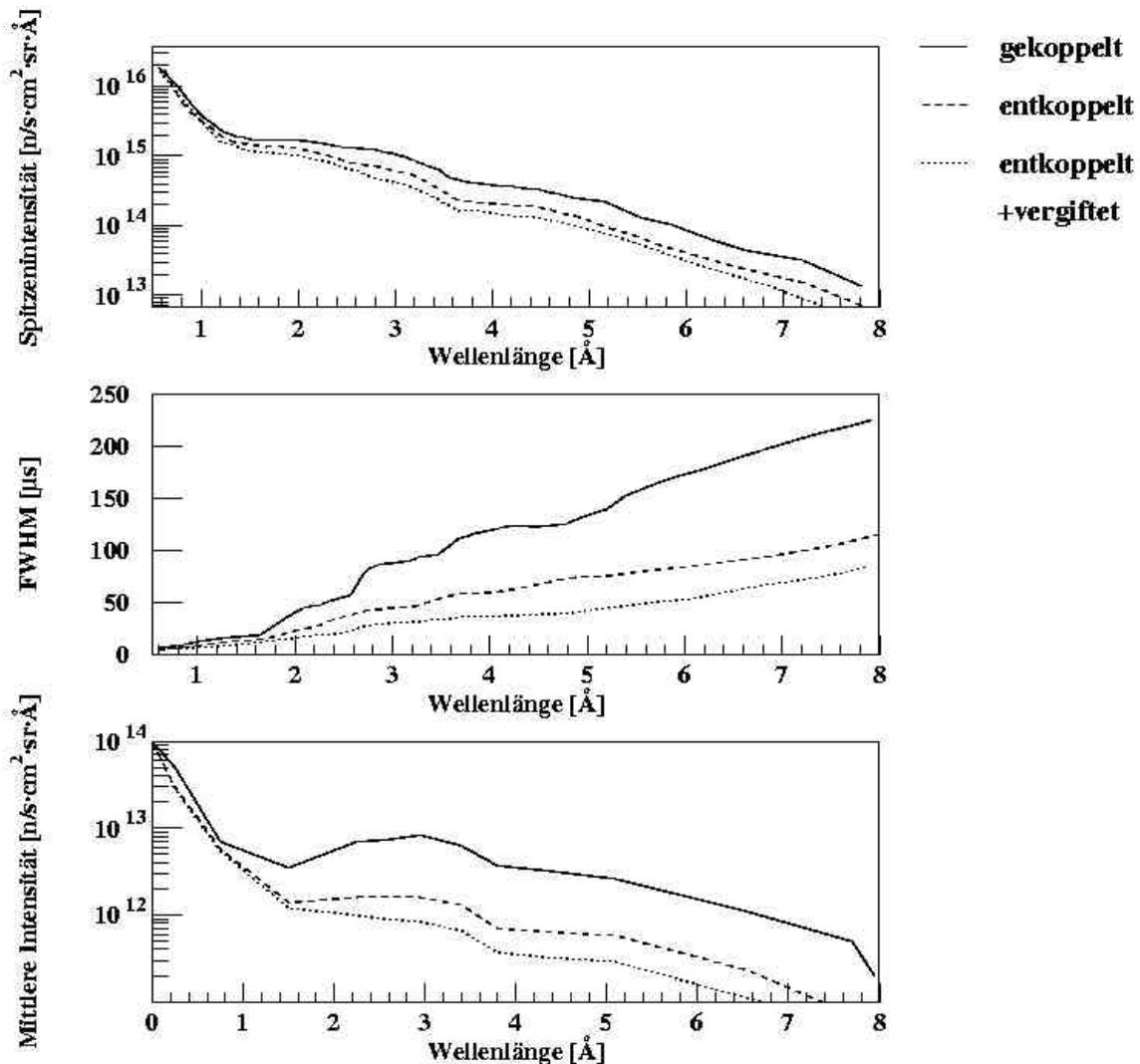


Abb. 5.7: Spitzenneutronenstromdichten, Pulsbreiten in FWHM und mittlere Neutronenstromdichten als Funktion der Wellenlänge für die premoderierten Wasserstoff-Moderator-konzepte bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Spitzenneutronenstromdichten:

Die erzielbaren maximalen Neutronenstromdichten weichen erst über einer Wellenlänge von ca. 1Å voneinander für die drei Systeme ab, da sie die Neutronen repräsentieren, die direkt im Moderator thermalisiert werden und die Entkopplung zunächst die Neutronen betrifft, die in den Vormoderator gelangen. Die Schwankungen im Kurvenverlauf sind zum Teil bedingt durch numerische und statistische Fehler.

Pulsbreiten in FWHM:

Der Effekt von Entkopplung und Vergiftung verringert die Pulsbreite (FWHM) deutlich, wie es auch gewünscht wird. Entkopplung und Vergiftung haben einen deutlichen Einfluß auf die Pulsbreite, allerdings unter der Einbuße von Intensität.

Mittlere Neutronenstromdichten:

Im Gegensatz zu den Wassermoderatoren ist das Maximum der mittleren Neutronenstromdichten hin zu einer Wellenlänge von ca. 2.8 Å - einer Energie von ca. 10 meV - verschoben, weil es sich um einen kalten Moderator handelt, der bei einer Temperatur von T=20K betrieben wird.

Die Entkopplung führt zu Intensitätsverlusten der mittleren Neutronenstromdichten von rund 70%. Der Effekt der Vergiftung macht sich erst ab Wellenlängen von ca. 1.5 Å bemerkbar und führt nochmals zu einer Reduzierung der Intensität um ca. 50% (siehe auch Tabelle 5.4).

5.1.5 Numerische Resultate für die Moderator-konzepte der SPTS

In den Tabellen 5.2 bis 5.5 sind die numerischen Werte sowohl für Neutronenflußdichten im Moderator, Neutronenstromdichten aus der Moderatoroberfläche und die entsprechenden wellenlängenabhängigen Neutronenstromdichten für die Wasser-Moderator-konzepte und die vormoderierten Wasserstoff-Moderator-konzepte zusammengestellt.

Wellenlänge λ [Å]	Moderator-konfiguration	Max. Neutronenstromdichte J_{\max} [n/s·cm ² ·sr·Å]	Mittl. Neutronenstromdichte J_{mit} [n/s·cm ² ·sr·Å]	Pulsbreite FWHM (Full Width at Half Maximum) [µs]
0.5Å	gekoppelt	$2.9 \cdot 10^{16}$	$8.0 \cdot 10^{12}$	5.0
	entkoppelt	$3.0 \cdot 10^{16}$	$2.9 \cdot 10^{12}$	3.8
	entkoppelt +vergiftet	$2.7 \cdot 10^{16}$	$7.6 \cdot 10^{11}$	4.3
1Å	gekoppelt	$6.3 \cdot 10^{15}$	$1.5 \cdot 10^{13}$	19.4
	entkoppelt	$6.1 \cdot 10^{15}$	$4.5 \cdot 10^{12}$	17.4
	entkoppelt +vergiftet	$5.4 \cdot 10^{15}$	$7.6 \cdot 10^{12}$	14.0
2Å	gekoppelt	$6.3 \cdot 10^{14}$	$2.8 \cdot 10^{12}$	59.1
	entkoppelt	$6.4 \cdot 10^{14}$	$5.8 \cdot 10^{11}$	47.2
	entkoppelt +vergiftet	$5.4 \cdot 10^{14}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	30.7
4Å	gekoppelt	$2.5 \cdot 10^{13}$	$1.3 \cdot 10^{11}$	60.9
	entkoppelt	$2.4 \cdot 10^{13}$	$2.4 \cdot 10^{10}$	53.0
	entkoppelt +vergiftet	$2.2 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	33.4

Table 5.2: Zusammenfassung der numerischen Simulationsergebnisse für die Wasser-Moderator-konzepte (T=300K), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel +/-2°

Wellenlänge l [Å]	Maximale Neutronenstromdichten J_{\max} [n/s·cm ² ·sr·Å]		
	der Moderatorconfiguration:		
	gekoppelt	entkoppelt	entkoppelt + vergiftet
0.5	$1.9 \cdot 10^{16}$	$1.9 \cdot 10^{16}$	$1.8 \cdot 10^{16}$
1.0	$2.9 \cdot 10^{15}$	$2.5 \cdot 10^{15}$	$2.3 \cdot 10^{15}$
2.0	$1.6 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	$9.4 \cdot 10^{14}$
2.7	$1.2 \cdot 10^{15}$	$7.1 \cdot 10^{14}$	$4.8 \cdot 10^{14}$
3.2	$8.2 \cdot 10^{14}$	$5.1 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^{14}$
3.6	$4.4 \cdot 10^{14}$	$2.3 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{14}$
4.0	$3.7 \cdot 10^{14}$	$2.0 \cdot 10^{14}$	$1.4 \cdot 10^{14}$
4.6	$2.8 \cdot 10^{14}$	$1.6 \cdot 10^{14}$	$1.1 \cdot 10^{14}$
5.6	$9.9 \cdot 10^{13}$	$5.1 \cdot 10^{13}$	$3.6 \cdot 10^{13}$
8.3	$6.8 \cdot 10^{12}$	$3.1 \cdot 10^{12}$	$1.7 \cdot 10^{12}$

Tabelle 5.3: Numerische Werte der maximalen Neutronenstromdichten J_{\max} bei verschiedenen Wellenlängen für die vormoderierten Wasserstoff-Moderator-konzepte ($T=20K$), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel $\pm 2^\circ$

Wellenlänge l [Å]	Mittlere Neutronenstromdichten J_{mit} [n/s/cm ² /sr/ Å]		
	der Moderatorconfiguration:		
	gekoppelt	entkoppelt	entkoppelt + vergiftet
0.5	$7.0 \cdot 10^{12}$	$5.8 \cdot 10^{12}$	$5.5 \cdot 10^{12}$
1.0	$3.5 \cdot 10^{12}$	$1.4 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{12}$
2.0	$7.0 \cdot 10^{12}$	$1.6 \cdot 10^{12}$	$1.0 \cdot 10^{12}$
2.5	$7.4 \cdot 10^{12}$	$1.6 \cdot 10^{12}$	$8.9 \cdot 10^{11}$
3.2	$6.3 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	$6.6 \cdot 10^{11}$
3.6	$3.7 \cdot 10^{12}$	$7.0 \cdot 10^{11}$	$3.7 \cdot 10^{11}$
4.0	$3.3 \cdot 10^{12}$	$6.5 \cdot 10^{11}$	$3.3 \cdot 10^{11}$
4.6	$2.6 \cdot 10^{12}$	$5.8 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^{11}$
5.6	$1.1 \cdot 10^{12}$	$2.3 \cdot 10^{11}$	$1.1 \cdot 10^{11}$
8.3	$1.0 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{10}$

Tabelle 5.4: Numerische Werte der mittleren Neutronenstromdichten J_{mit} bei verschiedenen Wellenlängen für die vormoderierten Wasserstoff-Moderator-konzepte ($T=20K$), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel $\pm 2^\circ$

Moderator-typ	Neutronenflußdichte [n/cm ² ·s]		Neutronenstromdichte [n/cm ² ·s·sr]	
	$f_{\text{th max}}$	$f_{\text{th mit}}$	$J_{\text{th max}}$	$J_{\text{th mit}}$
Wasser ($T=300K$)	$1.3 \cdot 10^{17}$	$3.1 \cdot 10^{14}$	$9.8 \cdot 10^{15}$	$1.8 \cdot 10^{13}$
vormoderierter para-Wasserstoff ($T=20K$)	$9.0 \cdot 10^{16}$	$3.2 \cdot 10^{14}$	$6.8 \cdot 10^{15}$	$2.5 \cdot 10^{13}$

Tabelle 5.5: Thermische ($E_n=413\text{meV}$) Neutronenflußdichten und Neutronenstromdichten der gekoppelten ESS-SPTS-Moderatore), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel für die Neutronenstromdichte: $\pm 2^\circ$

5.1.6 Lebensdauer einer Gadoliniumvergiftungsschicht für ESS-Moderatoren

Wie in den Ergebnissen zu Simulationen im Kapitel 5.1 dargestellt, müssen Moderatoren bei gepulsten Spallationsquellen mit entsprechenden Neutronenabsorbern („Vergiftungen“) versehen werden, um schmale Neutronenpulse mit kurzen Neutronenpulsabklingzeiten zu erreichen. Hierbei wird üblicherweise Kadmium oder besser Gadolinium eingesetzt (Absorptionsquerschnitte siehe Anhang E).

Die geplante ESS als intensive Neutronenquelle wird thermische oder kalte Neutronenflüsse erzeugen, die um Größenordnungen höher sind als in allen bisher existierenden oder projektierten Quellen. Deshalb ist die Abbrandrate beim Einsatz von Materialien mit hohen thermischen Absorptionsquerschnitten von besonderem Interesse für die technische Auslegung und den Betrieb dieser Moderatoren. ISIS benutzt z.B. für die Neutronenpulsformung Gadoliniumbleche mit einer Dicke von 40 μm /all1998/. Berechnungen zeigen allerdings, daß eine solche dünne Platte nach einigen hundert Stunden Einsatz in einer Spallationsquelle der Megawattklasse vollständig abgebrannt ist.

Für die Simulationen wurde Gadolinium in natürlicher Zusammensetzung angenommen:

- Gd-154 2.18%
- Gd-155 14.8%
- Gd-156 20.47%
- Gd-157 15.85%
- Gd-158 24.84%
- Gd-160 21.86%

Bei der Abschätzung der Lebensdauer ist die entscheidende Reaktion die Neutronenabsorption. Dabei sind die Isotope Gd-155 und Gd-157 maßgebend, denn die Absorptionswahrscheinlichkeit von thermischen Neutronen durch Restisotope beträgt bei einer Gadoliniumplatte der Dicke 500 μm insgesamt nur 0.5%.

Betrachtet man nun den Abbrand einer Gd-Platte von 180 cm^2 und einer Dicke von 500 μm bestehend aus Gd-155 und Gd-157, die in einem Wassermoderator einem Neutronenfluß von $\phi_{\text{th}} \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ n/s}\cdot\text{cm}^2$ bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW ausgesetzt sind, so erhält man folgende Ergebnisse:

Die Anzahl der Gadoliniumatome in der Platte ist $4,6 \cdot 10^{20}$ Atome Gd-155 + Gd-157 entsprechend ihrem Anteil in natürlichem Gadolinium. Damit ergibt sich die mittlere Abbrandzeit - alle Gadoliniumatome sind dabei transmutiert - zu:

$$4,6 \cdot 10^{20} [1/\text{cm}^2] / 5 \cdot 10^{13} [1/\text{cm}^2] = 9,2 \cdot 10^6 [\text{s}] = \underline{\underline{106 \text{ d}}}$$

Innerhalb dieses Zeitraums von ca. 106 Tagen brennt die Gadoliniumplatte der Dicke 500 μm in einem ESS-Moderator vollständig ab (wenn man von der hier angenommenen homogenen Flußverteilung über die Oberfläche der Platte ausgeht. In der Realität hat die Neutronenflußdichte eine Kosinusverteilung über die Platte mit einem höheren Abbrand in der Mitte).

Durch Einfang der anderen Gd-Isotope findet noch ein Brüten von Gd-155 und Gd-157 statt mit einer Anzahl von $1,6 \cdot 10^{18}$ Atome. Die Lebensdauer erhöht sich dadurch aber nur um 3,5%. In einem ESS-Moderator kann eine Gd-Vergiftungsschicht mit längerer Betriebsdauer nur durch eine größere Dicke erreicht werden, wobei aber auch die Kühlung von Vergiftung und Moderator in Betracht gezogen werden müssen.

5.2 Langpulstargetstation (LPTS)

5.2.1 Die Geometriemodelle für die Langpulstargetstation LPTS und die verwendeten Parameter für die Simulationen

Die zweite Targetstation der ESS ist als Langpulstargetstation geplant (LPTS). Deren Vorteil ist eine hohe Neutronenfluß- und Neutronenstromdichte pro Puls verbunden mit einem breiteren nutzbaren Wellenlängenband als bei der Kurzpulstargetstation SPTS.

Bei der LPTS werden nur gekoppelte Moderatoren in Betracht gezogen, um möglichst hohe Intensitäten über einen längeren Zeitraum zu erreichen. Bei nachfolgend diskutierten Simulationen wird immer von einem Zweimoderatorkonzept ausgegangen (jeweils ober- bzw. unterhalb des Targets ein Moderator) mit Schwerpunkt auf einen kalten Wasserstoffmoderator (H_2) bei einer Moderatortemperatur von $T=20K$.

Da das Konzept einer hochintensiven Langpulsquelle in der ersten Referenzstudie zur ESS /ess1996/ nicht betrachtet wurde, mußten mittels Simulation zunächst einige grundlegende neutronenphysikalische Fragen zum Target-Moderator-Reflektor-Konzept der LPTS geklärt werden. Die verwendeten Geometriemodelle sind in den folgenden Abbildungen zusammengestellt, beginnend mit vereinfachten Geometrien - „Fluxtrap“ (Abb. 5.8) und „Wing“ (Abb. 5.9 und Abb. 5.10) - und darauf aufbauend eine erweiterte Wing-Geometrie (Abb. 5.11) mit vormodertem H_2 -Moderator bei 20K (Abb. 5.12).

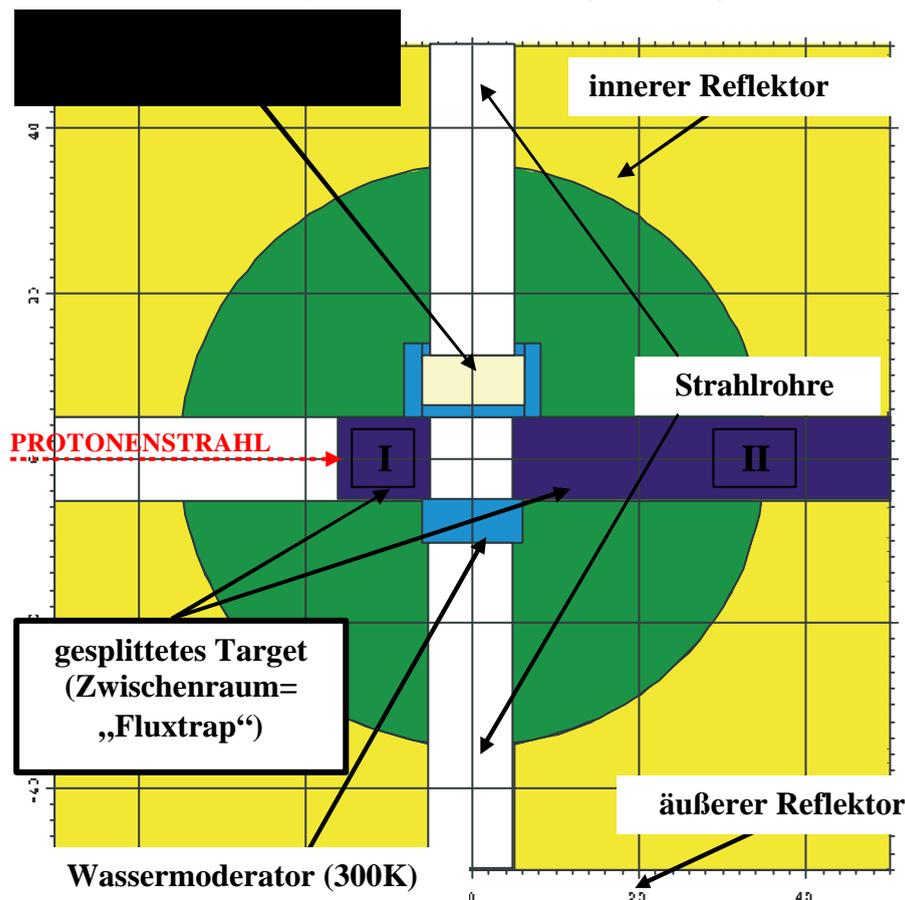


Abb. 5.8: Horizontaler Schnitt durch die mittleren Moderatorebenen in „Fluxtrap“-Geometrie(Ausschnitt); Skalierung in cm. Das Target besteht aus einem vorderen Target (I) und einem hinterem Target (II) mit „Fluxtrap“ und einem H_2O - bzw. vormodertem H_2 -Moderator

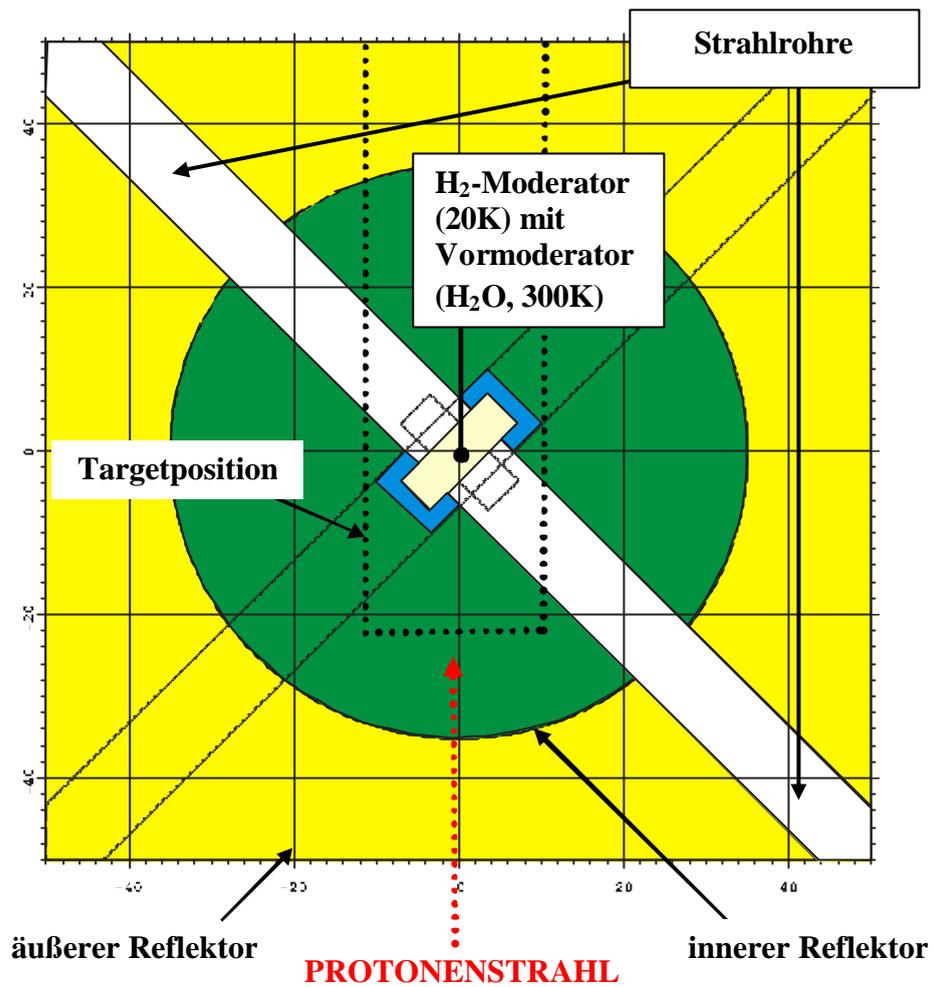


Abb. 5.9: Horizontaler Schnitt durch die Wasserstoffmoderatorebene in einer einfachen Wing-Geometrie mit Plattentarget (Ausschnitt); Skalierung in cm; gestrichelte Linie = Strahlrohr und Wassermoderator, gepunktete Linie = Targetposition

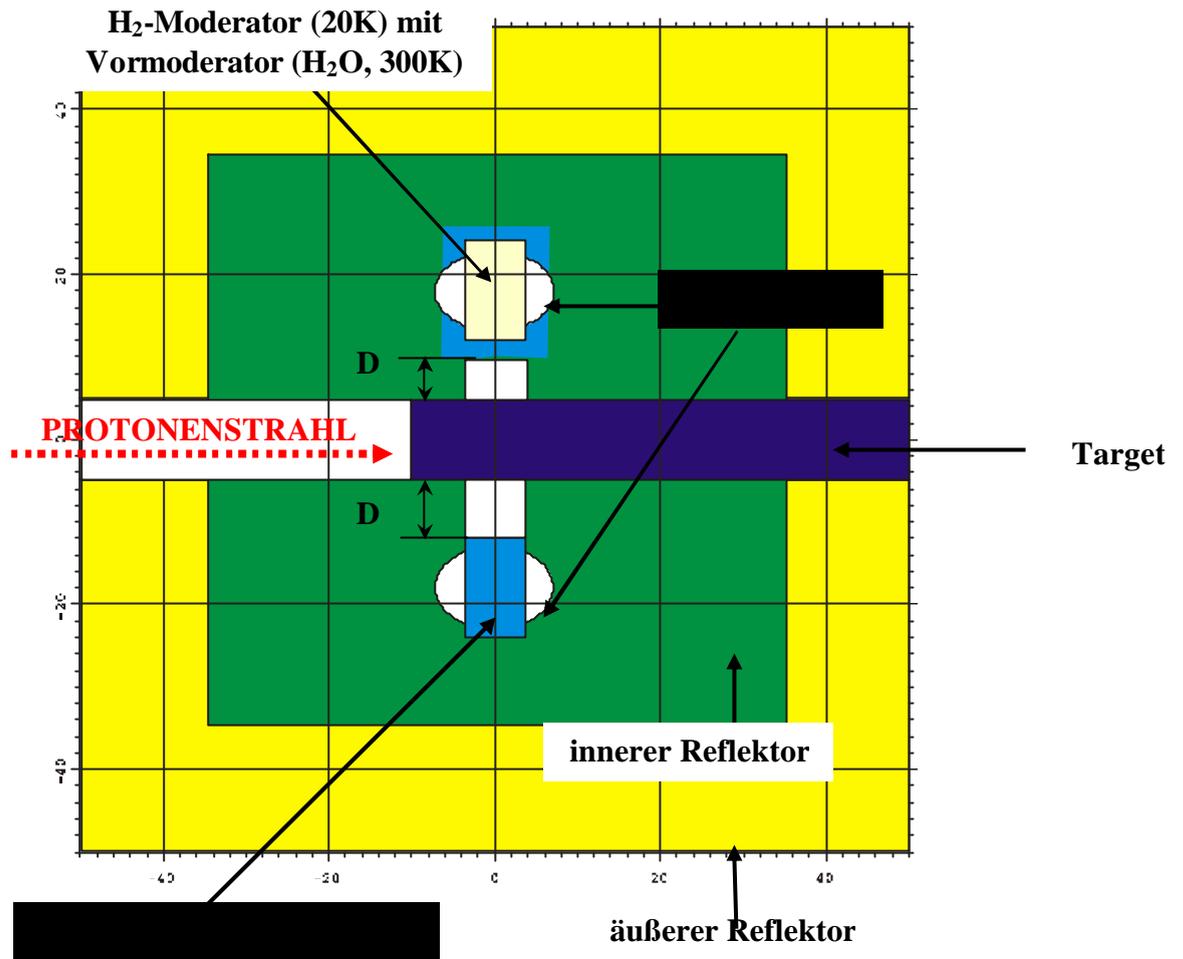


Abb. 5.10: Vertikaler Schnitt durch Targetmitte in der vereinfachten Wing-Geometrie (Ausschnitt); Skalierung in cm; zylindrische Strahlrohre mit $d=10\text{ cm}$ im 45° -Winkel zum Target; $D = 0\text{ cm}$ bzw. 7 cm : Moderatortober-/unterkante grenzt an Targetober-/unterkante bzw. ist ein Abstand von 7 cm

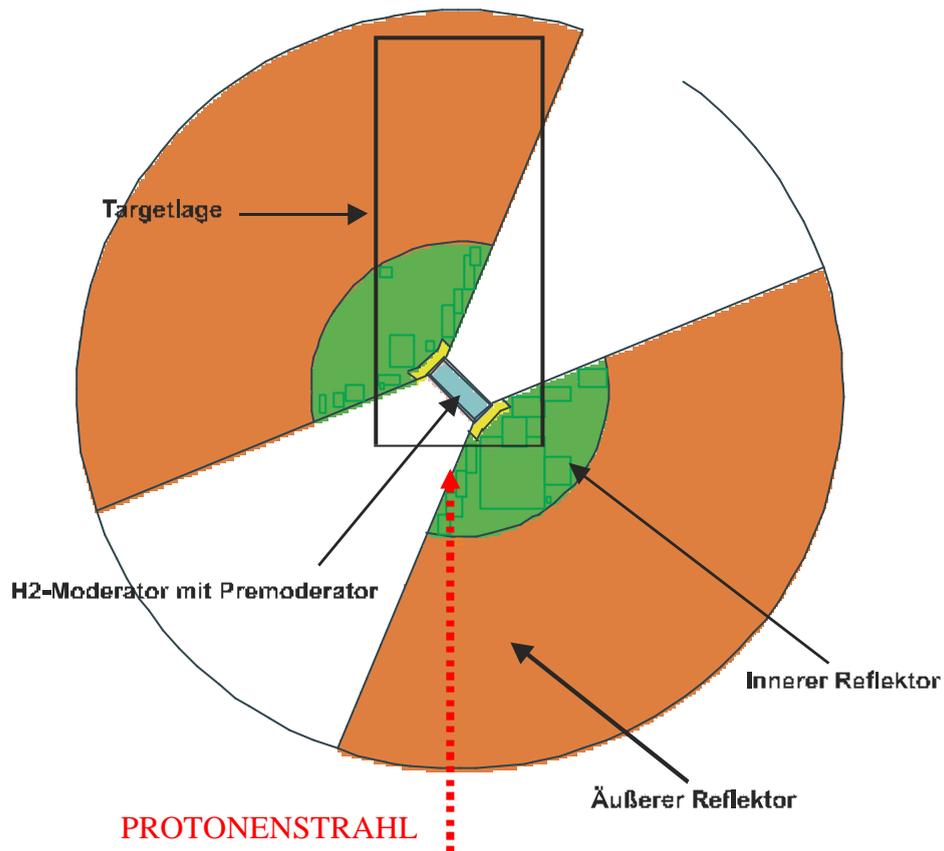


Abb. 5.11: Horizontaler Schnitt durch die mittlere Ebene des Wasserstoffmoderators in der erweiterten Wing-Geometrie mit großem Öffnungswinkel (45°) der Strahlrohre, eingezeichnet ist die Targetlage (schwarzes Rechteck); der Wasserstoffmoderator (blau) ist umgeben von einem Wasser-Vormoderator (gelb) und einer Aluminiumhülle (rosa, Wandstärke 5mm)

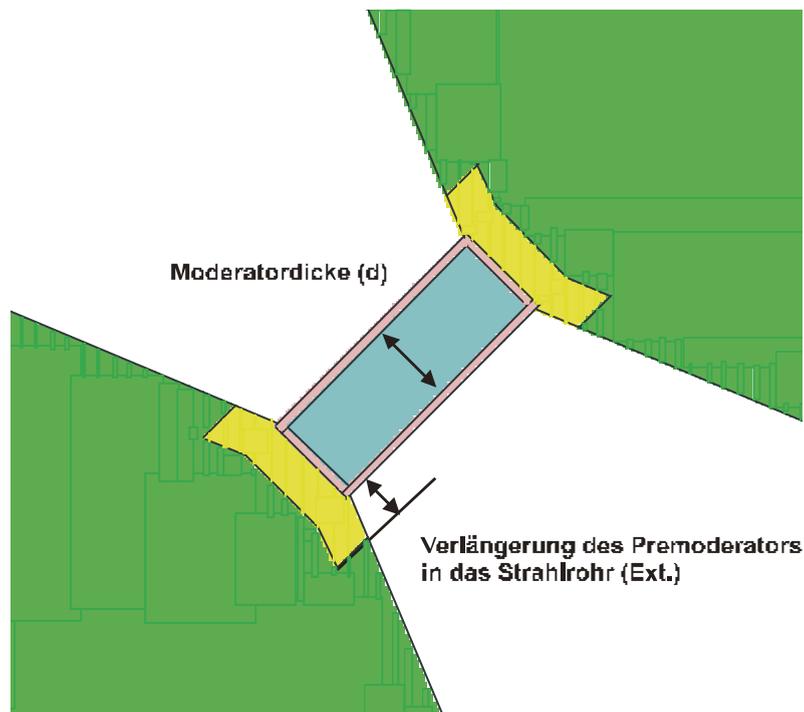


Abb. 5.12: Detaillierte Ansicht des ESS-LPTS-Wasserstoffmoderators

Verwendete Parameter für die Simulation:

Vereinfachte Fluxtrap-Geometrie (Abb. 5.8):

- **Target: Material:** Quecksilber (Hg), **Maße:** Splittarget: Target I BxHxT: 10x30x10cm; Target II BxHxT:10x30x80cm. **D:** Die Distanz zwischen Targetkante und nächster Moderatorwand variiert zwischen 0cm und 7cm. Der Raum zwischen beiden Targets ist die „Fluxtrap“, weil dort die höchste Neutronenflußdichte vorhanden. **Fluxtrapmaße:** BxHxT:10x10x30cm.
- **Moderatoren: Material:** ein Wassermoderator (H₂O, 300K) und ein Wasserstoffmoderator (para-H₂, 20K) mit einem Wasser-Vormoderator (H₂O, 300K). Die **Maße** aller Moderatoren sind: BxHxT: 15cmx12cmx5cm. Der Vormoderator hat eine Dicke von 2cm und eine Verlängerung in das Strahlrohr (siehe Abb. 5.3) von 2cm.
Beide Moderatoren befinden sich in „brillanter Position“ (siehe S. 36).
- **Reflektor: Material:** Sowohl innerer als auch äußerer Reflektor aus Blei (Pb), D₂O gekühlt (85Vol%Pb+15Vol%D₂O), **Maße:** innerer Reflektor: Zylinder mit Durchmesser 70cm und Höhe 70cm, äußerer Reflektor Zylinder mit Durchmesser 180cm und Höhe 180cm. Der innere Reflektor stellt eine Option für zukünftige Rechnungen dar. Der Reflektor wird von zwei zylinderförmigen Strahlrohren durchbrochen, die einen Durchmesser von 10cm besitzen und in einem Winkel von 45° zum Target angeordnet sind.

Vereinfachte Wing-Geometrie (Abb. 5.9 und 5.10):

- **Target: Material:** Quecksilber (Hg), **Maße:** 30cmx15cmx90cm. **D:** Die Distanz zwischen Targetkante und nächster Moderatorwand variiert zwischen 0cm und 7cm.
- **Moderatoren: Material:**, ein Wassermoderator (300K) und ein Wasserstoffmoderator (para-H₂, 20K) mit einem Wasser-Vormoderator (H₂O, 300K). **Maße:** BxHxT: 15cmx12cmx5cm. Der Vormoderator hat eine Dicke von 2cm und eine Verlängerung in das Strahlrohr von 2cm.
Beide Moderatoren befinden sich in „brillanter Position“ (siehe Kap. 4.3, S. 37).
- **Reflektor: Material:** Sowohl innerer als auch äußerer Reflektor Blei (Pb), D₂O gekühlt (85Vol%Pb+15Vol%D₂O), **Maße:** innerer Reflektor: Zylinder mit Durchmesser 70cm und Höhe 70cm, äußerer Reflektor: Zylinder mit Durchmesser 180cm und Höhe 180cm. Der innere Reflektor stellt eine Option für zukünftige Rechnungen dar. Der Reflektor wird von vier zylinderförmigen Strahlrohren durchbrochen, die einen Durchmesser von 10cm besitzen und im Winkel von 45° zum Target angeordnet sind.

Erweiterte Wing-Geometrie (Abb. 5.11 und Abb. 5.12):

- **Target** (SPTS-Target nach Abb. 5.1, Seite 38): *Material:* Quecksilber (Hg), *Maße:* 30cmx15cm(variiert)x90cm. *D:* Die Distanz zwischen Targetkante und nächster Moderatorwand ist fix und beträgt für die vorderen Moderatoren im Mittel 7cm.
- **Moderatoren:** *Material:* ein Wassermoderator (300K) und ein Wasserstoffmoderator (para-H₂, 20K) mit einem Wasser-Premoderator (H₂O, 300K). *Maße:* BxHxT: 15cmx12cmx5cm. Die Dicke des Wasserstoffmoderators wurde zunächst auf 5cm festgelegt und bei späteren Simulationen wurde dieses Maß variiert. Alle Moderatoren sind von einem Aluminiumbehälter mit einer Wandstärke von 5mm umgeben. Der Vormoderator hat eine Dicke von 2.5cm und zunächst eine Verlängerung in das Strahlrohr (siehe Abb. 5.3) von Ext.=2,5cm. Die gezeigten Ergebnisse sind für den Wasserstoffmoderator (T=20K) ermittelt worden, da in der LPTS der Schwerpunkt auf diesem liegt. Beide Moderatoren befinden sich in „brillanter Position“ (siehe Kap. 4.3, S.37).
- **Reflektor:** *Material:* Sowohl innerer als auch äußerer Reflektor Blei (Pb), D₂O gekühlt (85Vol%Pb+15Vol%D₂O), *Maße:* innerer Reflektor: Zylinder mit Durchmesser 70cm und Höhe 70cm, äußerer Reflektor Zylinder mit Durchmesser 180cm und Höhe 180cm. Der innere Reflektor stellt eine Option für weitere Simulationen dar, in denen verschiedene Reflektormaterialkombinationen betrachtet wurden. Der Reflektor wird von vier Strahlrohröffnungen durchbrochen, die einen Öffnungswinkel von 45° besitzen und um 45° zum Target versetzt sind.

Die für diese Simulationen verwendeten Strahlparameter sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst:

Strahlparameter	LPTS
Strahlenergie	1.334 GeV
Strahlprofil	elliptisch/gaußverteilt Abschneidung ($\pm x$)=10cm= 3σ Abschneidung ($\pm y$) =3cm = 3σ
Mittlerer Strom	3.75 mA
Protonenanzahl	2.34x10 ¹⁶ Protonen/Sekunde bzw. 1.404x10 ¹⁵ Protonen/Puls
Pulslänge und Frequenz	2.0 ms/16.667 Hz

Tabelle 5.6: Protonenstrahlparameter LPTS /ESS2002/

5.2.2 Berechnete Neutronenparameter und Normierung für die LPTS

In den Simulationen wurden die thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichten $\phi_{th}(t)$ und die thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichten $J_{th}(t)$ ermittelt. Letztere sind Mittelwerte über die gesamte sichtbare Fläche (180cm^2) und auf den Raumwinkel (per sr) normiert.

Normierung der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichte $F_{th}(t)$:

$$\Phi_{th}(t) = \bar{f}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot 1.404 \cdot 10^{15} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2} \right]$$

Normierung der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte $J_{th}(t)$:

$$J_{th}(t) = \bar{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot \frac{1.404 \cdot 10^{15}}{180 \cdot 2 \cdot p} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}} \right]$$

Normierung der mittleren Neutronenstromdichten $J(I)$ in Abhängigkeit der Wellenlänge:

$$J(I) = \bar{J}(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot \frac{2.34 \cdot 10^{16}}{180 \cdot 2 \cdot p \cdot \Delta I} \left[\frac{n}{s \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{\AA}} \right]$$

Es wurden folgende Parameter bei der Normierung miteinbezogen:

Die Protonenzahl pro Puls:	$1.404 \cdot 10^{15}$
Die Pulsfrequenz:	16,666 Hz
Die mittlere Protonenzahl:	$1.404 \cdot 10^{15} \cdot 16,66 = 2,34 \cdot 10^{16}$ p/s
Die Moderatoroberfläche:	180 cm^2
Das jeweilige Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ in der Einheit \AA	

5.2.3 Simulationsergebnisse für ESS-LPTS-Moderatoren

Die Optimierung der LPTS bezüglich der Moderatorleistung zielt auf einen maximalen Neutronenausfluß aus der Moderatoroberfläche und einen schnelles Abklingen des Neutronenpulses ab. Maximaler Neutronenausfluß bedeutet Verwendung von gekoppelten Moderatoren. Der Schwerpunkt der Optimierung liegt auf kalten Moderatoren - H_2 bei $T=20\text{K}$ - mit Vormoderator, d.h. im langwelligen Bereich.

Für eine erste Abschätzung, in welcher Moderatoranordnung höhere Intensitäten erzielt werden, wurden zunächst die Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten einer Fluxtrap-Anordnung mit einer einfachen Wing-Anordnung verglichen. Beide Geometrien sind aus Rechenzeitgründen stark vereinfacht worden, so sind z.B. keine Strukturmaterialien enthalten.

Die Fluxtrap-Anordnung kann zu Intensitätssteigerungen bis zum 1.3-1.4fachen der Wing-Anordnung führen /kiy1990/. Für die ESS erschien letztendlich die Fluxtrapgeometrie als technisch zu kompliziert, so daß im weiteren Verlauf die Wing-Geometrie für eine nähere Betrachtung erweitert und als Basis für eine Optimierung bezüglich maximaler thermischer Neutronenstromdichten in zeitlicher und spektraler Verteilung verwendet wurde.

5.2.3.1 Vergleich zwischen Fluxtrap- und Wing-Anordnung anhand der thermischen Neutronenflußdichten und der mittleren Neutronenstromdichten

Zunächst wurden für die Langpulstargetstation die Ergebnisse von zwei einfachen Geometriemodellen miteinander verglichen. Zum einen für die auch in der SPTS verwendete Wing-Anordnung, bei der ober- und unterhalb des Targets die Moderatoren um je 45° zur Protonenstrahlachse versetzt sind und auf jeden Moderator zwei Strahlrohre gerichtet sind. Zum anderen für die Fluxtrap-Anordnung, bei der das Target hochkant steht und zweigeteilt ist. Im Freiraum zwischen dem vorderen und dem hinteren Target - der sogenannten „Fluxtrap“ (Flußfalle) - liegt ein Maximum des Neutronenausflusses vor. Seitlich davon wurden die beiden Moderatoren angeordnet. Auf jeden Moderator schaut nur ein Strahlrohr. Als Protonenpulslänge wurde zunächst 2.5ms angenommen.

Abb. 5.13 und Abb. 5.14 zeigen die thermischen Neutronenflußdichten im Wasserstoffmoderator für die Distanzen $D=0\text{cm}$ und $D=7\text{cm}$ zwischen Moderator und Target als Funktion der Zeit.

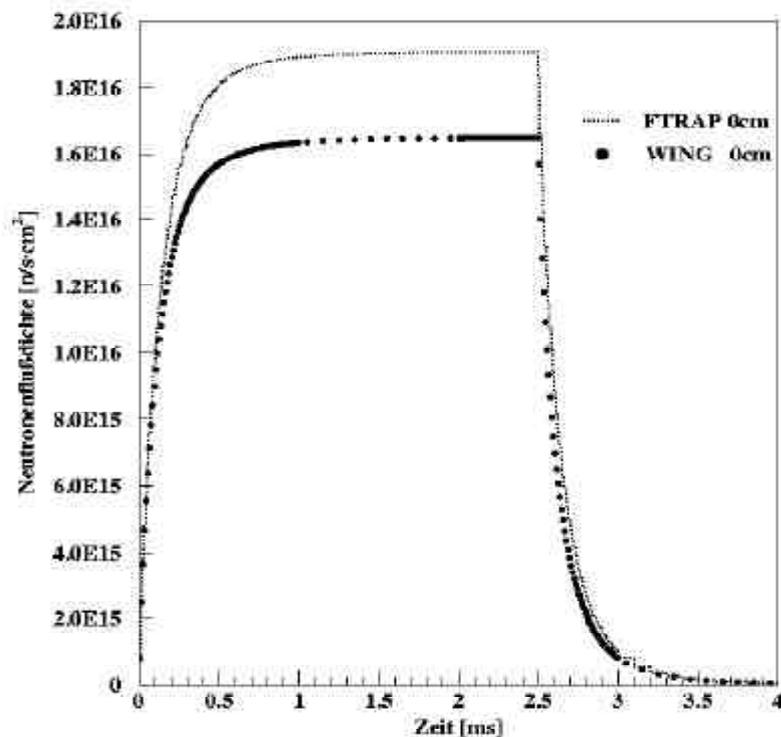


Abb. 5.13: Vergleich der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichten im Wasserstoffmoderator für Fluxtrap- und vereinfachter Wing-Geometrie für $D= 0\text{cm}$ zwischen Moderator und Target

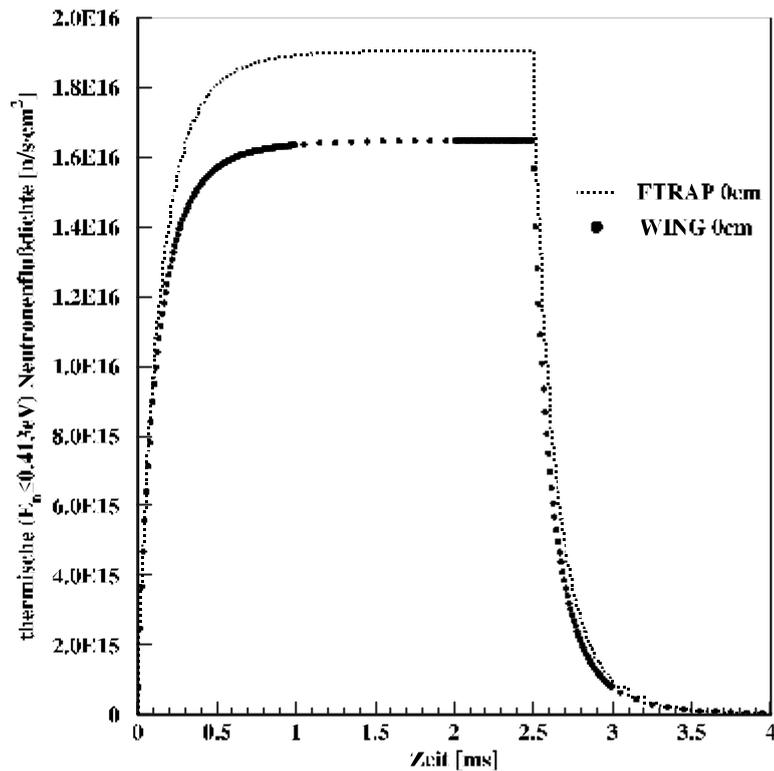


Abb. 5.14: Vergleich der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichten im Wasserstoffmoderator für Fluxtrap- und vereinfachter Wing-Geometrie für $D = 7\text{cm}$ zwischen Moderator und Target

Bei gleichem Abstand zwischen Target und Moderator zeigt die Fluxtrap-Anordnung gegenüber der Wing-Anordnung einen Gewinn von maximal $\sim 20\%$, allerdings für die Flußdichte im Moderator.

In Abb. 5.15 sind die mittleren Neutronenstromdichten für die vereinfachte Wing-Anordnung bei einer Distanz von 7cm und für die Fluxtrap-Anordnung bei einer Distanz von 0cm zwischen Moderator und Target als Funktion der Wellenlänge aufgetragen, d.h. bei den Abständen zwischen Moderator und Target, bei denen die höchsten Intensitäten ermittelt wurden.

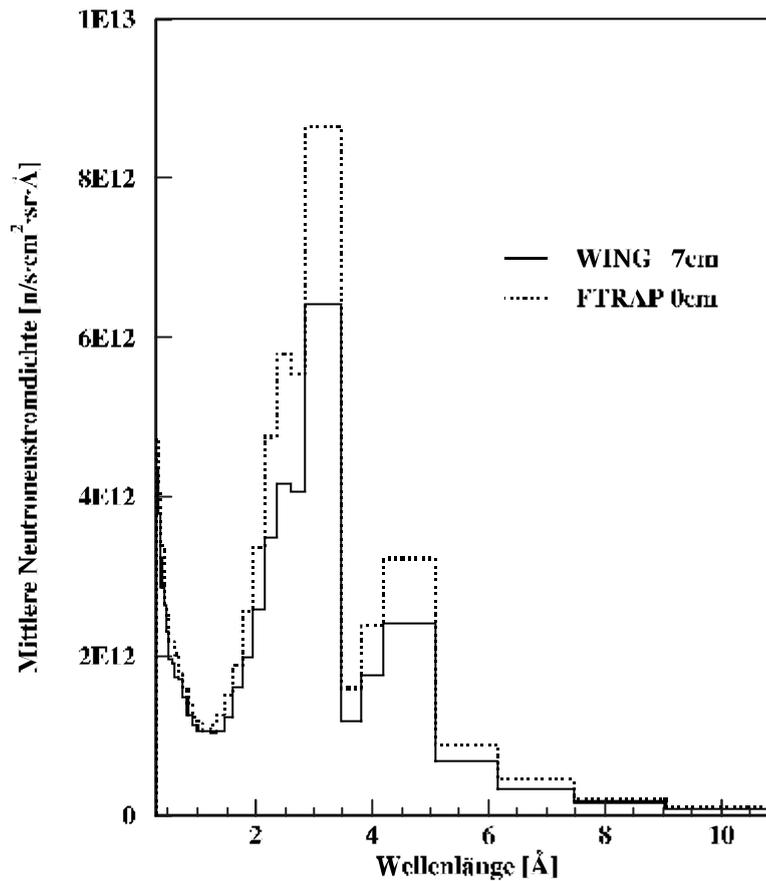


Abb. 5.15: Mittlere Neutronenstromdichten des Wasserstoffmoderators in vereinfachter Wing- und Fluxtrap-Geometrie als Funktion der Wellenlänge

Bei der Fluxtrap-Anordnung mit Moderatoren direkt am Target ergibt sich für den Strom aus der Moderatoroberfläche im Wellenlängenbereich zwischen 3 und 4 Å ein Gewinn von ca. 35% verglichen mit der Wing-Anordnung. Allerdings sind einige Einwände zu nennen, die gegen die Fluxtrap- und für die Wing-Anordnung sprechen:

- Ein Abstand von 0cm zum Target - wie er hier für den Fluxtrap-Moderator als Optimum gezeigt wurde - ist nicht realisierbar, da ein kalter Moderator einen größeren Container mit Vakuumkammern und Zuleitungen benötigt. Technisch realistisch ist ein Abstand von $D=7\text{cm}$. Der gezeigte Intensitätsgewinn für die Fluxtrap-Anordnung nur ein sehr hypothetischer und dient dazu, Unterschiede zwischen Wing- und Fluxtrap-Anordnung zu verdeutlichen.
- Ein zweigeteiltes Quecksilbertarget ist komplizierter zu realisieren, insbesondere Kühlung und Zu-/Ableitungen erschweren die technische Realisierung.
- In der Fluxtrap-Geometrie ist jeweils nur eine Fläche der Moderatoren nutzbar, so daß die Anzahl der möglichen Instrumente stark eingeschränkt ist im Vergleich zur Wing-Geometrie

Der Intensitätsgewinn der Fluxtrap-Anordnung für die ESS-LPTS-Moderatoren wiegt nicht die enormen konstruktionstechnischen Probleme auf. Demnach ist eine Wing-Geometrie für die ESS-Langpulstargetstation zu favorisieren und das dort vorhandene Potential zum Intensitätsgewinn - z.B. durch Optimierung eines Vormoderators beim Wasserstoffmoderator - zu nutzen.

5.2.3.2 Vergleich zwischen einfacher und erweiterter Wing-Anordnung anhand der thermischen Neutronenfluß dichten und der thermischen Neutronenstromdichten

Die vereinfachte Wing- Anordnung der Moderatoren wurde um folgende Punkte erweitert:

- Das erweiterte System enthält das SPTS-Target in Form und Material (s. Abb. 5.1, Seite 38).
- Der Premoderator besitzt nun eine Dicke von 2.5cm und eine Verlängerung ins Strahlrohr (Ext.) von 2.5cm.
- Ersetzen der zylindrischen Strahlrohre durch trichterförmige mit einem Öffnungswinkel von 45° (siehe Abb. 5.11)

Die vereinfachte Wing-Geometrie stellt ein geschlossenes, ungestörtes System dar, bei dem der Moderator nahezu gänzlich vom Reflektormaterial umgeben ist. Aus den zylindrischen, sehr kleinen Strahlrohren ($d=10\text{cm}$) wurden bei der erweiterten Wing-Anordnung trichterförmige Strahlrohre mit einem Öffnungswinkel von 45° . Dies reduziert stark die Menge des Reflektormaterials, die den Moderator umgibt, und damit den Neutronenausfluß. Es liegt ein „gestörtes“ System vor, daß durch die größeren Öffnungswinkel, die den Raum für die Strahlrohre zu den Experimentiereinrichtungen mitberücksichtigen, realistisch ist. Inwieweit die Störung Neutronenfluß- und Neutronenstromdichte beeinflusst, wird in Abb. 5.16 gezeigt:

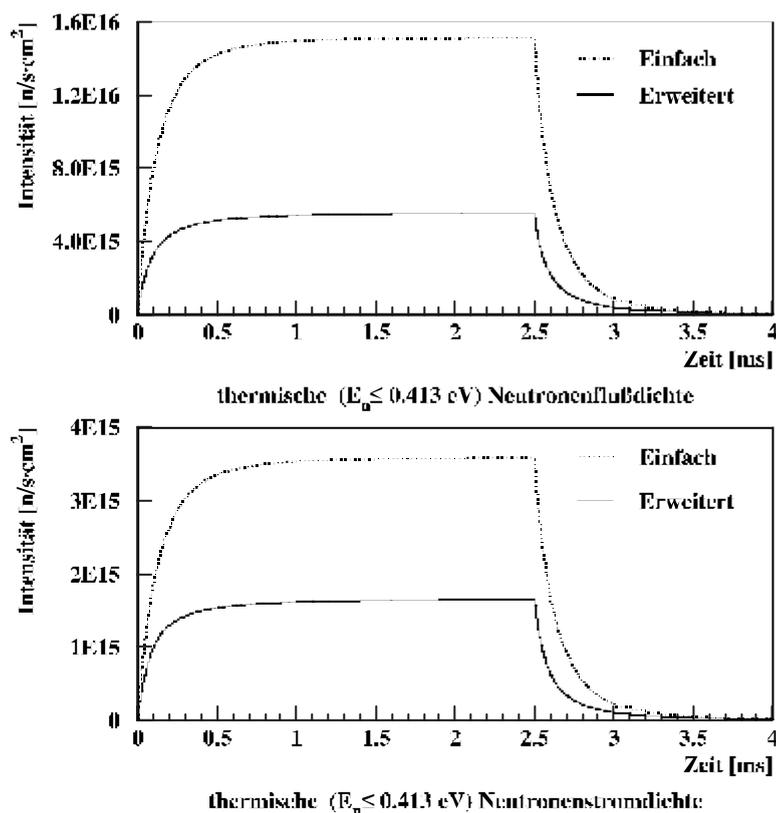


Abb. 5.16: Vergleich der thermischen ($E_n = 0.413 \text{ eV}$) Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten eines vormoderierten Wasserstoffmoderators (H_2 bei $T=20\text{K}$) in der einfachen und in der erweiterten Wing-Anordnung für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einer Pulslänge von 2,5 ms, die Neutronenstromdichte gilt für einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Die erweiterte Wing-Geometrie liefert nur noch die Hälfte der Neutronenstromdichte aus dem Moderator und wurde nun als Basis für eine Optimierung bezüglich der Neutronenstromdichten und Abklingzeit des Neutronenpulses genommen.

5.2.3.3 Thermische Neutronenflußdichten und thermische Neutronenstromdichten für verschiedene Abstände zwischen Target und Moderatoren in der erweiterten Wing-Geometrie

Im Folgenden wurden jeweils verschiedene Parameter verändert, um deren Einfluß auf die Neutronenintensität zu ermitteln. Als Pulslänge wurde für alle weiteren Berechnungen die von Nutzern als realistisch angenommene Zeit von 2ms angenommen. Der Zerfall des Pulses wird im Wesentlichen vom Reflektormaterial beeinflusst. Auf diesen Punkt wird im Kapitel 5.2.3.7 eingegangen.

Werden die Moderatoren direkt auf dem Target platziert, d.h. Distanz D zwischen Target und Moderator gleich 0cm, so ist der Neutronenverlust am geringsten. In einem realistischen System ist dies jedoch nicht möglich, weil die Moderatoren aus mehreren Hüllen mit Kühlkreisläufen, Zu- und Ableitungen bestehen. Außerdem ist die Aktivierung der Moderatoren durch hochenergetische Neutronen und Protonen größer, je näher man an das Target kommt, so daß der Austausch von Moderatoren in einem kleineren Zeitintervall stattfinden muß und die Erwärmung durch Energiedeposition ist größer.

Wird die Distanz D erhöht, so kann unter Umständen aus dem Target die Ausflußverteilung der Neutronen aus dem Target besser genutzt werden.

Abb. 5.17 zeigt die thermischen Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten des vormoderierten Wasserstoffmoderators bei einer Distanz D zwischen Target und Moderator von 4.5cm, 7cm und 12cm. Für den Wassermoderator sind die Ergebnisse ähnlich.

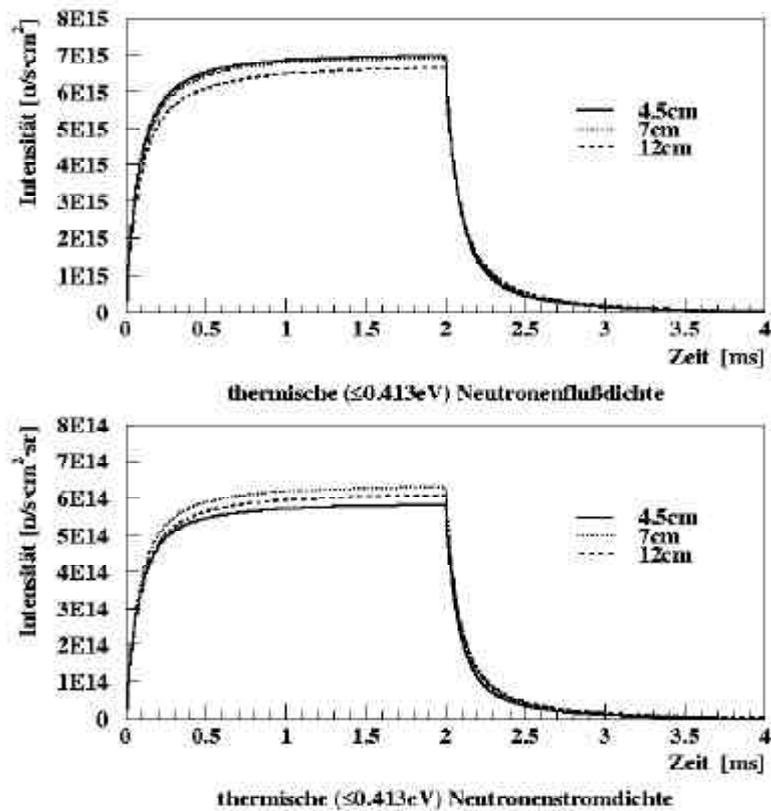


Abb. 5.17: Einfluß der Distanz D zwischen Moderator und Target auf thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten des vormodierten Wasserstoffmoderators (H_2 bei $T=20\text{K}$) in der erweiterten Wing-Anordnung für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und für die Neutronenstromdichte in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Ein Optimum liegt bei einer Distanz zwischen Moderator und Target von $D=7\text{cm}$ vor. Dieser Abstand wurde für die weiteren Berechnungen als fixer Parameter verwendet, weil er auch aus technischer Sicht realistisch erscheint.

5.2.3.4 Thermische und mittlere Neutronenstromdichten für verschiedene Moderatoricken des kalten Wasserstoffmoderators

Im weiteren Schritt wurde die Moderatoricke d verändert. Insbesondere für einen Moderator mit 100% para-Wasserstoff führt eine größere Dicke d zu mehr Intensität (siehe Abb. 6.1, Seite 73). Die Verlängerung des Vormoderators ins Strahlrohr (Ext.) mit 2.5cm wurde beibehalten. Die Detailansicht des Wasserstoffmoderators befindet sich in Abb. 5.12, Seite 54.

In Abb. 5.18 und 5.19 sind Neutronenstromdichten bei verschiedenen Moderatoricken (Dicke des Vormoderators: 2.5cm) als Funktion der Zeit und der Wellenlänge für verschiedene Moderatoricken d dargestellt.

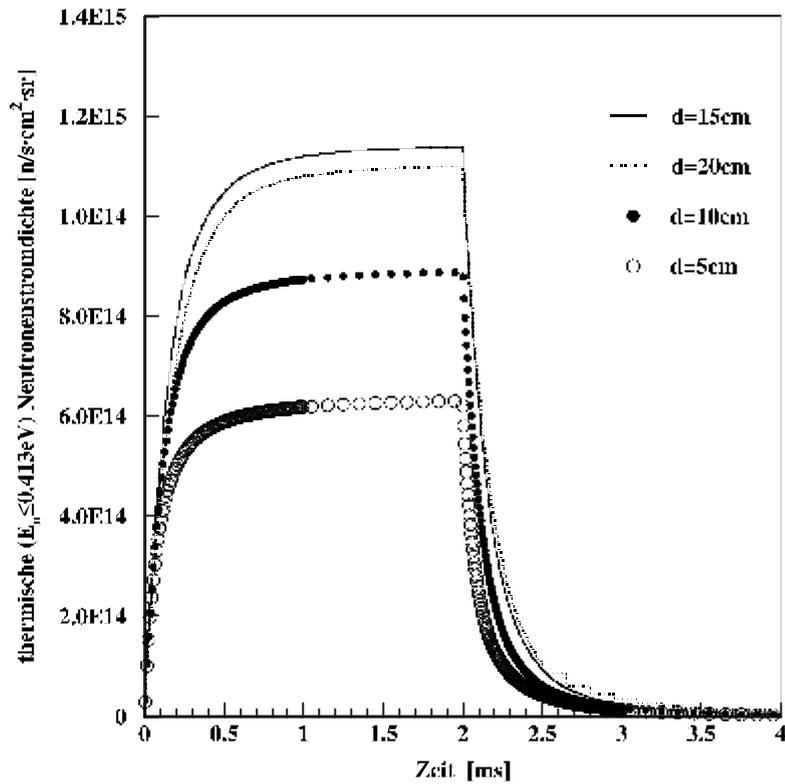


Abb. 5.18: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte für verschiedene Moderatorsticken beim ESS-LPTS-Wasserstoffmoderator für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

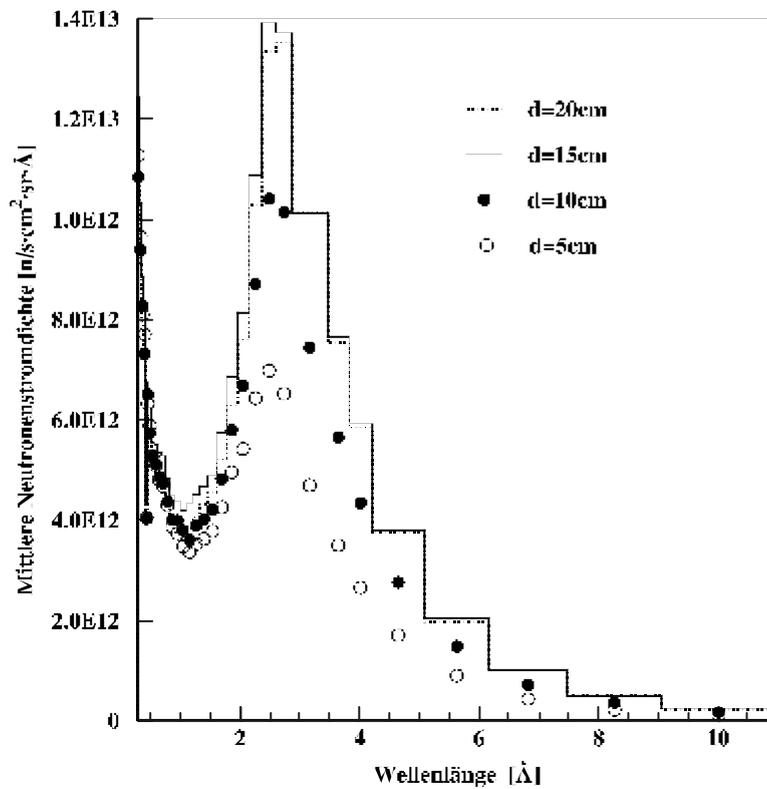


Abb. 5.19: Mittlere Neutronenstromdichten für verschiedene Moderatorsticken in Abhängigkeit der Wellenlänge für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Deutlich ist zu sehen, dass eine größere Dicke d beim para-Wasserstoffmoderator eine um bis zu ~35% gesteigerte thermische Neutronenstromdichte gegenüber einem 5cm dicken Moderator erzeugt, wie er bei der SPTS in der Basisgeometrie verwendet wurde. Im Wellenlängenspektrum ist ein Intensitätsmaximum bei ca. 3\AA (9meV) zu sehen.

Das Optimum ist bei ca. 15cm Dicke erreicht. Beim Vergleich von einem 10cm dicken mit einem 15cm dicken Moderator wird zwar um ca. 10% weniger Intensität erreicht, aber das Volumen des Moderatorinnenraums ist auch nur $2/3$ so groß. Das bedeutet einen wesentlich niedrigeren Kühlaufwand. Deshalb wurde ein 10cm dicker Moderator für die weiteren Berechnungen verwendet.

5.2.3.5 Thermische und mittlere Neutronenstromdichten für verschiedene Verlängerungen des Vormoderators in das Strahlrohr

Im Folgenden wurde die Verlängerung des Premoderators in die Stahlrohre (Ext.) bei der fixen Moderator dicke $d=10\text{cm}$ und der fixen Vormoderatordicke 2.5cm variiert. Abb. 5.20 zeigt die sich ergebenden thermischen Neutronenstromdichten, Abb. 5.21 die ermittelten mittleren Neutronenstromdichten:

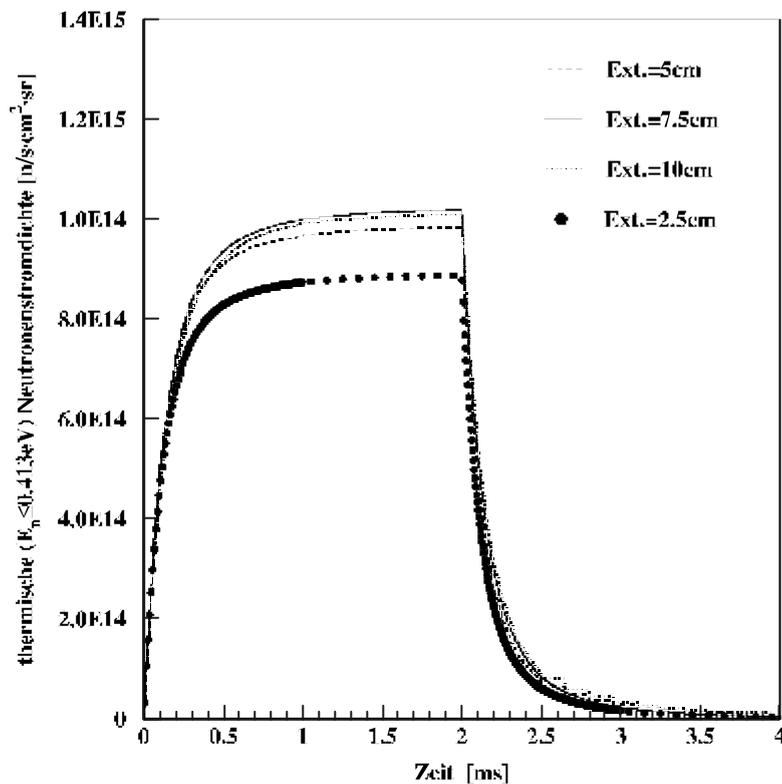


Abb. 5.20: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichten für den ESS-LPTS-Wasserstoff-Moderator mit Dicke $d=10\text{cm}$ bei verschiedenen Vormoderatorgrößen (Vormoderatordicke 2.5cm) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

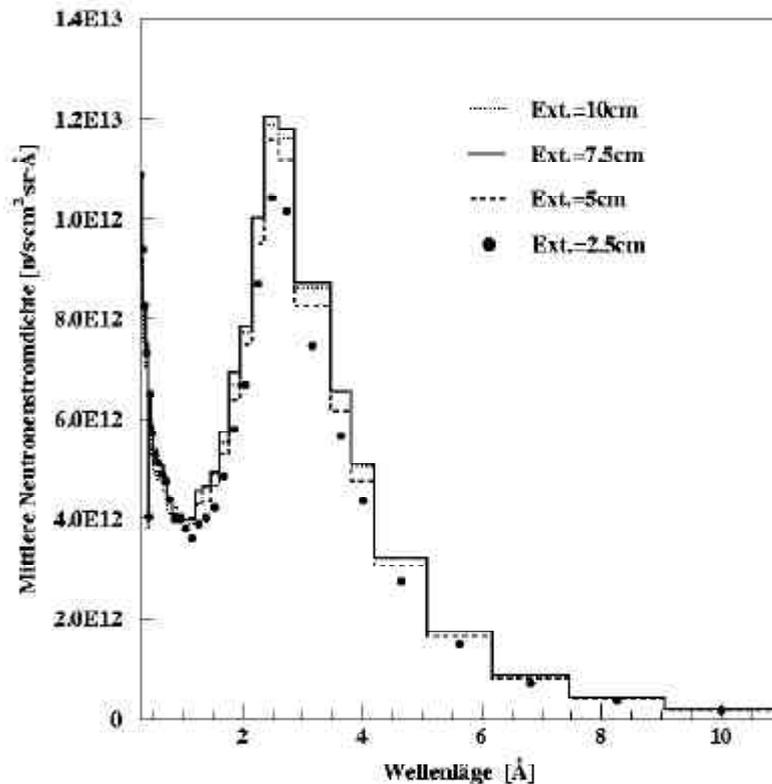


Abb. 5.21: Mittlere Neutronenstromdichten für den ESS-LPTS-Wasserstoff-Moderator mit Dicke $d=10\text{cm}$ bei verschiedenen Vormoderatorgrößen (Vormoderatordicke 2.5cm) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Durch eine größere Extension werden mehr Neutronen vormodert, die in den Moderator strömen. Der Gewinn an Intensität mit $\text{Ext.}=10\text{cm}$ gegenüber $\text{Ext.}=7.5\text{cm}$ ist nur marginal. Da die Länge von 10cm auch einen höheren technischen Aufwand bedeuten würde, ist $\text{Ext.}=7.5\text{cm}$ ein guter Kompromiß. Eine längere Ausdehnung des Premoderators in die Strahlrohre führt zu einem etwas langsameren Abklingen des Neutronenpulses, aber es ist eine Intensitätssteigerung von ca. 60% gegenüber einer Extension von $\text{Ext.}=2.5\text{cm}$ zwischen 2 und 4Å möglich.

5.2.3.6 Numerische Resultate für die Moderatorkonzepte der LPTS

In Tabelle 5.7 sind sowohl die Spitzenneutronenstromdichten J_{\max} als auch die mittleren Neutronenstromdichten J_{mit} beider Moderatortypen für Wellenlängen von 0,4 bis 10 Å zusammengestellt. In Tabelle 5.8 sind Werte für die thermischen Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten aufgelistet.

LPTS-Moderatortyp	Wellenlänge λ					
Wasser d=5cm	0.468 Å	1 Å	2 Å	4 Å	5.6 Å	10 Å
Maximale Neutronenstromdichte J_{\max} [n/s·cm ² ·str·Å]	$2.43 \cdot 10^{14}$	$4.21 \cdot 10^{14}$	$8.18 \cdot 10^{13}$	$3.96 \cdot 10^{12}$	-	-
Mittlere Neutronenstromdichte J_{mit} [n/s·cm ² ·str·Å]	$8.10 \cdot 10^{12}$	$1.41 \cdot 10^{13}$	$2.73 \cdot 10^{12}$	$1.32 \cdot 10^{11}$	-	-
para-H₂+Vormod. d=5cm, Ext. 2.5cm	0.468 Å	1 Å	2 Å	4 Å	5.6 Å	10 Å
Maximale Neutronenstromdichte J_{\max} [n/s·cm ² ·str·Å]	$1.76 \cdot 10^{14}$	$1.03 \cdot 10^{14}$	$1.64 \cdot 10^{14}$	$7.94 \cdot 10^{13}$	$2.65 \cdot 10^{13}$	$3.16 \cdot 10^{12}$
Mittlere Neutronenstromdichte J_{mit} [n/s·cm ² ·str·Å]	$5.97 \cdot 10^{12}$	$3.47 \cdot 10^{12}$	$5.39 \cdot 10^{12}$	$2.70 \cdot 10^{12}$	$9.05 \cdot 10^{11}$	$1.05 \cdot 10^{11}$
para-H₂+Vormod. d=10cm, Ext. =7.5cm	0.468 Å	1 Å	2 Å	4 Å	5.6 Å	10 Å
Maximale Neutronenstromdichte J_{\max} [n/s·cm ² ·str·Å]	$1.72 \cdot 10^{14}$	$1.19 \cdot 10^{14}$	$2.35 \cdot 10^{14}$	$1.52 \cdot 10^{14}$	$5.24 \cdot 10^{13}$	$5.96 \cdot 10^{12}$
Mittlere Neutronenstromdichte J_{mit} [n/s·cm ² ·str·Å]	$5.72 \cdot 10^{12}$	$3.98 \cdot 10^{12}$	$7.86 \cdot 10^{12}$	$5.08 \cdot 10^{12}$	$1.74 \cdot 10^{12}$	$2.00 \cdot 10^{11}$

Tabelle 5.7: Numerische Werte der Simulationsergebnisse bei verschiedenen Wellenlängen für den ESS-LPTS-Wassermoderator ($T=300\text{K}$) und zwei verschiedenen vormoderierten ESS-LPTS-Wasserstoffmoderatoren ($T=20\text{K}$) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Moderatortyp	Neutronenflußdichte [n/cm ² ·s]		Neutronenstromdichte [n/cm ² ·s·sr]	
	$f_{\text{th max}}$	$f_{\text{th mit}}$	$J_{\text{th max}}$	$J_{\text{th mit}}$
Wasser ($T=300\text{K}$)	$9.0 \cdot 10^{15}$	$3.0 \cdot 10^{14}$	$5.0 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{13}$
vormoderierter para-Wasserstoff ($T=20\text{K}$)	$7.0 \cdot 10^{15}$	$2.3 \cdot 10^{14}$	$6.3 \cdot 10^{14}$	$2.1 \cdot 10^{13}$

Tabelle 5.8: Thermische Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten für die ESS-LPTS-Moderatoren (Moderatordicken $d=5\text{cm}$, $\text{Ext.}=2,5\text{cm}$) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und für die Neutronenstromdichte in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

5.2.3.7 Thermische Neutronenstromdichten für einen vormodernierten Wasserstoffmoderator mit verschiedenen Reflektoren

Die Höhe der Intensität von Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten wird unter anderem auch maßgeblich vom Reflektormaterial beeinflusst. Dieses bestimmt auch den Zerfall des Neutronenpulses, der bei der Langpulsquelle in möglichst kurzer Zeit nach dem Ende des Protonenpulses von 2ms erfolgen sollte.

Abb. 5.22 zeigt die thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte für einen Reflektor aus Beryllium, aus Blei mit 15 Vo.% D_2O -Anteil und aus Graphit in der Basiskonfiguration des Wasserstoffmoderators ($d=5\text{cm}$, $\text{Ext.}=2.5\text{cm}$).

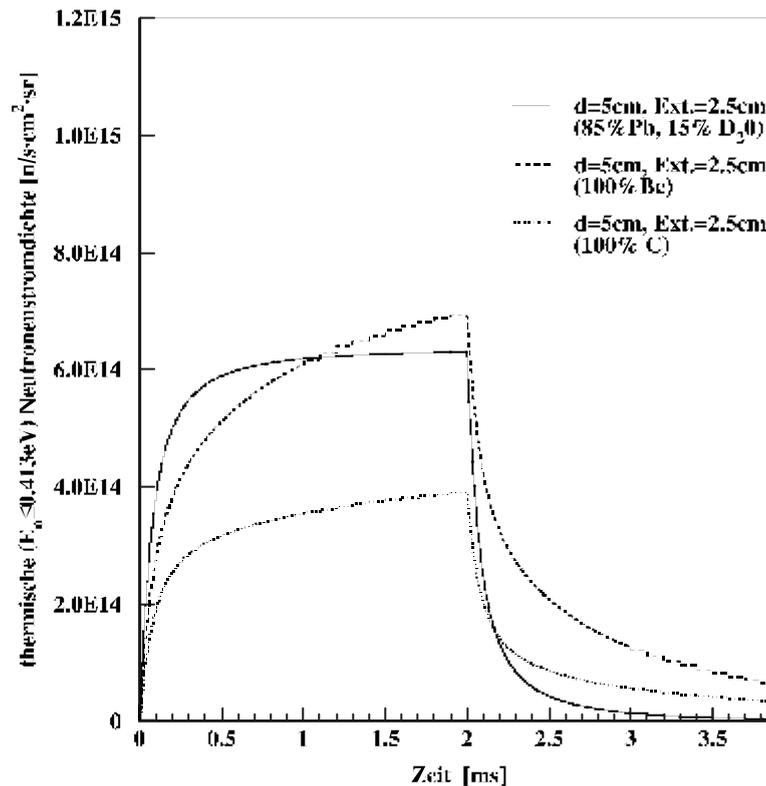


Abb. 5.22: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte des Wasserstoffmoderators ($d=5\text{cm}$, $\text{Ext.} = 7.5\text{cm}$) für verschiedene Reflektormaterialien für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Deutlich ist zu sehen, dass für die Basiskonfiguration mit einer Moderatordicke $d=5\text{cm}$ und einer Extension $\text{Ext.}=2.5\text{cm}$ mit einem Berylliumreflektor ein Intensitätsgewinn von ca. 35% im Maximum gegenüber dem Bleireflektor zu erzielen ist, allerdings klingt der Neutronenpuls nach 2ms deutlich langsamer ab. Mit einem Graphitreflektor wird deutlich weniger Intensität erreicht und ebenso ein langsames Abklingen des Neutronenpulses nach 2ms.

Abb. 5.23 zeigt die thermische Neutronenstromdichte des Wasserstoffmoderators mit einem Blei- und einem Berylliumreflektor, aber bei einer Moderatordicke von $d=10\text{cm}$ und einer Verlängerung des Vormoderators in das Strahlrohr von $\text{Ext.}=7.5\text{cm}$.

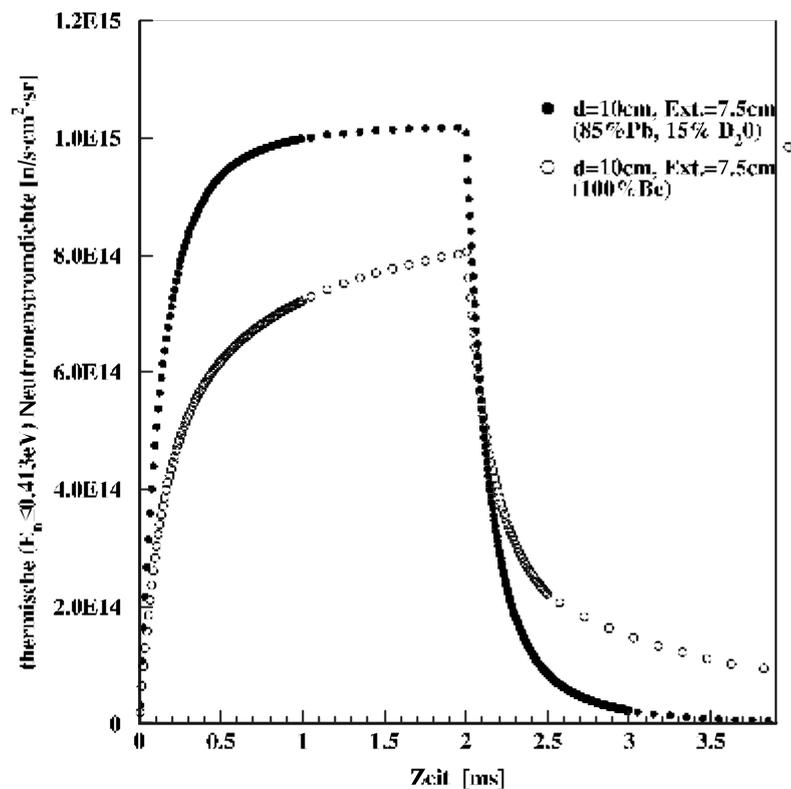


Abb. 5.23: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte des Wasserstoffmoderators ($d=5\text{cm}$, $\text{Ext.} = 7.5\text{cm}$) für verschiedene Reflektormaterialien für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Bei diesen Moderator-/Vormoderatordimensionen zeigt das Beryllium-reflektierte System eine geringere Intensität als das Blei-reflektierte. Der Neutronenpuls mit dem Berylliumreflektor klingt langsamer ab. Eine Übersicht über das zeitliche Abklingen der Intensität des Neutronenpulses $300\mu\text{s}$ bzw. 1ms nach Ende des Protonenpulses von 2ms Dauer wird in den Resultaten in Tabelle 5.9 zusammengestellt. Im Zeitbereich von $0,5\text{-}2\text{ms}$ zeigt der Neutronenpuls mit Pb-Reflektor ein deutlich konstanteres Verhalten der Intensität, was auch für die Nutzung wünschenswert ist.

Reflektormaterial H ₂ -Moderatordicke <i>d</i> Vormoderator: Extension <i>Ext.</i>		Maximale Neutronen- stromdichte [n/s/cm ² sr]	Neutronen- stromdichte <u>300 μs</u> nach Pulsende		Neutronen- stromdichte <u>1ms</u> nach Pulsende	
			[n/s/cm ² sr]	[% vom Max.]	[n/s/cm ² sr]	[% vom Max.]
Abb. 5.22	85%Pb, 15% D₂O d=5cm, Ext. =2.5cm	$6.3 \cdot 10^{14}$	$8.2 \cdot 10^{13}$	13%	$1.2 \cdot 10^{13}$	1.9%
	100% Be d=5cm, Ext. =2.5cm	$6.9 \cdot 10^{14}$	$2.7 \cdot 10^{14}$	39%	$1.2 \cdot 10^{14}$	18%
	100% C d=5cm, Ext. =2.5cm	$3.9 \cdot 10^{14}$	$1.1 \cdot 10^{14}$	29%	$5.4 \cdot 10^{13}$	14%
Abb. 5.23	85%Pb, 15% D₂O d=10cm, Ext. =7.5cm	$1.1 \cdot 10^{15}$	$1.8 \cdot 10^{14}$	18%	$2.0 \cdot 10^{13}$	2%
	100% Be d=10cm, Ext. =7.5cm	$8.1 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^{14}$	42%	$1.5 \cdot 10^{14}$	18.5 %

Tabelle 5.9: Neutronenstromdichten für verschiedene Reflektor-/Moderatorsysteme

Für einen schnellen Abfall des Neutronenpulses nach Protonenpulsende ist die Kombination Pb+D₂O das beste Reflektormaterial. 1ms nach Erreichen des Maximums liegen nur noch 2-3% der maximalen Intensität vor. Ein geringerer Wert erscheint unter den jetzigen Bedingungen bezüglich Reflektorgröße und -material nicht möglich.

6. Mittlere Neutronenstromdichten für ortho-/para-Wasserstoff- und für Festmethanmoderatoren bei einer Moderatortemperatur von T=20K

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses von verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen im Wasserstoffmoderator auf die mittleren Neutronenstromdichten zusammengestellt und Neutronenstromdichten zwischen einem Festmethanmoderator und einem 100%para-Wasserstoffmoderators verglichen.

Die Resultate werden sowohl für die SPTS als auch die LPTS-Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen diskutiert, jeweils mit und ohne H₂O-Vormoderator. In beiden Geometrien wurden gekoppelte Moderatoren betrachtet.

Der Wasserstoffmoderator in der SPTS-Geometrie hat die Maße: 12x15x5cm und der Vormoderator eine Dicke von 2cm und eine Verlängerung ins Strahlrohr von Ext.=12,5cm (siehe Abb. 5.3, S. 39).

In der LPTS-Geometrie hat der Wasserstoffmoderator dieselben Maße, jedoch ist der Vormoderator 2,5cm dick und mit einer Verlängerung in das Strahlrohr von Ext.=2,5cm (siehe Abb. 5.12, S. 54).

Der Abstand zwischen Target und Moderator beträgt in beiden Geometrien im D=7cm.

6.1 Einfluß von verschiedenen ortho/para-Verhältnissen im Wasserstoffmoderator (T=20K) auf die mittleren Neutronenstromdichten

Im flüssigen Wasserstoff (20K) gibt es zwei verschiedene Spinzustände: ortho-Wasserstoff mit parallel ausgerichteten Spins und den para-Wasserstoff mit entgegengesetzt gerichteten Spins (siehe S. 26f.). Wasserstoff kann zu jeweils 100% im ortho-Zustand oder im para-Zustand vorliegen oder aber in verschiedenen Mischungsverhältnissen von ortho- und para-Wasserstoff. Wegen der Unterschiede der Streuquerschnitte vom ortho- und para Wasserstoff (siehe Anhang C2) sind deshalb die resultierenden Neutronenstromdichten abhängig vom vorliegenden ortho zu para-Verhältnis des Wasserstoffs.

Beim japanischen Spallationsprojekt werden zurzeit Untersuchungen durchgeführt, die Mischungsverhältnisse durch Katalysatoren zu steuern /ica2000/. Bisher besteht weder die Möglichkeit, das Verhältnis von ortho- zu para-Wasserstoff *im* Moderator während des Betriebes direkt zu messen noch ein bestimmtes Verhältnis einzustellen. Zurzeit kann anhand des sich ergebenden Energiespektrums der Neutronenstromdichte das Mischungsverhältnis nachträglich und nur in gewissen Grenzen bestimmt werden /rus1998/.

Um eine Vorhersage darüber zu machen, wie das betrachtete Target-Moderator-Reflektor-System auf unterschiedliche ortho-/para-Wasserstoffmischungen reagiert, sind entsprechende Untersuchungen notwendig. In Abb. 6.1 ist der Einfluss des ortho-zu-para-Verhältnisses auf die Intensität eines Wasserstoffmoderators (T=20K) in Abhängigkeit von der Moderatordicke d für ein einfaches Target-Moderator-Reflektor-System dargestellt.

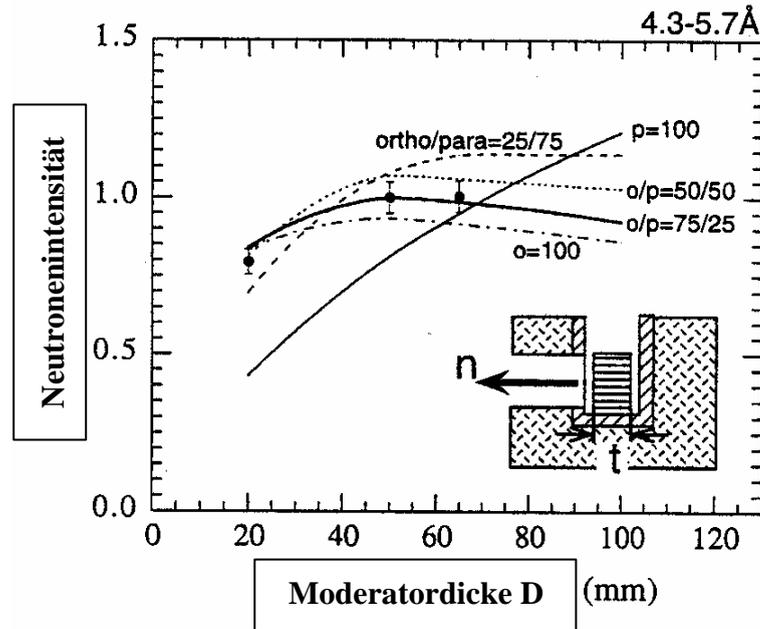


Abb. 6.1: Einfluß des ortho(o)-zu-para(p)-Verhältnisses [%] auf die Neutronenintensität in Abhängigkeit von der Moderatordicke D /ogw1999/
 Die Kurven gelten für die skizzierte, sehr einfache Target-Moderator-Reflektor-Anordnung und für Wellenlängen zwischen 4.3-5.7 Å
 Linien= Simulationsergebnisse, Punkte=experimentelle Daten

Bei einer Moderatordicke $D=5\text{cm}$ beträgt zum Beispiel der Intensitätsunterschied zwischen einem Moderator mit 100%-para-Wasserstoff und einem Moderator gefüllt mit natürlichem Wasserstoff (75% ortho, 25% para) schon fast 20 %. Zusätzlich verdeutlicht Abb. 6.1, dass die Moderatordicke einen großen Einfluss auf die Intensität hat.

Für die ESS sind die dargestellten Ergebnisse aus Abb. 6.1 jedoch nicht ohne weiteres zu übernehmen, da erhebliche Unterschiede in den Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen bestehen. Deshalb wurden für beide ESS-Geometrien (SPTS und LPTS) Simulationen mit verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen im Wasserstoffmoderator mit und ohne H_2O -Vormoderator durchgeführt.

6.1.1 Der Wasserstoffmoderator ($T=20\text{K}$) mit verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen in der SPTS-Geometrie - ohne Vormoderator

Abb. 6.2 zeigt mittlere Neutronenstromdichten für den Wasserstoffmoderator (20K) in der SPTS-Geometrie bei einer Dicke von 5cm mit verschiedenen ortho-zu-para-Verhältnissen: 100% ortho- H_2 , nat- H_2 („natürlicher“ Wasserstoff mit 75% ortho und 25% para) und 100% para- H_2 . Alle Rechnungen wurden ohne Vormoderator durchgeführt (-VM). Im Vergleich zeigt ein Para-Wasserstoffmoderator (100% para- H_2) mit Vormoderator (+VM) eine deutliche Intensitätssteigerung.

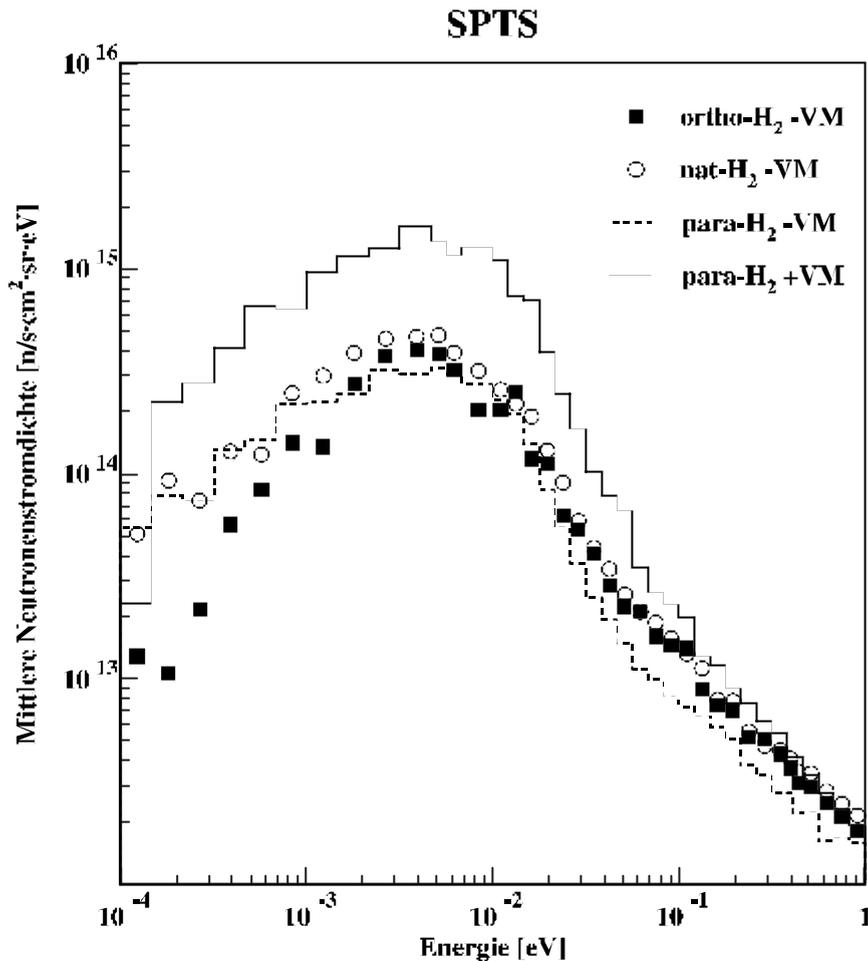


Abb. 6.2: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren ($T=20K$, Moderatorstärke $D=5cm$) in der SPTS-Geometrie - Abb. 5.3, S. 39 - mit verschiedenen ortho/para- Verhältnissen:
 ortho-H₂ = 100% ortho;- nat-H₂ = 75% ortho, 25% para;- para-H₂ = 100% para;
 mit (+VM) und ohne Vormoderator (-VM), Vormoderatormaterial: Wasser(300K)
 alle Ergebnisse für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW für einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Wie aus Abb. 6.2 ersichtlich erzielt man ohne Vormoderator mit dem natürlichen Wasserstoff im Moderator (75% ortho und 25% para) und mit dem 100%-Para-Wasserstoffmoderator ähnliche Resultate. Der Moderator mit 100% ortho-Wasserstoff hingegen zeigt jedoch insbesondere im Bereich $E_n \leq 0.413$ eV eine stark abfallende Intensität. Ortho-Wasserstoff bewirkt eine Aufwärtsstreuung von langsamen Neutronen, die gleichbedeutend ist mit einem Energiegewinn, was zu einer höheren Intensität bei höheren Energien im Vergleich zu reinem para-Wasserstoff führt.

In Abb. 6.2 ist die deutliche Intensitätssteigerung (bis zum 2.5fachen im Maximum) zu sehen, die mit einem Vormoderator (+VM) und einem 100%-para-Wasserstoffmoderator ermöglicht wird. Deshalb wurden im Kapitel 5 alle Wasserstoffmoderatoren mit Vormoderator untersucht und verglichen.

6.1.2 Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen in der SPTS-Geometrie - mit Vormoderator

Abbildung Abb. 6.3 zeigt die mittleren Neutronenstromdichten bei einem vormodierten SPTS-Wasserstoffmoderator für verschiedene ortho/para-Verhältnisse.

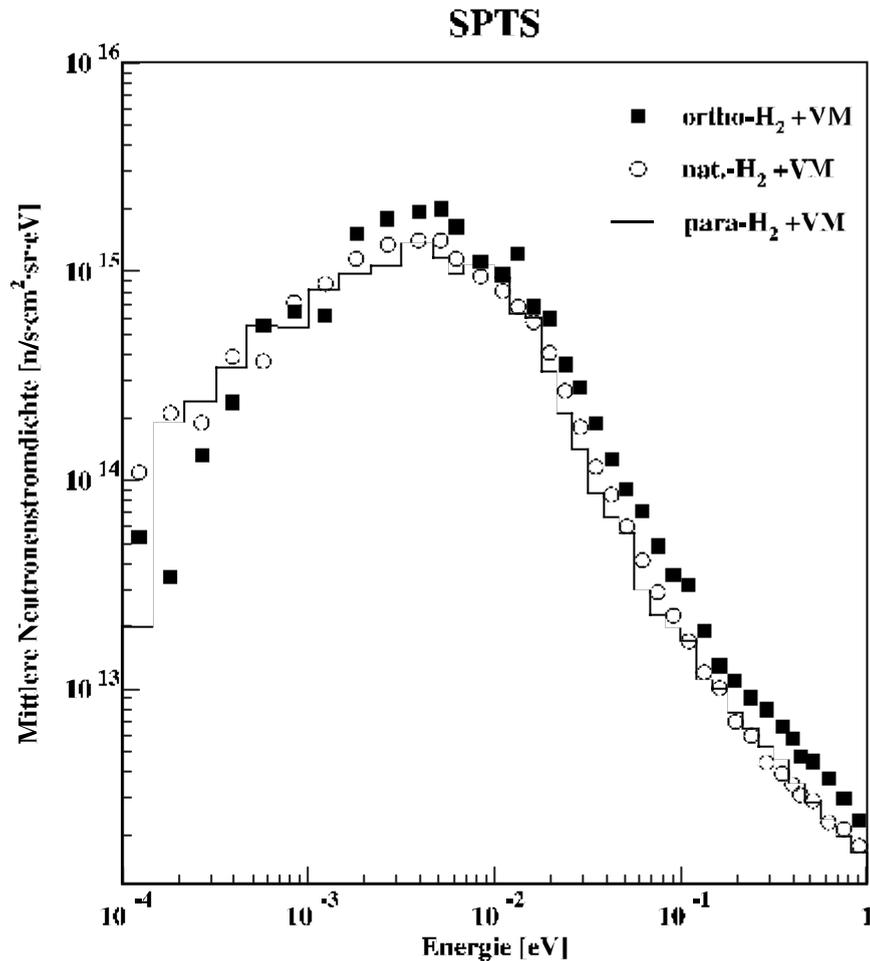


Abb. 6.3: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren (T=20K, Moderatordicke D=5cm) in der SPTS-Geometrie - Abb. 5.3, S. 39 - mit verschiedenen ortho/para-Verhältnissen:
 ortho-H₂ = 100% ortho;- nat-H₂=75% ortho, 25% para;- para-H₂=100% para;
 mit (+VM) Vormoderator,, Vormoderatormaterial: Wasser(300K)
 alle Ergebnisse für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW für einen Raumwinkel von +/-2°

Mit Vormoderator erzielt der 100%-ortho-Wasserstoffmoderator die höchsten Intensitäten. Der Intensitätsabfall bei niedrigeren Energien ist nicht ganz so ausgeprägt wie im Falle ohne Vormoderator. Das Spektrum dieses Moderators zeigt oberhalb von ca. 10 meV höhere Neutronenstromdichten als der Wasserstoffmoderator mit 100% para-H₂. Die Ergebnisse von Moderatoren mit natürlichem und 100%igen para-Wasserstoff sind auch hier sehr ähnlich.

6.1.3 Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen in der LPTS-Geometrie - ohne Vormoderator

Abb. 6.4 zeigt die mittleren Neutronenstromdichten für den LPTS-Wasserstoffmoderator bei verschiedenen ortho-/para-Mischungen jeweils ohne Vormoderator (-PM). Zum Vergleich werden die Ergebnisse des para-Wasserstoffmoderators (100% para) mit Vormoderator (+PM) hinzugefügt.

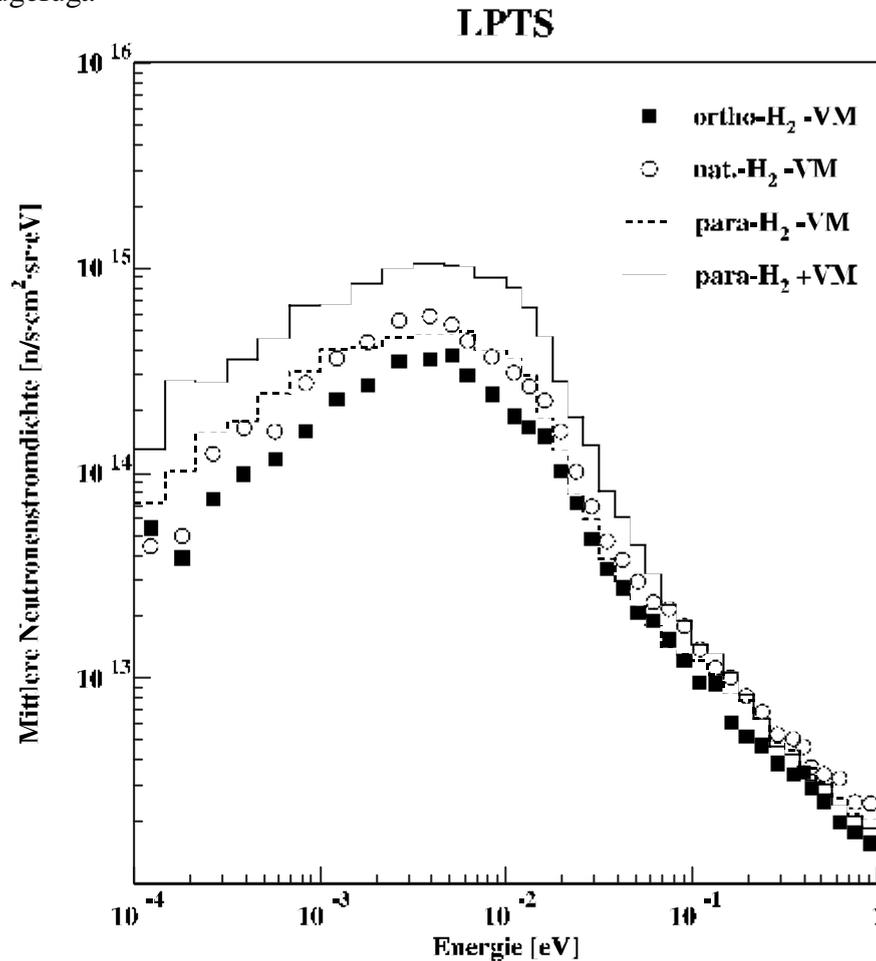


Abb. 6.4: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren (T=20K, Moderatorstärke D=5cm) in der LPTS-Geometrie – Abb. 5.12, S. 54 - mit verschiedenen ortho/para- Verhältnissen:
ortho-H₂=100% ortho;- nat-H₂=75% ortho, 25% para;- para-H₂=100% para;
mit (+VM) und ohne Vormoderator (-PM), Vormoderatormaterial: Wasser(300K)
alle Ergebnisse für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW für einen Raumwinkel von +/-2°

Im Gegensatz zur SPTS-Geometrie (siehe Abb. 6.2) zeigt der Moderator mit natürlichem Wasserstoff ohne Poremoderation die höchste Intensität und im Bereich des Maximums andere Werte als der Moderator mit 100% para-Wasserstoff. 100% ortho-H₂ zeigt auch hier einen starken Abfall bei Energien unterhalb von $4 \cdot 10^{-3}$ eV, jedoch ist dieser Abfall nicht so ausgeprägt wie bei der SPTS-Geometrie. Diese unterschiedlichen spektralen Verläufe sind bedingt durch die Form der Strahlrohre in der SPTS und in der LPTS-Geometrie. In der SPTS-Geometrie liegt nur ein Öffnungswinkel von 30° vor, wohingegen in der LPTS Strahlrohre mit einem Öffnungswinkel von 45° verwendet wurden. In der SPTS-Geometrie ist der Moderator (ohne Vormoderator) von mehr Reflektormaterial umgeben, dass Neutronen in den Moderator zurück streut. An diesem Beispiel wird deutlich, wie sensitiv die

Neutronenstromdichten auf geometrische bzw. materialbedingte Änderungen in der gesamten Target-Moderator-Reflektor-Anordnung reagieren.

Der Wasserstoffmoderator mit 100%-para-H₂ (para-H₂) liefert mit Vormoderator (+VM) rund das 2.5fache der Neutronenstromdichte von einem 100%-para-H₂-Moderator ohne Vormoderator (-VM), wie es auch bei der SPTS der Fall ist (siehe Abb. 6.2).

6.1.4 Der Wasserstoffmoderator (T=20K) mit verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen in der LPTS-Geometrie - mit Vormoderator

Die nächste Abbildung – Abb. 6.5. – zeigt mittlere Neutronenstromdichten für premoderierete Wasserstoffmoderatoren in der LPTS-Geometrie mit verschiedenen ortho-/para-Verhältnissen.

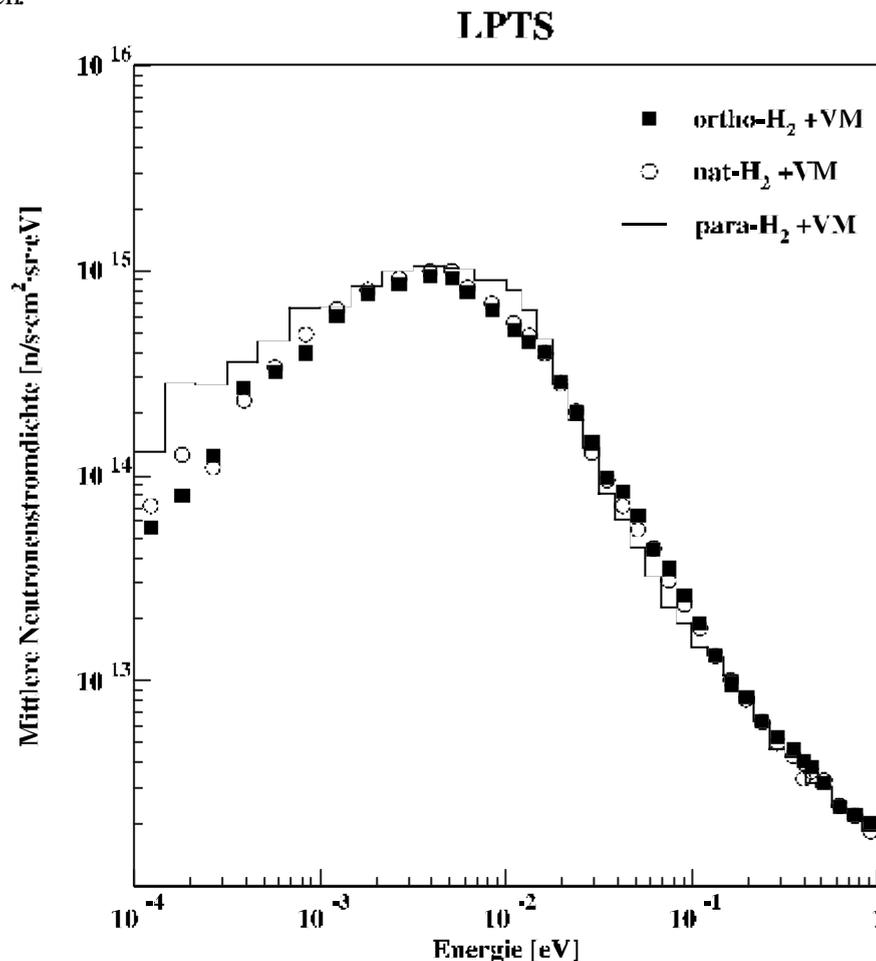


Abb. 6.5: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren (T=20K, Moderatordicke D=5cm) in der LPTS-Geometrie – Abb. 5.12, S. 54 - mit verschiedenen ortho/para- Verhältnissen:
ortho-H₂ =100% ortho;- nat-H₂=75% ortho, 25% para;- para-H₂=100% para;
mit Vormoderator (+VM), Vormoderatormaterial: Wasser(300K)
alle Ergebnisse für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW für einen Raumwinkel von +/-2°

Für die LPTS-Geometrie zeigen alle drei premoderierten Wasserstoffmoderatoren ähnliche Spektrumsverläufe. Die hier gezeigten verschiedenen ortho-/para-Verhältnisse haben nur einen geringen Einfluss auf das Spektrum der Neutronendichten, somit ist dieses Moderator-Vormoderatorsystem am stabilsten gegen Einflüsse durch verschiedene ortho-/para-Mischungen. Liegt das technische Konzept des Wasserstoffmoderators für die ESS endgültig

fest, sollte eine genauere Betrachtung der Auswirkung unterschiedlicher ortho-/para-Verhältnisse auf die nutzbaren Neutronenfluß- und stromdichten durchgeführt werden.

6.2 Vergleich von mittleren Neutronenstromdichten eines Festmethanmoderators (T=20K) und eines 100%para-Wasserstoffmoderator (T=20K) in der SPTS- und in der LPTS-Geometrie

Methan bei 20 K Temperatur liegt im festen Aggregatzustand vor und hat eine höhere Wasserstoffdichte als reiner Wasserstoff. Tauscht man in den jeweiligen Geometrien das Moderator material 100%-para-Wasserstoff gegen Methan (20K, fest) aus, erhält man die in Abb. 6.6 für die SPTS und in Abb. 6.7 für die LPTS gezeigten Spektren der mittleren Neutronenstromdichten.

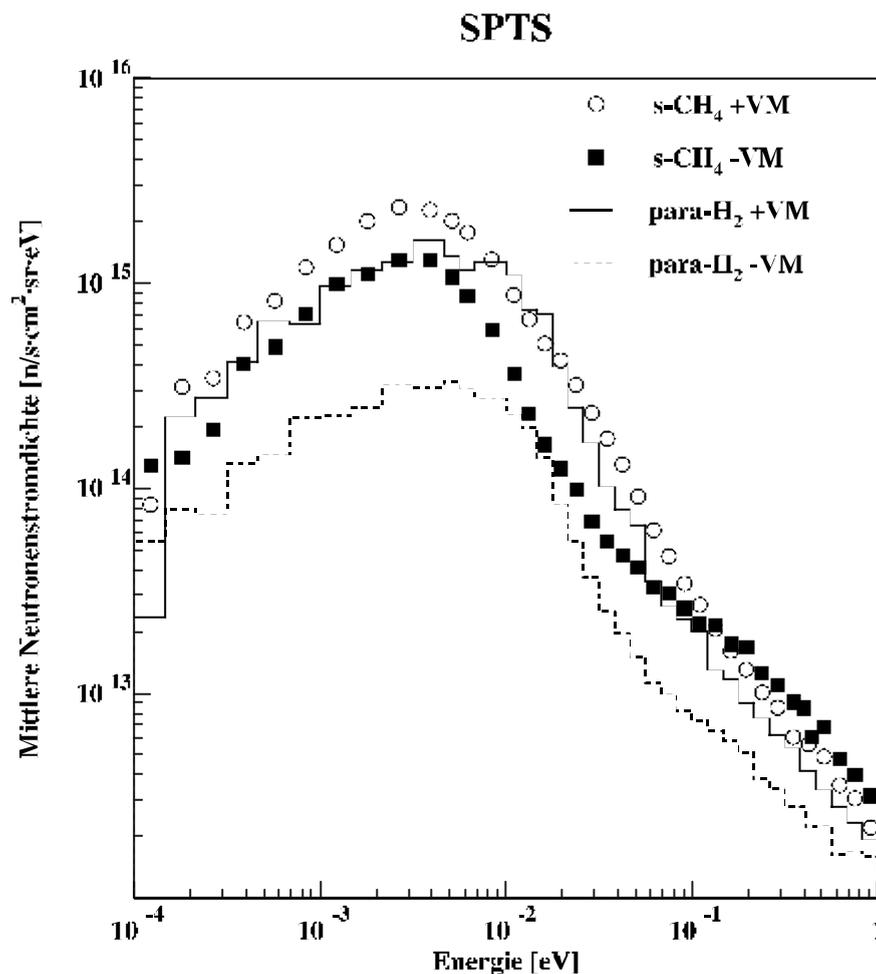


Abb. 6.6: Neutronenintensitäten für den Festmethanmoderator in SPTS-Geometrie - Abb. 5.3, S. 39 - im Vergleich zum Para-Wasserstoffmoderator für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Vergleicht man die Neutronenstromdichten vom Wasserstoffmoderator mit denen vom Methanmoderator - beide ohne Vormoderation - so ist der Intensitätsgewinn mit Methan ungefähr das 3,5fache von dem eines para-H₂-Moderators, insbesondere bei Energien unterhalb $3 \cdot 10^{-3}$ eV. Wird bei beiden Moderatortypen der gleiche Vormoderator verwendet (H₂O, 300K, 2cm dick) beträgt der Intensitätsgewinn nur noch maximal etwa 40%.

In Abb. 6.6 wird ersichtlich, dass das Energiespektrum vom Methanmoderator hin zu geringeren Energien ($E_{J_{\max}} \sim 2.5 \cdot 10^{-3}$ eV) verschoben ist als das vom para-

Wasserstoffmoderator ($E_{J_{\max}} \sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$), d.h. ein 20K Methanmoderator ist für eine hohe Intensität an kalten Neutronen in den Simulationen die geeignetere Wahl.

Abb. 6.7 zeigt denselben Vergleich von mittleren Neutronenstromdichten für Moderatoren in der LPTS-Geometrie.

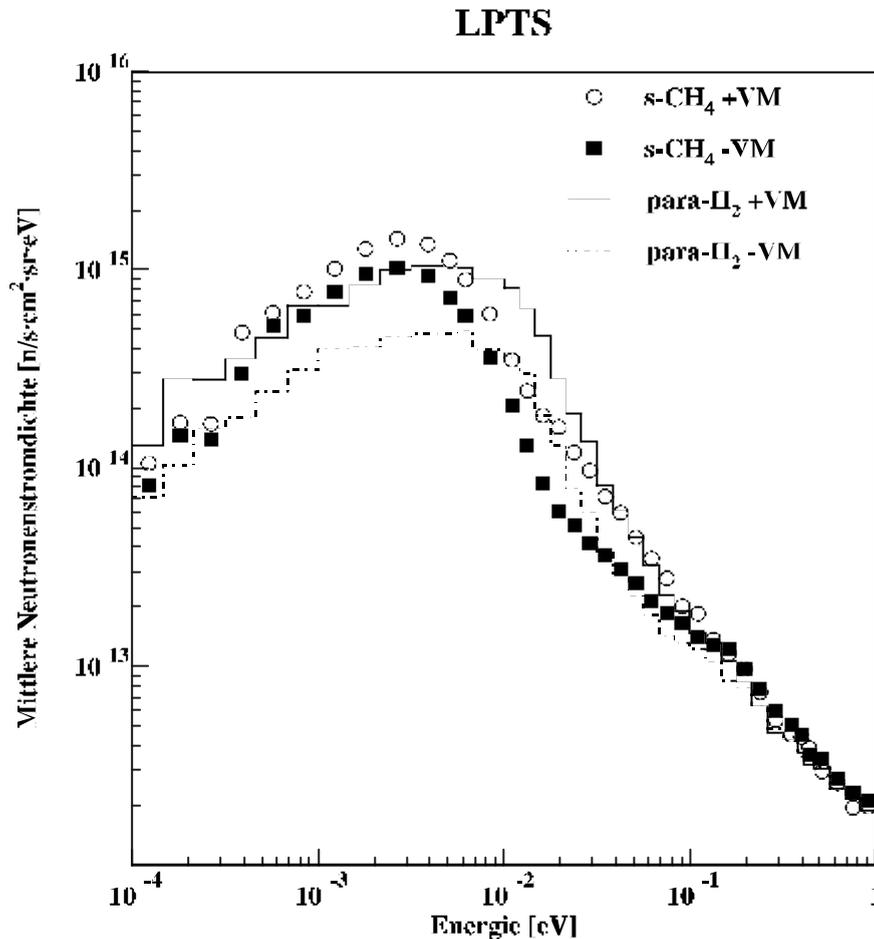


Abb. 6.7: Neutronenintensitäten für den Festmethanmoderator in LPTS-Geometrie - Abb. 5.12, S. 54 - im Vergleich zum Para-Wasserstoffmoderator für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Der Intensitätsgewinn von einem Festmethanmoderator gegenüber einem 100%-Para-H₂-Moderator beträgt in dieser Geometrie nur knapp das 2.5fache ohne Vormoderator. Auch hier zeigt festes Methan eine höhere Ausbeute an kalten Neutronen. Die maximalen Intensitäten liegen für die vormoderierten Systeme beide unterhalb dessen, was in der SPTS-Geometrie erzielt wird, weil durch die unterschiedlichen Öffnungen der Strahlrohre in der SPTS-Geometrie mehr Reflektormaterial um den Moderator vorhanden ist und somit mehr Neutronen für den Moderator verfügbar sind. Beim Festmethanmoderator in der LPTS-Geometrie werden durch den Vormoderator mehr Neutronen im Energiebereich von 10^{-2} bis 10^{-1} eV geliefert als ohne.

7. Alternative Moderator Konzepte für die ESS

In diesem Kapitel werden einige alternative Moderator Konzepte betrachtet, die es ermöglichen sollen, sowohl im thermischen als auch im kalten Energiebereich hohe Intensitäten zu erreichen und für die Neutronenstreuinstrumente ein sehr großes nutzbares Wellenlängenband zur Verfügung zu stellen, das beide Energiebereiche gleichzeitig abdeckt, jedoch auch die Möglichkeit bietet, nur einen Energiebereich - also entweder den kalten oder den thermischen - zu verwenden. Ein alternatives Moderator Konzept, das diesen Anspruch erfüllt, ist der „side-by-side“-Moderator, auch als „multispektraler“ Moderator bezeichnet. Dabei liegt ein kalter Moderator Seite an Seite zu einem thermischen Moderator (siehe Abb. 7.4, S. 82). Wird das kalte Spektrum benötigt, kann der Neutronenstrahl aus einem solchen Moderator mit thermischen und kalten Anteil auf folgende Weise extrahiert werden:

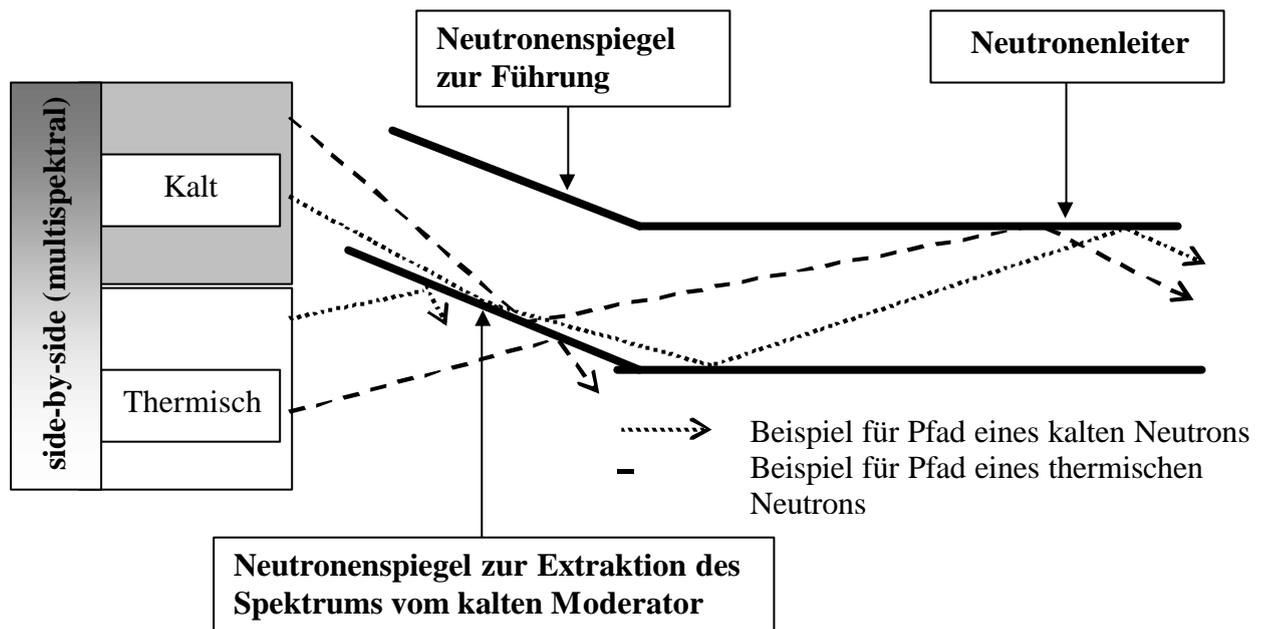


Abb. 7.1: Schematische Darstellung der Neutronenstrahlextraktion vom multispektralen Moderator

Ein anderes Konzept ist der „back-to-back“-Moderator, bei dem thermischer und kalter Moderator mit den Rücken zueinander angeordnet sind, d.h. es ist auf jeder Seite zum Strahlrohr hin nur ein separater Anteil des Wellenlängenbandes - entweder thermisch oder kalt - zu extrahieren (siehe Abb. 7.3, S. 82).

Für diese Moderator Konzepte wurde mittels Monte-Carlo-Simulationen eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Neutronenstromdichten gegeben [ica2003]. Diese Berechnungen wurden mit dem Rechencode MCNPX [hug1997] und den aktuellsten Streudaten für Moderatoren [kei2002] durchgeführt.

Es wurden dabei folgende Annahmen getroffen:

- **Protonenstrahlparameter** wie im Referenzkonzept (siehe Tab. 4.1, S. 35)
- **Target und Reflektor** wie bei der ESS-Kurzpulstargetstation SPTS (siehe S.41), jedoch Strahlrohre mit einem Öffnungswinkel von 62°
- Der *Abstand zwischen Moderator und Target* beträgt immer im Mittel 7cm, die Moderatoren liegen in *brillanter Position* (siehe Kap. 4.3, S. 37), d.h. der Moderatormittelpunkt ist 10 cm vom Targetfenster entfernt, und sie sind in Wing-Anordnung geplant. Der *Winkel der Moderatoren bezüglich der Protonenstrahlachse* ist $\pm 33^\circ$.
- **Moderatormaße:**
 - SPTS:
 - back-to-back-Komponenten:* Sichtbare Moderatorfläche: $12 \times 25 \text{ cm}^2$; Dicke: 2.5 cm
 - side-by-side-Komponenten:* Sichtbare Moderatorfläche: $12 \times 12 \text{ cm}^2$, Dicke: 5 cm
 - Vormoderatorgröße:* Dicke = 2,5cm, Verlängerung in das Strahlrohr 10 cm
 - Die in Abb. 7.2 zu in Abb. 7.1 zu sehende Schicht zwischen Strahlrohr und Reflektor bzw. Vormoderator ist 1cm dick und besteht im Fall des „back-to back“-Moderators aus dem Entkoppler Kadmium (Cd) und im Fall des „side-by-side“-Moderators aus Reflektormaterial.
 - Die Vergiftungsschicht zwischen kaltem und thermischen Moderator, sowohl beim „back-to-back“- als auch beim „side-by-side“-Moderator, ist aus Gadolinium (Gd) $d=0,5 \text{ mm}$.
 - LPTS:
 - 100%para-H₂-Moderator:* Sichtbare Moderatorfläche: $12 \times 25 \text{ cm}^2$, Dicke: 10cm
 - side-by-side-Komponenten:* Sichtbare Moderatorfläche: $12 \times 12 \text{ cm}^2$, Dicke: 5 cm
 - Weder der H₂-Moderator noch der „side-by-side“-Moderator in der LPTS ist zur Steigerung der Intensität weder entkoppelt noch vergiftet.
 - Vormoderatorgröße:* Dicke = 2,5cm, Verlängerung in das Strahlrohr 10 cm
- Alle Ergebnisse für Neutronenstromdichten beziehen sich auf einen Raumwinkel von $\pm 15^\circ$ um die Oberflächennormale der betrachteten Moderatorfläche.

7.1. Alternative Moderatorkonzepte in der ESS-Kurzpulstargetstation SPTS

Für die ESS-Kurzpulstargetstation SPTS ist die schematische Anordnung mit den weiterentwickelten Moderatoren in Abb. 7.2a und Abb. 7.2b dargestellt:

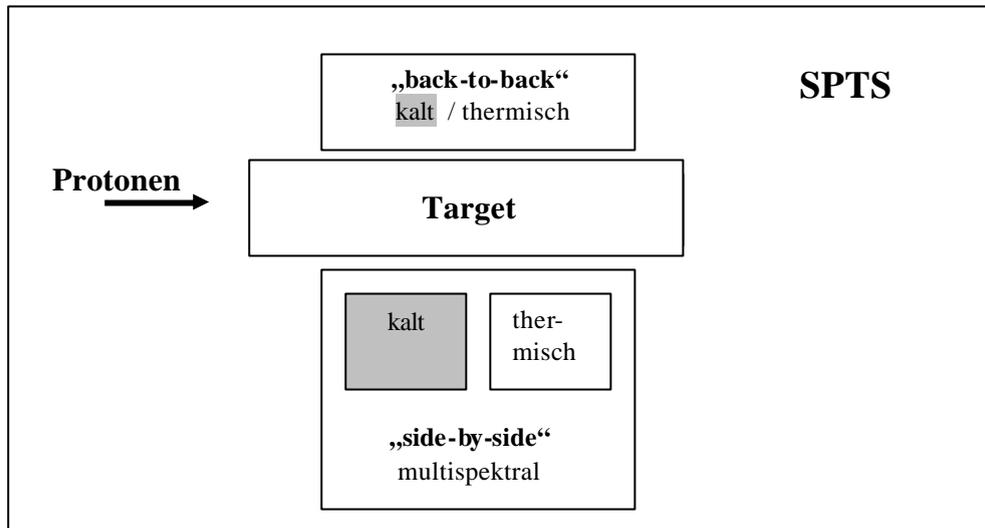


Abb. 7.2a : Anordnung weiterentwickelter Moderatorkonzepte in der ESS - Kurzpulstargetstation SPTS: vertikaler Schnitt /Ess2002/

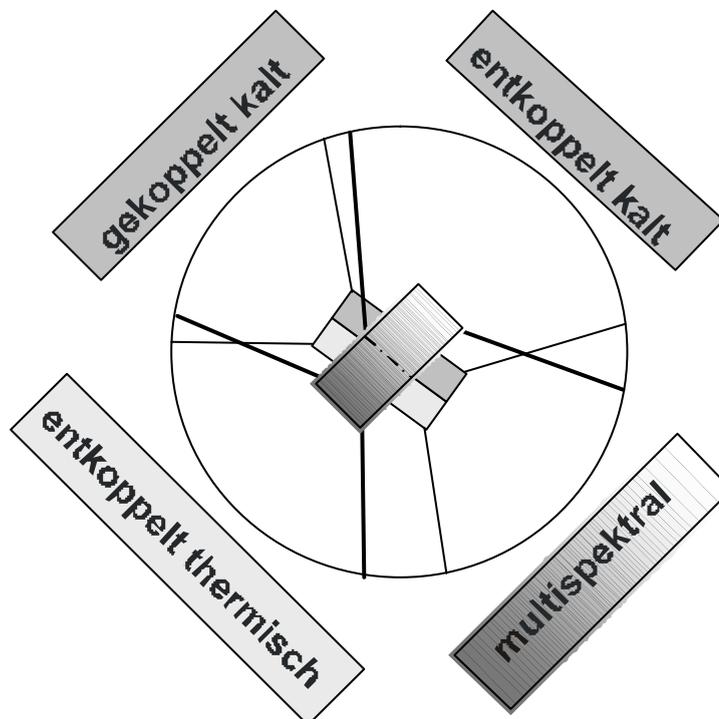


Abb. 7.2b : Anordnung weiterentwickelter Moderatorkonzepte in der ESS - Kurzpulstargetstation SPTS: horizontaler Schnitt /Ess2002/

Abb. 7.3 zeigt das zugrunde liegende Geometrie-konzept für den „back-to-back“-Moderator:

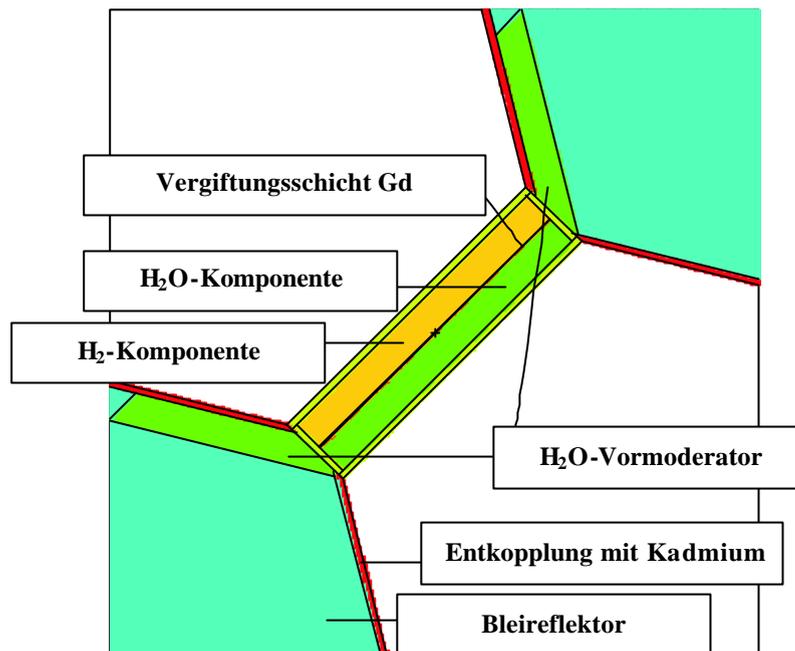


Abb 7.3: Geometrie-konzept des „back-to-back-Moderators“ für die SPTS /ica2003/

Abb. 7.4 zeigt das Geometrie-konzept des „side-by-side“-Moderators für die Kurzpulstargetstation SPTS :

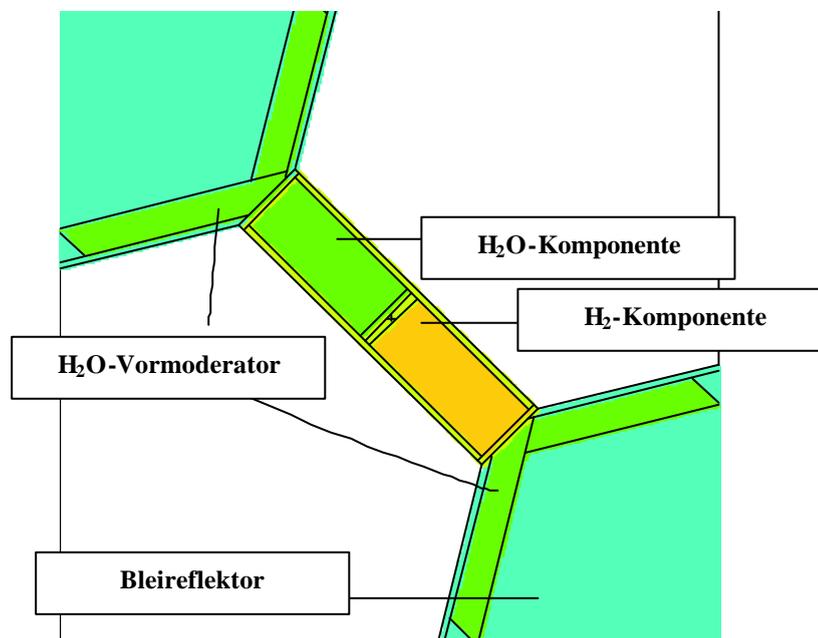


Abb. 7.4: Geometrie-konzept des „side-by-side“-Moderators für die SPTS /ica2003/

Zunächst wurden für den „back-to-back“-Moderator Optimierungen der Dicken für die jeweiligen Komponenten durchgeführt. In Hinblick auf den besten Kompromiß zwischen Intensität und Pulsbreite ist eine optimale Dicke $d=2.5\text{cm}$ bestimmt worden. Beim „side-by-side“-Moderator ergab sich eine Dicke für jede Komponente von $d=5\text{cm}$ als optimal, wobei nur dickere Moderatoren berechnet wurden.

Die wellenlängenabhängigen Neutronenspektren mit maximaler Intensität und Pulsweite der neuen Moderatorkonzepte (mit den optimalen Dicken) wurden in den Tabellen 7.1 bis 7.4 verglichen mit den Ergebnissen für die konservativen ESS-SPTS-Moderatoren mit entkoppeltem, vergiftetem bzw. gekoppeltem 100%para-Wasserstoff und entkoppeltem, vergiftetem bzw. gekoppeltem Wassermoderator. Die Werte der neueren Moderatorkonzepte liegen im vergleichbaren Rahmen, jedoch mit etwas geringeren Intensitäten und etwas geringeren Pulsbreiten.

	Referenz- H ₂ -Moderator entkoppelt+vergiftet, A=180cm ² (siehe Tab. 5.3, S. 50)		"back-to-back"-H ₂ -Komponente A=300cm ²	
? [Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]
0.5	18000	5	13000	5
1.0	2300	9	2520	8
2.0	940	18	754	17
3.2	340	32	306	19
4.0	140	37	177	22
4.6	110	43	80	30
5.6	36	53	44	36

Tabelle 7.1: Maximale Neutronenstromdichten J_{max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für den ESS-SPTS Referenz-H₂-Moderator im Vergleich zur „back-to-back“-H₂-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von +/-15°

	Referenz- H ₂ O-Moderator entkoppelt+vergiftet, A=180cm ² (siehe Tab. 5.3, S. 50)		"back-to-back"-H ₂ O-Komponente A=300cm ²	
? [Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]
0.5	27000	5	16200	3.
1.0	5400	15	3040	15
2.0	540	36	347	35
3.2	75	37	52.6	30

Tabelle 7.2: Maximale Neutronenstromdichten J_{max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für den ESS-SPTS Referenz-H₂O-Moderator im Vergleich zur „back-to-back“-H₂O-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von +/-15°

	Referenz- H ₂ -Moderator gekoppelt, A=180cm ² (siehe Tab. 5.3, S. 50)		„side-by-side“-H ₂ -Komponente A=144cm ²	
? [Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]
0.5	19000	6	11000	5
1.0	2900	12	2100	9
2.0	1600	43	1120	27
3.2	820	92	630	42
4.0	370	121	225	94
4.6	280	125	136	120
5.6	99	166	64	146

Tabelle 7.3: Maximale Neutronenstromdichten J_{max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für den ESS-SPTS Referenz-H₂-Moderator im Vergleich zur „side-by-side“-H₂-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von +/-15°

	Referenz- H ₂ O-Moderator gekoppelt, A=180cm ² (siehe Tab. 5.3, S. 50)		„side-by-side“-H ₂ O-Komponente A=144cm ²	
? [Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr/Å]	FWHM [μs]
0.5	29000	5	15300	5
1.0	6300	18	3800	38
2.0	630	56	492	110
3.2	92	61	71	149

Tabelle 7.4: Maximale Neutronenstromdichten J_{max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für den ESS-SPTS Referenz-H₂O-Moderator im Vergleich zur „side-by-side“-H₂O-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von +/-15°

7.2 Alternative Moderatorkonzepte in der ESS-Langulstargetstation LPTS

Für die ESS-Langpulstargetstation LPTS wurde eine Anordnung entworfen, die einen kalten, gekoppelten Wasserstoffmoderator und einen „side-by-side“-Moderator beinhaltet. Die schematische Darstellung der Anordnung ist in den Abbildungen Abb. 7.5a und Abb. 7.5.b dargestellt:

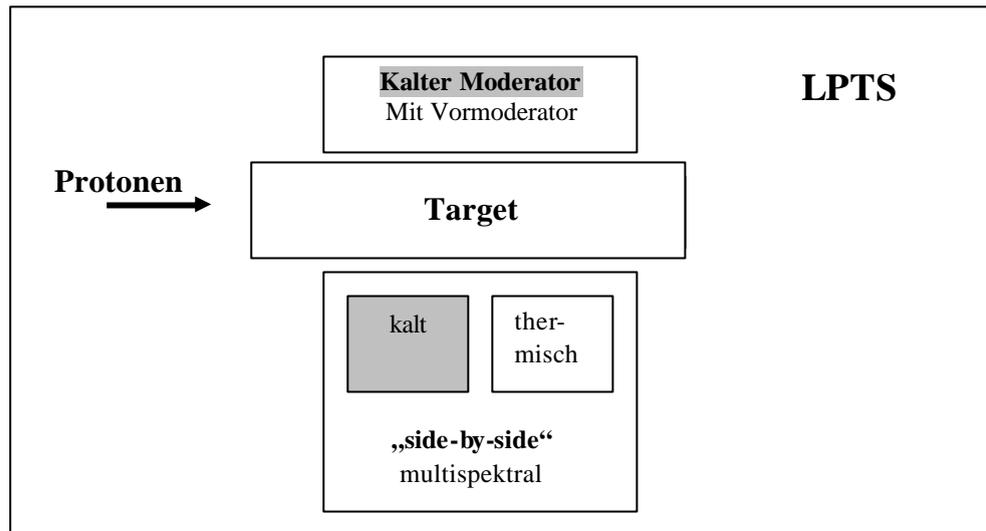


Abb. 7.5a : Anordnung weiterentwickelter Moderatkonzepte in der ESS - Langpulstargetstation LPTS: vertikaler Schnitt /Ess2002/

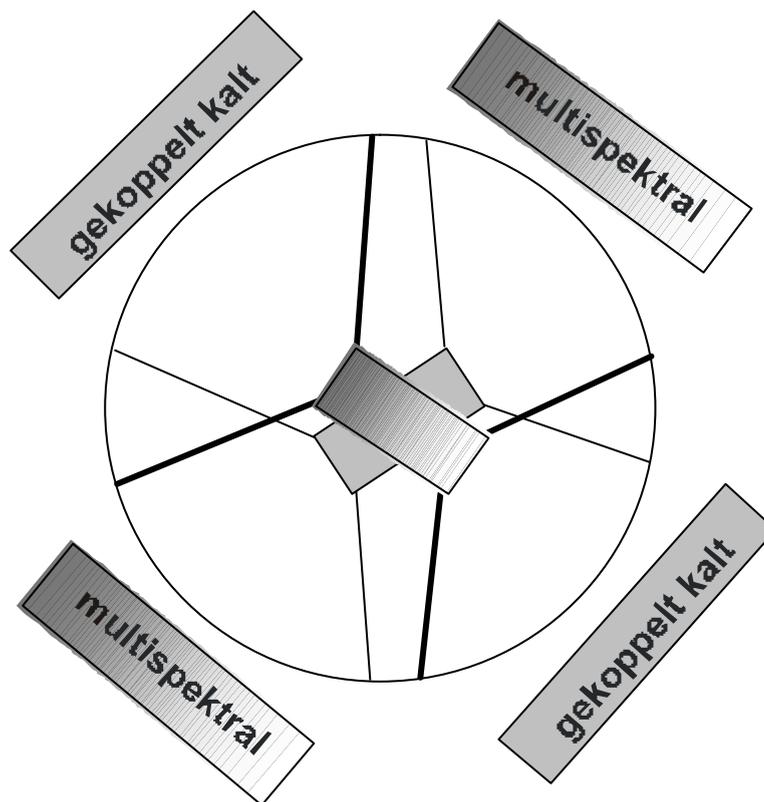


Abb. 7.5b : Anordnung weiterentwickelter Moderatkonzepte in der ESS - Langpulstargetstation SPTS: horizontaler Schnitt /Ess2002/

Die detaillierte Geometrien für den Wasserstoffmoderator ist in Abb. 7.6 dargestellt; die für den „side-by-side“-Moderator entspricht der in Abb. 7.4, aber ohne Vergiftungsschicht.

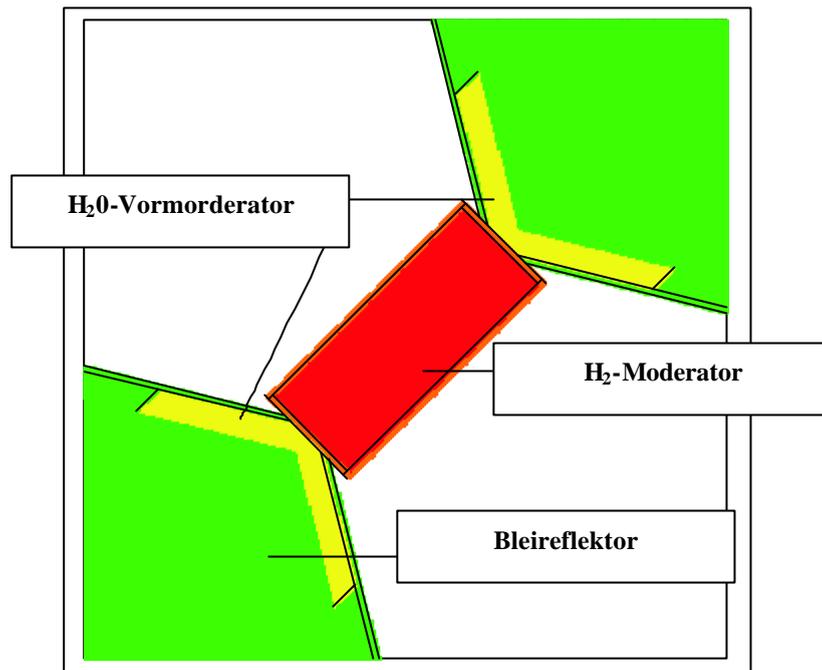


Abb. 7.6: Geometrie zur Optimierung des Wasserstoffmoderators in der LPTS /ica2002/

Abb. 7.7 zeigt die resultierenden thermischen ($E = 0.383 \text{ eV}$) Neutronenstromdichten für den Wasserstoffmoderator, normalisiert auf einen Raumwinkel von $\pm 15^\circ$ zur Oberflächennormale der Moderatorfläche. Das Optimum wurde erzielt bei einer Größe von $B \times H \times T: 10 \times 12 \times 25 \text{ cm}^3$.

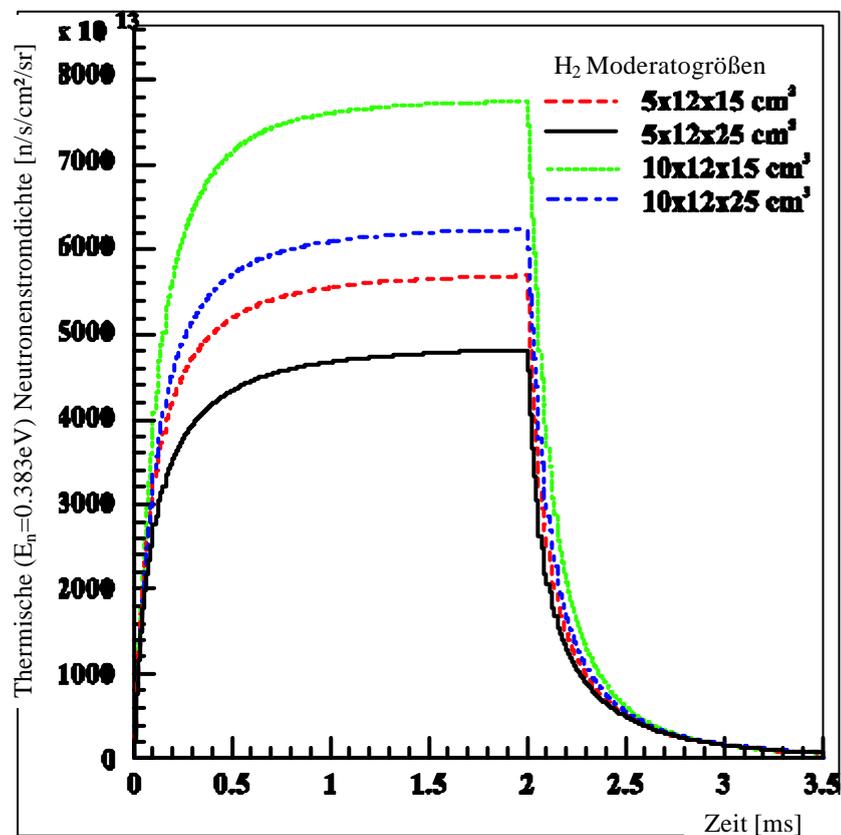


Abb. 7.7: Thermische ($E = 0.383 \text{ eV}$) Neutronenstromdichten für verschieden große H_2 -Moderatoren, auf Fläche (pro cm^2) normiert

In der Betrachtung der LPTS wurde ebenfalls ein „side-by-side“-Moderator miteinbezogen. Die Annahmen sind dieselben wie sie auch für die SPTS verwendet wurden (siehe S. 91), allerdings entfällt die Vergiftungsschicht.

Es ergaben sich für die Neutronenstromdichten folgende Werte, die denen für den Referenzmoderator der LPTS aus Kapitel 6 in Tabelle 7.5 gegenübergestellt werden:

? [Å]	Referenz-Moderator A=180cm ² (siehe Tab. 5.7, S. 69)				„side-by-side“-Komponente A=144cm ²			
	Wasserstoff H ₂ d=10cm, Ext. 7,5cm		Wasser H ₂ O		Wasserstoff H ₂		Wasser H ₂ O	
	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² / s/sr/Å]	J _{mit} x10 ¹² [n/cm ² /s/ sr/Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² / s/sr/Å]	J _{mit} x10 ¹² [n/cm ² /s/ sr/Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² / s/sr/Å]	J _{mit} x10 ¹² [n/cm ² /s/sr /Å]	J _{max} x10 ¹² [n/cm ² / s/sr/Å]	J _{mit} x10 ¹² [n/cm ² /s/ sr/Å]
0.5	172	5.72	243	7.1	104	3.5	140	4.66
1.0	119	3.98	421	14.2	48	1.6	490	16.6
2.0	235	7.86	81.8	2.73	122	4.1	125	4.21
3.2	-	-	-	-	160	5.4	19.9	0.67
4.0	152	5.08	3.96	1.32	103	3.4	-	-
4.6	-	-	-	-	64	2.2	-	-
5.6	52.4	1.74	-	-	35	1.2	-	-

Tabelle 7.5: Maximale J_{max} und mittlere J_{mit} Neutronenstromdichten in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für die ESS-LPTS Referenz-Moderatoren im Vergleich zu Side-by-side-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von $\pm 15^\circ$

Sowohl die ESS-Referenz-Moderatoren als auch die „side-by-side“-Moderatoren zeigen nahezu dieselbe Leistung, wobei die „side-by-side“-H₂O-Komponente unterhalb von 0.5 Å höhere Werte zeigt. Die Entscheidung eines bestimmten Moderator-konzepts hängt letztendlich maßgeblich von der technischen Realisierung ab, die nicht Thema dieser Arbeit ist.

8. Vergleich des ESS-Konzeptes mit anderen Spallationsneutronenquellen

Die mittleren Neutronenstromdichten verschiedener ESS-Target-Moderator-Reflektor-Moderator-Anordnungen (SPTS und LPTS) werden mit denen anderen Neutronenquellen verglichen. Hierbei werden die entsprechenden Daten folgender Spallations-Neutronenquellen herangezogen:

- **ISIS** - eine Spallationsquelle im Kurzpulsbetrieb am RAL (UK)
- **SNS** - die im Bau befindliche kurzgepulste Spallationsquelle am ORNL (USA)
- **J-PARC** - die im Bau befindliche kurzgepulste Spallationsquelle in Tokai (J)
- **SINQ** - eine kontinuierlich betriebene Spallationsquelle am PSI (CH)

Die Unterschiede in den Auslegungsparameter wie Protonenenergie, Konzept der Target-Moderator-Reflektor-Anordnung etc. und Gemeinsamkeiten zu denen der ESS werden dargestellt. Die mittleren Neutronenstromdichten werden auf gleiche Leistung normiert (per MW oder per A). Damit kann näherungsweise die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Quellen miteinander verglichen werden.

8.1 ISIS- Rutherford Appleton Laboratories, Großbritannien

ISIS ist die zur Zeit stärkste europäische Spallationsquelle im Kurzpulsbetrieb /isi2000/.

- Neutronenquelle	ISIS (in Klammern Parameter für die geplante zweite Targetstation, wenn abweichend)	ESS (in Klammern Angaben für LPTS, wenn abweichend von SPTS)
- Protonenstrahlparameter: Leistung Energie Stromstärke Frequenz	- 160 kW (48kW) 800MeV(800MeV) - 200 μ A (60 μ A) - 50Hz (10Hz)	- 5MW - 1.334GeV - 3,75mA - 50Hz (16.667Hz)
- Target: Material Aggregatzustand	- Tantal (Wolfram mit Tantalhülle) - Fest (+ D ₂ O-Kühlung)	- Quecksilber - Flüssig
- Reflektor: Material	- Beryllium	- Blei
- Moderatoren: Anordnung Material und Temperatur T	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: H ₂ T=20K Methan T=100K (Kompositmoderator aus Methan und H ₂ je 20K+ „grooved“* Methan T= 20K)	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: H ₂ T=20K mit H ₂ O-Vormoderator T=300K optional: Methanhydrat T=20K - thermischer Moderator: H ₂ O T=300K

* „grooved“ Moderator: siehe Abb. 8.1 , Seite 89

Tabella 8.1: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen ISIS und ESS

Für die zweite Targetstation der ISIS ist das Moderatorkonzept eines Methanmoderators mit einer „Kerbe“ (engl.:groove) geplant. Das Prinzip eines „grooved Moderators ist in Abb. 8.2 skizziert.

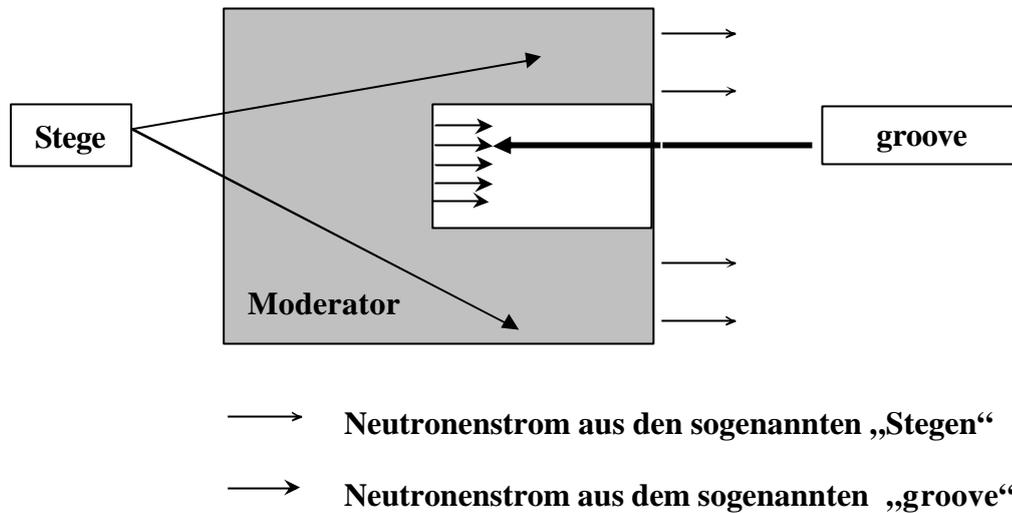


Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines sogenannten „grooved“ Moderators

Betrachtet man die Intensität des Neutronenstroms ausschließlich aus dem „groove“ wird ein Gewinnfaktor von ca. 70% gegenüber dem Neutronenstrom aus der gesamten Moderatoroberfläche erzielt. Ein solches Moderatorkonzept eignet sich aber nur für Spallationsquellen mit niedriger Strahlleistung, da bei hochintensiven Quellen wie der ESS mit Leistungen im MW-Bereich sehr hohe Energiedepositionen vorliegen und starke Radiolyseeffekte auftreten würden.

In Abb. 8.2 sind Energiespektren der mittleren Neutronenstromdichten von ISIS- und ESS-Moderatoren dargestellt. Um die entsprechenden Neutronenstromdichten vergleichen zu können, wurden alle Daten (für ISIS entnommen /isi2000/) auf eine Protonenstrahlleistung von 1MW normiert, da ansonsten die ESS mit 5MW eine ca. 50fach stärkere Leistung als ISIS aufweist. Unterschiede verbleiben durch jeweils eine andere Target-Moderator-Reflektor-Anordnung, andere Materialkombinationen und jeweils in einer anderen Protoneneinschußenergie (bei ISIS 0.8GeV und bei ESS 1.334GeV). Außerdem ist bei den ISIS-Werten nicht bekannt, für welchen Raumwinkel sie gelten. Für eine vergleichende Aussage wird angenommen, daß auch die ISIS-Werte für einen kleinen Raumwinkel gelten (ca. +/-2°).

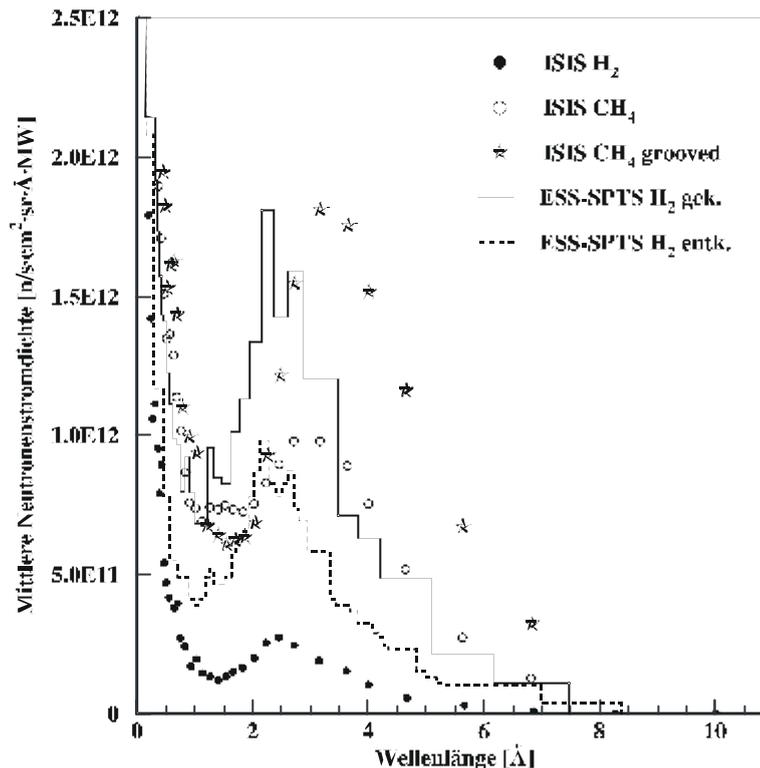


Abb. 8.2: Vergleich der Wellenlängenabhängigkeit der mittleren Neutronenstromdichten verschiedener ISIS-Moderatorkonzepte mit entsprechenden ESS-Ergebnissen; alle normiert auf 1MW Protonenstrahlleistung. Die Ergebnisse der ISIS-Methanmoderatoren beziehen sich auf die geplante Targetstation II und gelten für Moderatortemperaturen von 20K. Die ESS-Werte sind auf einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$ bezogen. (d =Moderatordicke, PM =Vormoderator, $Ext.$ =Extension, $gek.$ = gekoppelt, $entk.$ = entkoppelt)

Es ist ein deutlicher Intensitätsgewinnfaktor von 4-6 durch einen Methanmoderator (20K) mit einem sogenannten „groove“ gegenüber dem Wasserstoffmoderator in der ISIS-Geometrie zu sehen und gegenüber dem Methanmoderator bei $T=100K$ ist einen Gewinn von ca. 1,5 sichtbar. Von der Höhe der Intensitäten her erreicht der ESS-Wasserstoffmoderator im gekoppelten Zustand die des „groove“-Moderators der ISIS, wobei das Maximum bei einer deutlich kleineren Wellenlänge liegt.

Der entkoppelte Wasserstoffmoderator der ESS liefert ungefähr 3-4mal soviel wie der von ISIS (TSI). Dies läßt sich auf den Vormoderator zurückführen, der bei ESS den Wasserstoffmoderator umgibt.

Bei den Ergebnissen muß letztendlich auch der enorme Leistungsunterschied miteingerechnet werden, so daß die ESS-Werte absolut ca. 50-mal höher sind als die ISIS-Werte.

8.2 SNS-Spallation Neutron Source- Oak Ridge National Laboartories, USA

Die „Spallation Neutrone Source (SNS)“ ist eine im Bau befindliche amerikanische Hochleistungsspallationsquelle, die als kurzgepulste Quelle ausgelegt ist /sns2002/.

- Neutronenquelle	SNS	ESS <small>(in Klammern Angaben für LPTS, sofern abweichend von SPTS)</small>
- Protonenstrahlparameter: Leistung Energie Stromstärke Frequenz	- 1 MW (geplant 2MW) - 1 GeV - 1.4 mA - 60 Hz (nur Kurzpuls)	- 5MW - 1.334GeV - 3,75mA - 50Hz (16.667Hz)
- Target: Material Aggregatzustand	- Quecksilber - Flüssig	- Quecksilber - Flüssig
- Reflektor: Material	- Beryllium	- Blei
- Moderatoren: Anordnung Material und Temperatur T	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: H ₂ T=20K: 2 gekoppelte mit H ₂ O-Vormoderatoren, 1 entkoppelter, vergifteter mit H ₂ O-Vormoderator - thermischer Moderator: 1 entkoppelter, vergifteter H ₂ O-Moderator T=300K	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: H ₂ T=20K mit H ₂ O-Vormoderator T=300K optional: Methanhydrat T=20K - thermischer Moderator: H ₂ O T=300K

Tabelle 8.2: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen SNS und ESS

In Abb. 8.3 wird eine Gegenüberstellung von mittleren Neutronenstromdichten von ESS-Moderatoren und SNS-Moderatoren gezeigt – basierend auf einer Geometrie von Iverson /ive2001/ und dargelegt in Referenz /anl2001/.

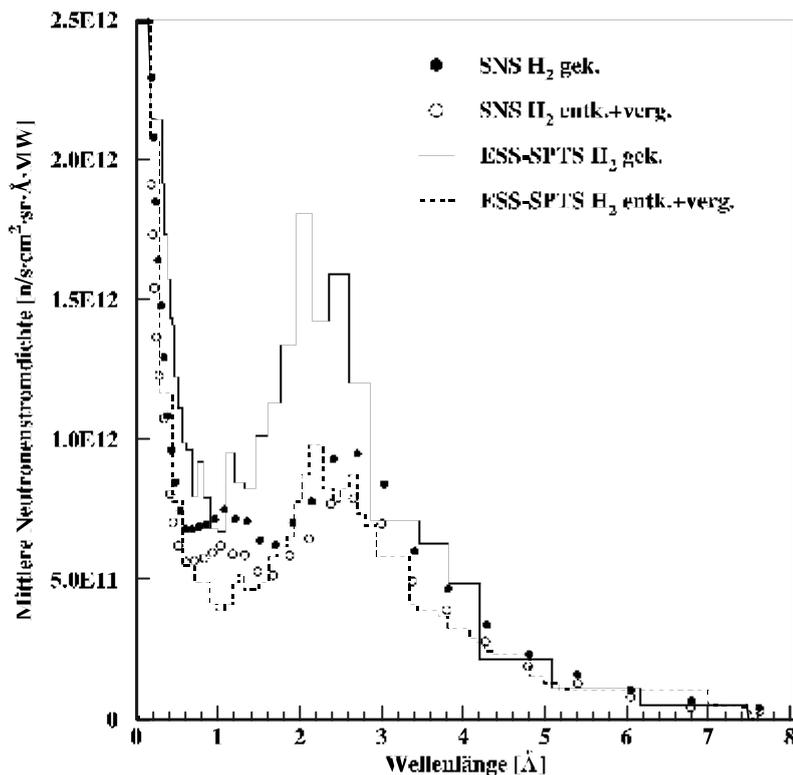


Abb. 8.3: Vergleich der mittleren Neutronenstromdichten von SNS- und ESS-Moderatoren für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 1MW; Sowohl die SNS- als auch die ESS-Werte beziehen sich auf einen kleinen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$

Abb. 8.3 zeigt, daß für beide Targetsysteme SNS und ESS die wellenlängenabhängigen Spektren der Neutronenstromdichten fast identisch sind. Im Gegensatz dazu zeigen die Verläufe bei den gekoppelten Systemen große Unterschiede, die im Wesentlichen bedingt durch die Geometrie der Vormoderatoren sind. Weitere Unterschiede der Spektren ergeben sich aus den unterschiedlichen Reflektorkonzepten (SNS: Be+D₂O-Kühlung -> thermischer Reflektor; ESS: Pb+D₂O-Kühlung -> schneller Reflektor, siehe Kap. 3.3, S. 32).

Die Entkopplung des SNS-Moderators bringt Verluste von maximal ca. 20% mit sich, beim ESS-Moderator ca. 30%. Der große Unterschied bei den gekoppelten Moderatoren ist bedingt durch die Geometrien. Bei der SNS wird ein thermalisierender Reflektor verwendet. Der ESS-SPTS-H₂-Moderator ist durch die Konusform der Strahlrohre von mehr Reflektormaterial umgeben und gleichzeitig ist der Vormoderator in der ESS-Geometrie in das Strahlrohr hinein verlängert, was wesentlich zu der höheren Intensität gegenüber dem SNS-Moderator beiträgt.

Dies wird beim Vergleich der entkoppelten Wasserstoffmoderatoren deutlich. Hier liegen die Intensitäten nahezu gleichauf, das Maximum ist beim SNS-H₂-Moderator zu einer größeren Wellenlänge hin verschoben, was eine höhere Ausbeute an kalten Neutronen bedeutet, erklärbar durch das Beryllium als Reflektormaterial, das gleichzeitig thermalisiert. Der unterschiedliche Reflektor zwischen SNS und ESS erzeugt generell Unterschiede in der Neutronik der Moderatoren.

8.3 J-PARC –Japan Proton Accelerator Research Complex Tokai, Japan

Mit dem Bau der JSNS ist seit kurzem begonnen worden. Sie wird eine Spallationsquelle im Kurzpulsbetrieb sein. Details finden sich in Referenz /jkj2002/.

- Neutronenquelle	J-PARC	ESS (in Klammern Angaben für LPTS, sofern abweichend von SPTS)
- Protonenstrahlparameter: Leistung Energie Stromstärke Frequenz	- 1 MW - 3 GeV - 0.33mA - 25 Hz (nur Kurzpuls)	- 5MW - 1.334GeV - 3,75mA - 50Hz (16.667Hz)
- Target: Material Aggregatzustand	- Quecksilber - Flüssig	- Quecksilber - Flüssig
- Reflektor: Material	- Komposit: Beryllium innen, Eisen außen	- Blei
- Moderatoren: Anordnung Material und Temperatur	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: 3 H ₂ T=20 K mit H ₂ O-Vormoderator T=300K, davon 1 vergifteter 1 entkoppelter 1 gekoppelter	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: H ₂ T=20K mit H ₂ O-Vormoderator T=300K optional: Methanhydrat T=20K - thermischer Moderator: H ₂ O T=300K

Tabelle 8.3: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen J-PARC und ESS

In Abb. 8.4 werden die Spektren der mittleren Neutronenstromdichten eines vormoderierten Wasserstoffmoderators von J-PARC /mot2001/ und ESS verglichen:

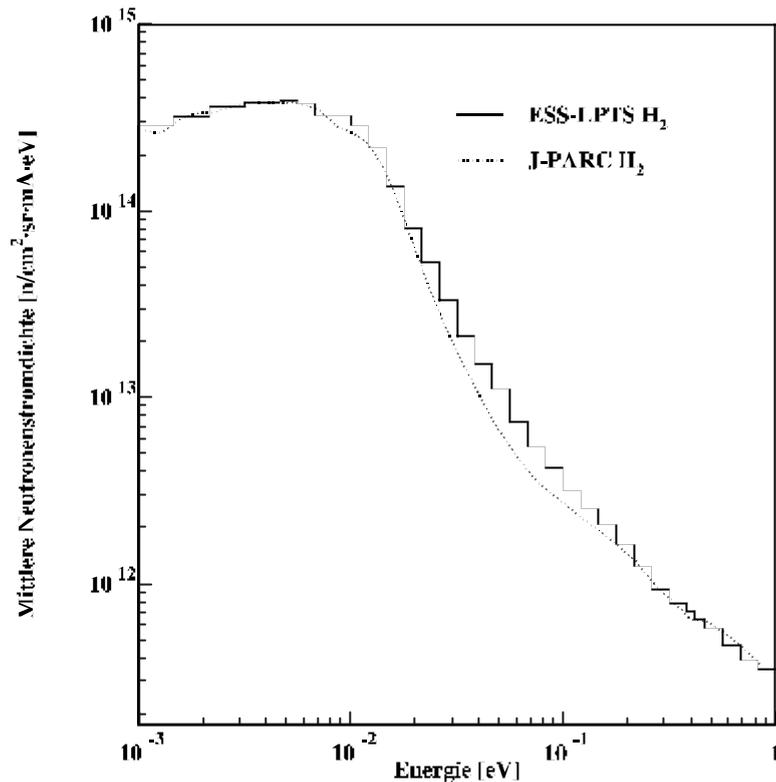


Abb. 8.4: Vergleich der mittleren Neutronenintensitäten für einen gekoppelten para-H₂-Moderator in J-PARC-Geometrie und ESS –Geometrie, beide sind auf eine mittlere Stromstärke von 1mA und einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$ normiert

Es sind fast keine Unterschiede zur J-PARC festzustellen, außer im Bereich von ca. 20meV bis 100meV, in denen die Intensitäten des J-PARC -Moderators niedriger verlaufen. Dies ist bedingt durch den Vormoderator, dessen Material und Dimensionen gegenüber ESS anders sind. Wasser als Vormoderatormaterial wie bei der ESS ist ein besserer Streuer als ein Beryllium- Vormoderator wie im Falle der J-PARC.

Obiges Spektrum für J-PARC beruht auf Monte-Carlo-Rechnungen, die wie die ESS einen Bleirefektor beinhalten, der nun durch einen Berylliumreflektor ersetzt wurde. Trotz einiger geometrischer Abweichungen und kleinen Unterschieden in den Moderator Konzepten ist die Übereinstimmung zwischen den Spektren verblüffend.

Bei der Betrachtung absoluter Werte ergibt sich für die ESS eine fünfmal höhere Intensität durch die fünffache Leistung gegenüber J-PARC.

8.4 SINQ – Spallationsinduzierte Neutronenquelle – PSI Villingen/Schweiz

SINQ steht für „Spallationsinduzierte Quelle“ und befindet sich am PSI in Villingen/Schweiz. Es ist die einzige europäische Spallationsquelle, die im kontinuierlichen Betrieb gefahren wird, Details finden sich in den Referenzen /sin2001/ und /bau1992/.

- Neutronenquelle	SINQ	ESS <small>(in Klammern Angaben für LPTS, sofern abweichend von SPTS)</small>
- Protonenstrahlparameter: Leistung Energie Stromstärke Frequenz	- 0,75 MMW - 570 MeV - 1.4mA - entfällt wg. kontinuierlichem Betrieb	- 5MW - 1.334GeV - 3,75mA - 50Hz (16.667Hz)
- Target: Material Aggregatzustand	- Pb (geplant: Pb-Bi) - Fest (flüssig)	- Quecksilber - Flüssig
- Reflektor: Material	- D ₂ O-Tanksystem	- Blei
- Moderatoren: Anordnung Material und Temperatur T	- Wing-Anordnung - kalter Moderator: D ₂ (V=20l) T=25K - thermischer Moderator (gleichzeitig Reflektor): D ₂ O T=300 K	- Wing-Anordnung - kalte Moderatoren: H ₂ T=20K mit H ₂ O- Vormoderator optional: Methanhydrat T=20K - thermischer Moderator: H ₂ O T=300K

Tabelle 8.4: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen SINQ und ESS

In Abb. 8.5 zeigt ein Vergleich der Moderatorleistung anhand der mittleren Neutronenstromdichten in 1.5m Abstand zum Moderator (SINQ-Werte, /hey1998/) bzw. 2m Abstand zum Moderator (ESS-Werte):

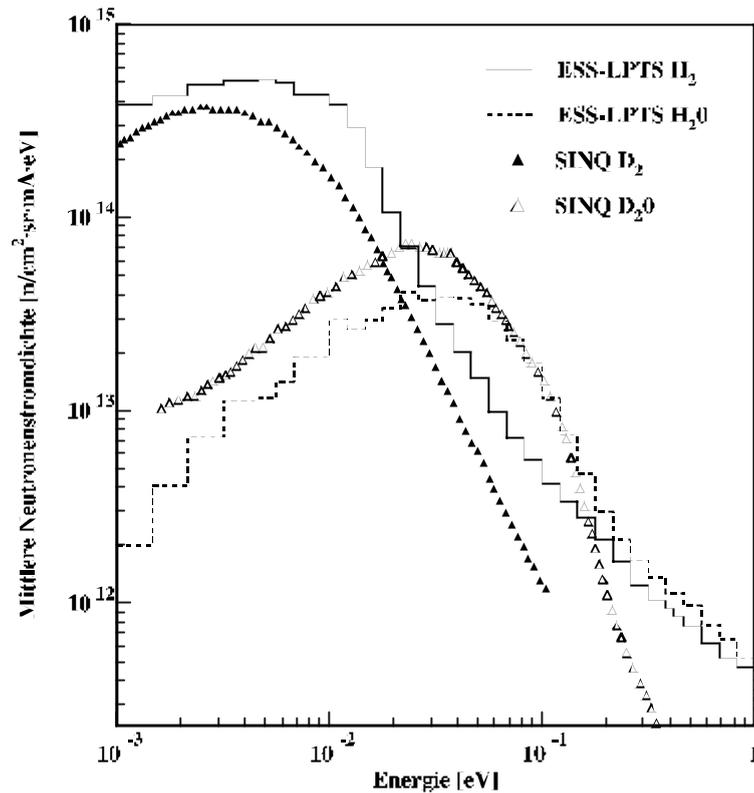


Abb. 8.5: Vergleich der Moderatorleistungen von SINQ und ESS anhand der mittleren Neutronenstromdichten in 1.5 m Entfernung vom jeweiligen Moderator /sin2001/ für einen mittleren Protonenstrom von 1mA

Aufgrund der Größe des D_2O -Moderators bzw. -reflektors ergibt sich eine effizientere Thermalisierung als mit dem H_2O -Moderator. Bei der ESS mit Blei als Reflektor werden die Neutronen aus dem Target im Vergleich zum D_2O kaum abgebremst, bevor sie in den Wassermoderator gelangen. Allein der Wassermoderator sorgt für die Moderation und deshalb ergibt sich für den thermischen Moderator der ESS im Vergleich zur SINQ eine geringere Ausbeute.

Der Wasserstoffmoderator erreicht aufgrund der Dicke ($d=10\text{cm}$, para- H_2) und der Vormoderation rund das doppelte an Intensität wie der D_2 -Moderator von SINQ. Allerdings ist das Spektrum insgesamt etwas härter (höhere mittlere Neutronenenergie) als bei SINQ bedingt durch das verwendete Moderatormaterial. Ein D_2 -Moderator für die ESS wäre nur möglich, wenn ein größeres Volumen (bei SINQ befinden sich 20l D_2 im Moderatorbehälter) und zugleich ein thermalisierender Reflektor verwendet wird. Daß für D_2 ein größeres Volumen benötigt wird, liegt an der größeren Bremslänge als bei Wasserstoff (siehe Tabelle 3.2, Seite 24).

9. Die ESS als intensive Neutronenquelle für eine Bestrahlungseinrichtung von Fusionsreaktormaterialien

In der Fusionsreakorttechnologie besteht die dringende Notwendigkeit, Materialien zu entwickeln, die einer Bestrahlung in einem hochenergetischen Neutronenstrahlenfeld standhalten, welches im Bereich der ersten Wand des Plasmagefäßes oder der sogenannten „Blanket“-Region eines Deuterium-Tritium (D-T) Fusionsreaktors erzeugt wird.

Die Entwicklung und der Test solcher Materialien bilden eine Schlüsselaufgabe in einem Fusionsreaktorprogramm, um kommerziell Fusionsleistung zu produzieren. Sogenannte „low activation structural alloys“ für die erste Wand des D-T-Plasmagefäßes und die Strukturen der Tritium brütenden „Blanketsysteme“ und neutronenmultiplizierende Materialien gehören zu den Materialien, die energetischen 14 MeV Neutronen ausgesetzt sind. Zurzeit gibt es keine Testanlage zur Materialbestrahlung, mit der ein für diese Zwecke notwendiges Neutronenfeld simuliert werden kann. Die Notwendigkeit dafür wurde vielfach diskutiert wie in Referenzen /moe2000/, /nod1998/ oder /ifm1996/.

Es gibt mehrere Klassen von Strahlenschädigungsparametern, welche solche Strukturmaterialien unter Teilchenbestrahlung verändern:

- *Gasproduktion:* Hierbei werden Wasserstoff- und Heliumisotope durch Kernreaktionen mit Neutronen freigesetzt. Wasserstoff und seine Isotope sind in vielen Materialien löslich. Der Einfluß von Wasserstoff in Metallen ist aus der Reaktortechnik sehr gut bekannt. Von großer Wichtigkeit sind die Produktion und die Ausbreitung von Helium, das in den meisten Metallen unlöslich ist. Entstehende Heliumatome tendieren zu wandern und Blasen zu bilden, so daß schließlich das Material unter der Bestrahlung spröde wird.
- *Displacements:* Ein anderer Typ von Strahlenschäden in Metallen ist die Erzeugung von Atomversetzungen – „Displacements“ – im Gitter der Materialien, die durch die Wechselwirkung der Primärteilchen oder durch die kinetische Rückstoßenergie, die die Atome bei der Emission nuklearer Teilchen erhalten, zustande kommen. Auch diese Effekte sind hinreichend aus der Reaktortechnik bekannt /dro1972/. Abschätzungen und Berechnungen der Schädigungsenergie und der totalen Versetzungsrate (ausgedrückt in dpa=Displacements per atom per time unit) können nach der Theorie von Lindhard et al. /lin1963/ und Robinson /rob1972/ durchgeführt werden.
- *Transmutation:* Neben der Gasproduktion und der Schädigung des Materials durch atomare Versetzungen ist die Produktion von chemischen Elementen durch nukleare Reaktionen eine zusätzliche Größe, die zur Materialveränderung führt. Dieser Vorgang wird Transmutation genannt. Die Referenzstrukturmaterialien für die erste Wand eines sogenannten DEMO-Fusionsreaktor sind martensitische Stähle, die auch im unbestrahlten Zustand bestimmte Verunreinigungen enthalten. Die interessierenden Elemente sind Phosphor, Schwefel, Calcium und Mangan.

In Tabelle 9.1 sind einige Bedingungen für eine Fusionsmaterial-Bestrahlungsanlage zusammengestellt:

Neutronenparameter	Bedingung
Neutronenfluß/Volumen/Reaktion	erste Wandbelastung 2MW/m ² in einem Bestrahlungsvolumen 0,5l liefert ~10dpa/Jahr
Neutronenspektrum	Annäherung an das Neutronenspektrum der ersten Wand eines DEMO-Fusionsreaktors Kriterien sind: - displacements (dpa's) - Gasproduktion H, He
Integrale Neutronenfluenz	Entsprechend dem DEMO-Fusionsreaktor: relevante Fluenz mit 150 dpa in einigen Jahren

Tabelle 9.1: Bedingungen für eine Fusionsmaterialbestrahlungsanlage

Gegenwärtig ist eine Bestrahlungseinrichtung namens IFMIF (**I**nternational **F**usion **M**aterials **I**rradiation **F**acility) in Planung. IFMIF ist eine Neutronenquelle hoher kontinuierlicher Intensität, mit der Neutronen über Deuteronen mit einer Energie von 40 MeV und einer Strahlleistung von 125 mA mit einem Flüssig-Lithium-Target erzeugt werden. Die Neutronen haben ein breites Energiemaximum bei ca. 14 meV mit einer maximalen Energie bis 40 MeV. Da diese Anlage aber in einem Kostenrahmen von ca. 700 Millionen Euro - ca. 1/3 der ESS liegt - sollte geprüft werden, ob eine hochintensive Spallationsneutronenquelle wie ESS zusätzlich solche Materialbestrahlungsuntersuchungen leisten kann. Zudem ist der Zeitrahmen ein entscheidender Punkt. Die Fertigstellung von IFMIF wird nach der jetzigen Planung frühestens um 2018 möglich sein, die Inbetriebnahme der ESS ist für 2012 geplant, so daß selbst bei den dort zu erwartenden geringeren Schädigungsraten erste Ergebnisse über die Materialschädigung früher vorliegen würden.

Für eine Beurteilung, ob die Verwendung einer Spallationsquelle wie die ESS als Bestrahlungseinrichtung für Fusionsmaterialien anstelle der IFMIF-Anlage sinnvoll ist, wurden entsprechende Monte-Carlo-Simulationen zur Berechnung diverser Strahlungsschädigungsparameter durchgeführt. Als Basis wurde die LPTS-Geometrie (siehe Abb. 5.11, Seite 54) mit einem Wasserstoffmoderator oberhalb und einem Wassermoderator unterhalb des Targets verwendet. Zudem wurden zwei Bestrahlungspositionen eingefügt, bei denen die Bestrahlungsprobe durch einen einfachen Eisenzylinder (d=10cm, h=10cm) nachgebildet wurde. Ein vertikaler Schnitt durch die verwendete Anordnung ist in Abb. 9.1 dargestellt:

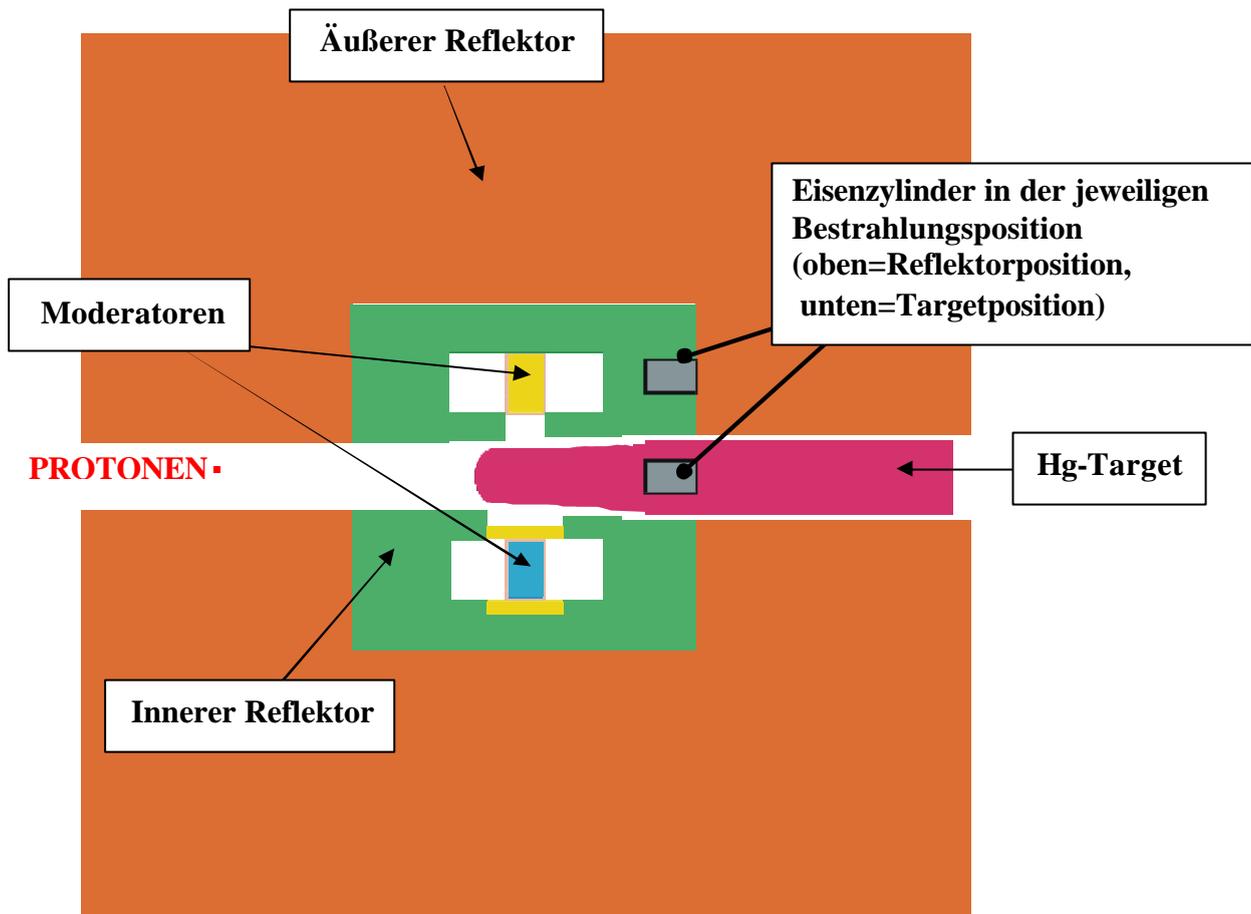


Abb. 9.1: Vertikaler Schnitt durch die Target-Moderator-Reflektor-Anordnung der ESS (Langpulsgeometriesystem LPTS) mit zwei möglichen Bestrahlungspositionen dargestellt durch zwei Eisenzylinder mit einem Volumen von 500 cm^3 innerer und äußerer Reflektor 85 Vol% Pb und 15 Vol% D_2O ;
 Moderator oben: H_2O ($T=300 \text{ K}$),
 Moderator unten: $para-H_2$ ($T=20K$) + H_2O -Vormoderator ($300K$);

Die Spektrenanteile wurden als $E' > E$ betrachtet, wobei E' die Neutronenfangsenergie von 1334 MeV ist und E die obere Energiegruppengrenze für das jeweilige Neutronenenergiegruppenintervall ist.

In Abb. 9.2 sind die berechneten Neutronenflußdichtespektren für die Bestrahlungsposition in der ESS Targetstation im Vergleich zu einem Reaktorspektrum und einem entsprechenden Fusionsreaktorspektrum dargestellt.

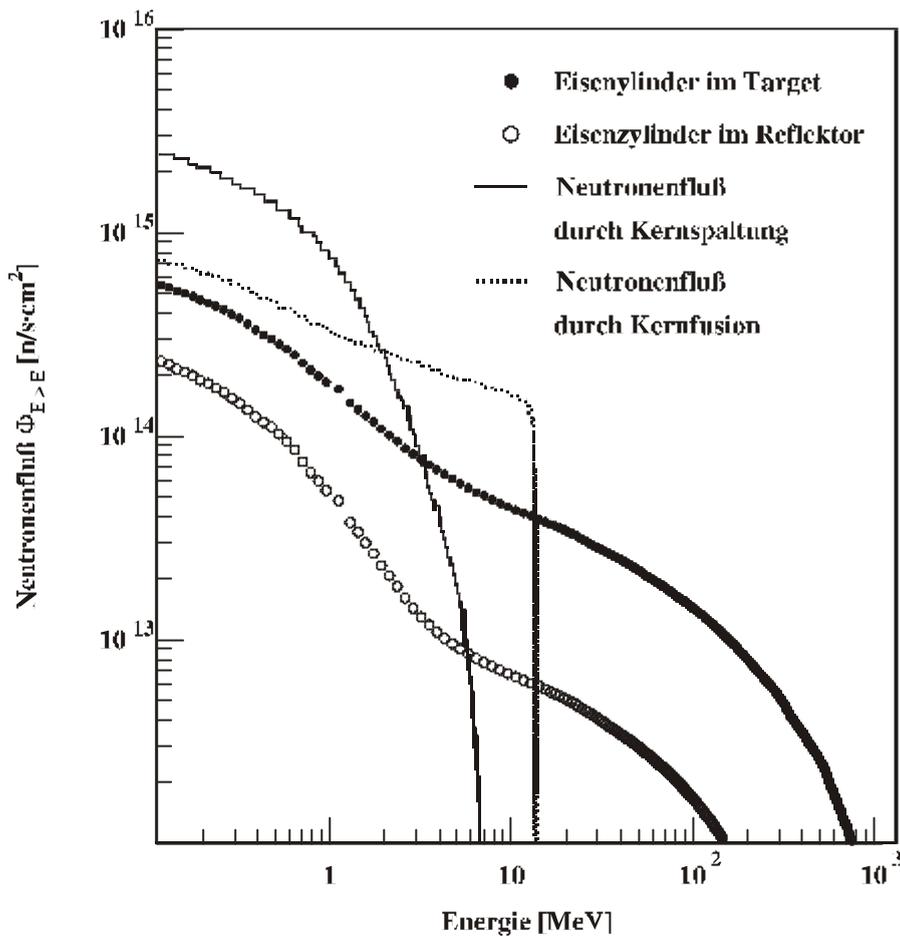


Abb. 9.2: Vergleich der für die jeweiligen Bestrahlungspositionen in der ESS berechneten Neutronenflußspektren mit typischen Spektren aus Spalt- und Fusionsreaktor
 E' : Anfangsenergie der Neutronen 1334 MeV,
 E : obere Neutronenenergiegruppengrenze

Vergleicht man die typischen Spektren, so ist in Abb. 9.2 zu erkennen, daß das Spaltspektrum keine höheren Energien als 10 MeV enthält. Das Fusionspektrum enthält eine steile Kante bei ca. 15 MeV. Dagegen enthalten die Neutronenflußspektren für die Bestrahlungseinsätze im ESS-Targetsystem einen hohen Anteil hochenergetischer Neutronen. Außerdem können in den Bestrahlungspositionen durch den Spallationsprozeß Flußbeiträge durch geladene Teilchen – insbesondere Protonen – entstehen, die dann mit den hochenergetischen Neutronen zu zusätzlichen Schädigungsraten führen können.

Mit den berechneten Spektren (siehe Abb. 9.3) wurde eine Abschätzung zur Produktion von Verunreinigungen durch Transmutation in der Position des höchsten Flusses der ESS Bestrahlungsproduktion durchgeführt. Hierbei wurden folgende Raten abgeschätzt, um festzustellen, ob Bestrahlungen in Spallationsquellenumgebung zusätzliche Materialveränderungen bewirken:

- Mangan (Mn) < 1400 appm/y
- Calcium (Ca) < 700 appm/y
- Schwefel (S) < 275 appm/y
- Phosphor (P) < 75 appm/y

Diese Raten liegen in der gleichen Größenordnung wie die Verunreinigungen im unbestrahlten Material.

In Abb. 9.3 sind die Neutronenspektren für die ESS Bestrahlungspositionen zusammen mit dem totalen Transmutationswirkungsquerschnitt für Eisen (Fe) dargestellt. Auf der einen Seite sieht man deutlich, daß eine signifikante Transmutation, d.h. die Erzeugung von Fremdelementen, vor allem im Energiebereich zwischen 1-14MeV stattfindet, andererseits sind insbesondere in diesem Energiebereich die Neutronenflußdichten in den Bestrahlungspositionen des ESS-Targets geringer als bei einem Fusionsreaktor (siehe Abb. 9.2).

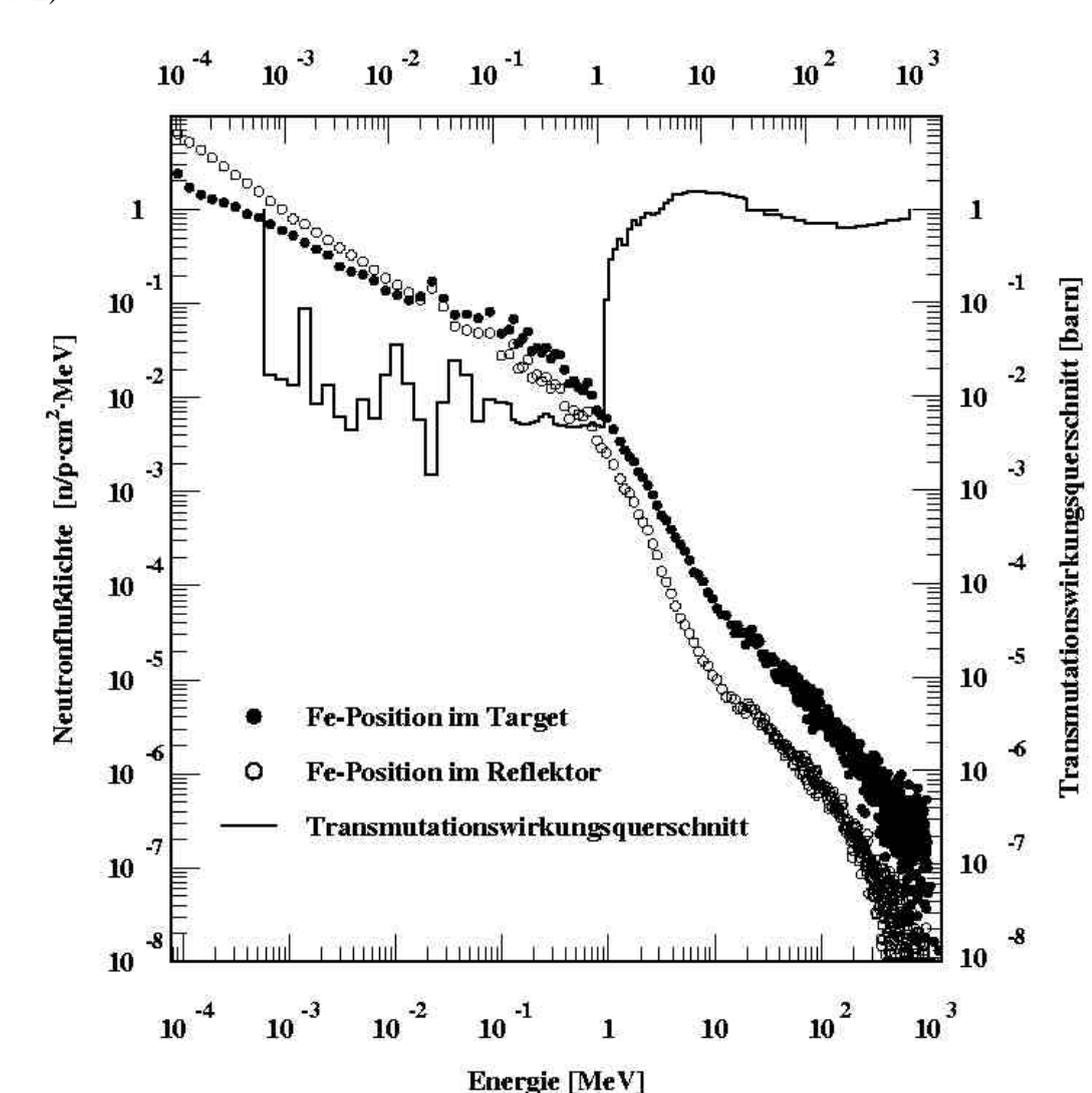


Abb. 9.3: Vergleich der differentiellen Neutronenspektren in ESS-Target-Bestrahlungspositionen. Außerdem ist der typische energieabhängige Verlauf des totalen Transmutations-Wirkungsquerschnitts für Eisen (FE) - rechte Skala – dargestellt.

Um mögliche Bestrahlungspositionen zu definieren, wurden für verschiedene horizontale Schnitte (siehe dazu Abb. 9.1) die Isolinien der totalen Neutronenflußdichten berechnet. Die Abbildungen Abb. 9.4 bis Abb. 9.5 zeigen Isolinien der totalen Neutronenflußdichten für den gesamten Energiebereich (0-1334MeV).

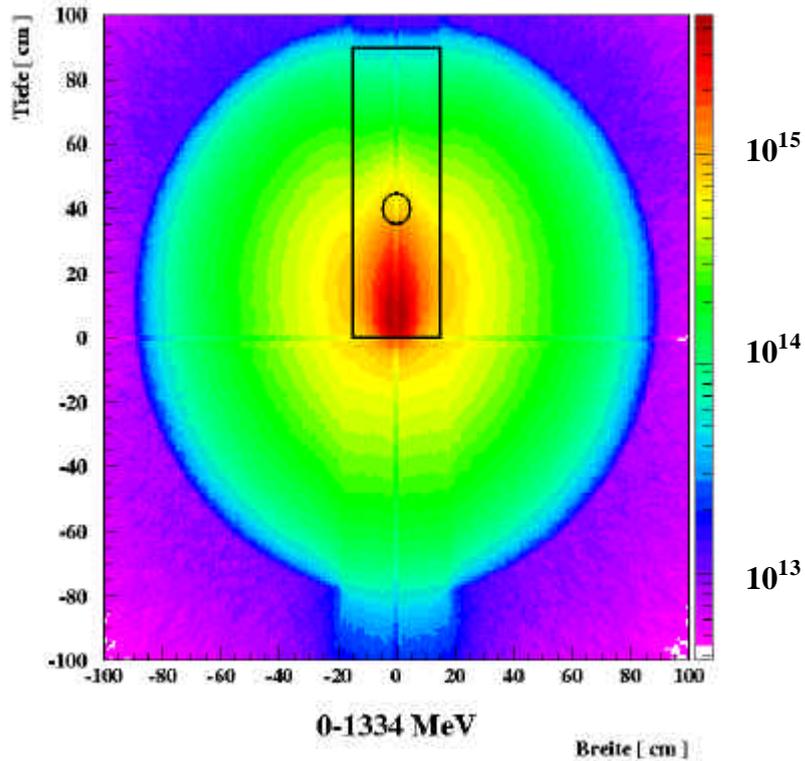


Abb. 9.4: Isolinien der totalen Neutronenflußdichteverteilung (horizontaler Schnitt – Targetmitte); (Kreis=Eisenzylinder mit Bestrahlungsvolumen,) die rechte Skala zeigt die Höhe der Flußintensität [n/cm^2s] an für eine Protonenstrahlleistung von 5MW

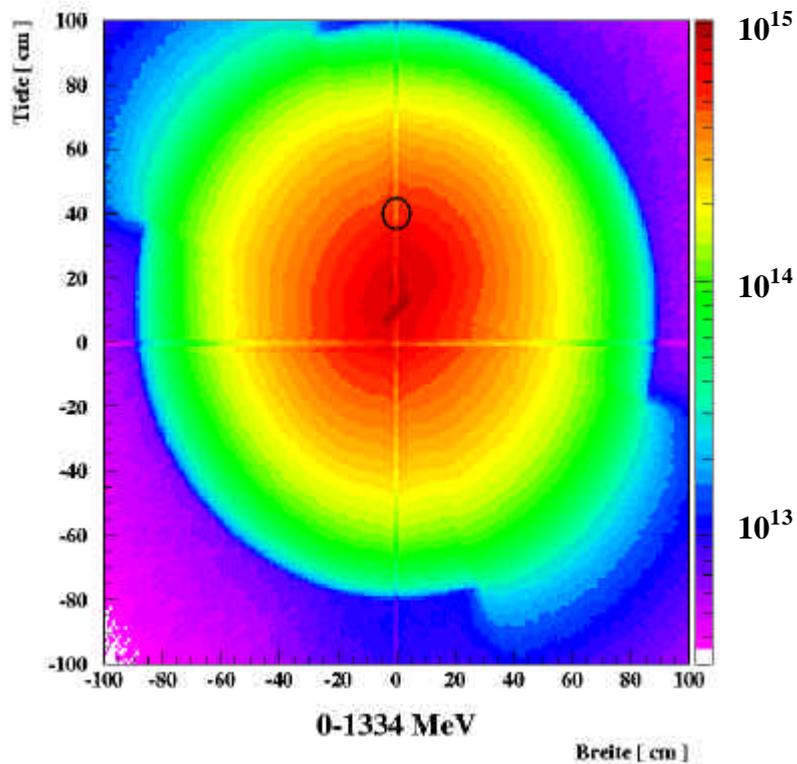


Abb. 9.5: Isolinien der totalen Neutronenflußdichten (horizontaler Schnitt durch Moderatorebene); (Kreis=Eisenzylinder mit Bestrahlungsvolumen) die rechte Skala zeigt die Höhe der Flußintensität [n/cm^2s] an für eine Protonenstrahlleistung von 5MW

Abb. 9.6 zeigt die Isolinien der totalen Protonenflußdichte im Target. Man sieht deutlich, daß die Protonenflußdichten im Wesentlichen auf das Target begrenzt sind.

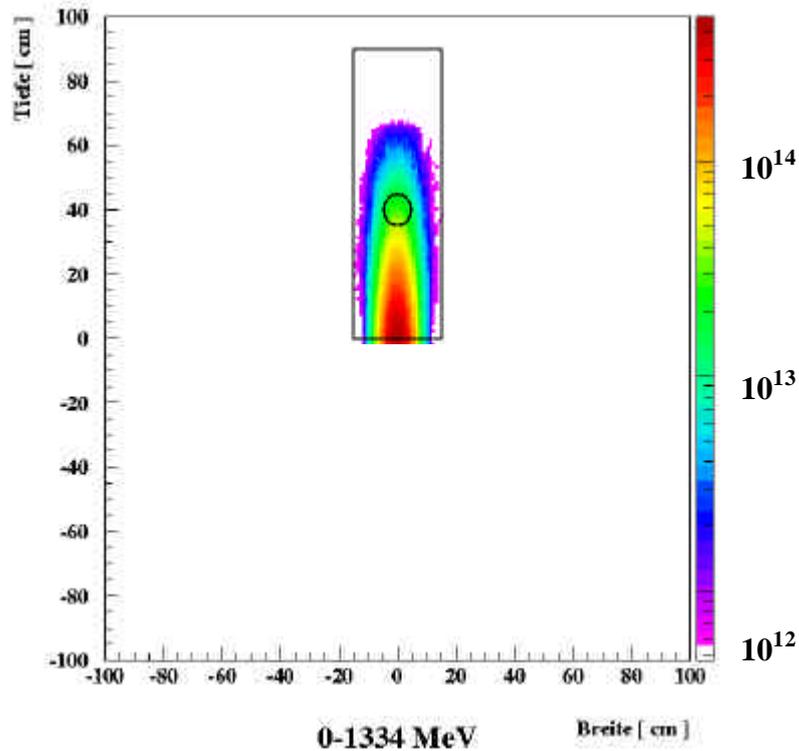


Abb. 9.6: Isolinien der totalen Protonenflußdichten (horizontaler Schnitt durch Targetmitte) ; (Rechteck=Target, Kreis=Eisenzylinder mit Bestrahlungsvolumen,) die rechte Skala zeigt die Höhe der Flußintensität [n/cm^2s] an für eine Protonenstrahlleistung von 5MW

Neben der Produktion von Fremdelementen durch Transmutation werden die entscheidenden Materialschädigungen bei Bestrahlung durch „Displacements“ (dpa's) und durch Wasserstoff- und Heliumproduktion verursacht. Sie bestimmen die Lebensdauer der Materialien in einem Teilchenstrahlungsfeld.

Diese Schädigungsraten (dpa's) und Gasproduktionsraten für Wasserstoff und Helium wurden durch Faltung der Produktionswirkungsquerschnitte /may1996/ und dem „Displacement“-Wirkungsquerschnitt /may1996/ mit den Neutronenflußdichten ermittelt. Die verwendeten Wirkungsquerschnitte sind in Abb. 9.7 und Abb. 9.8 zusammengestellt.

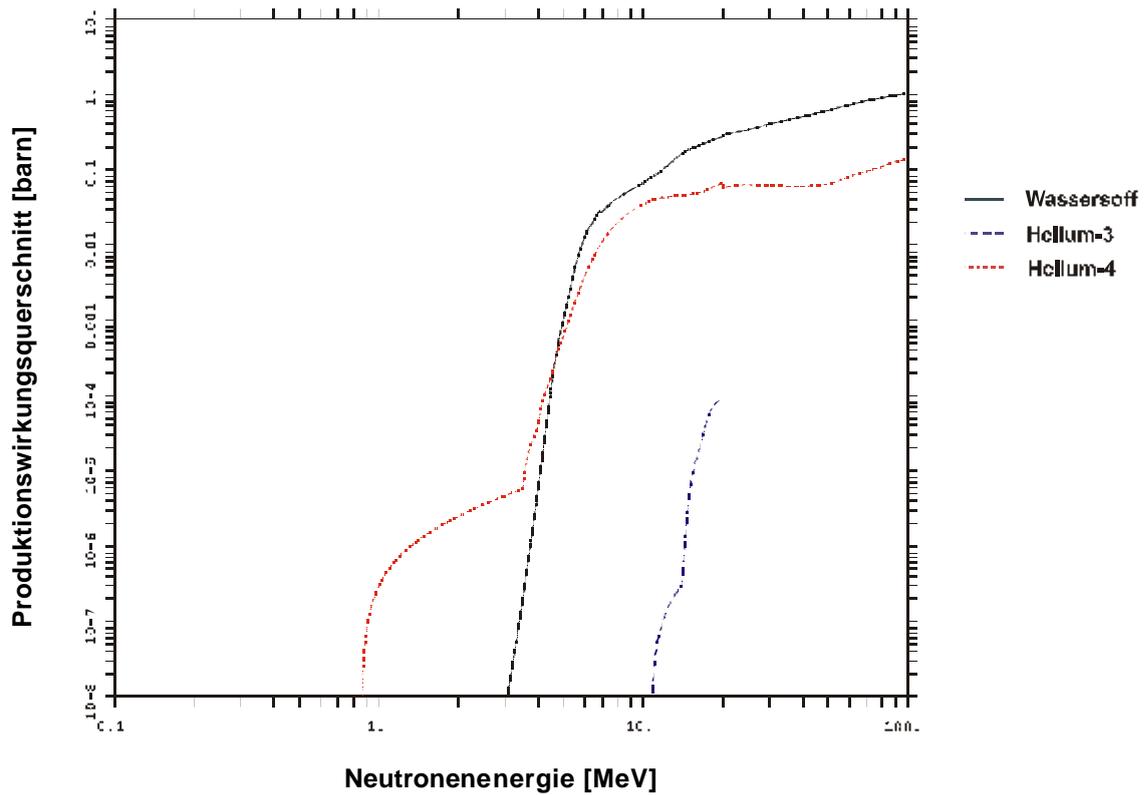


Abb. 9.7: Wasserstoff- und Heliumneutronenproduktionswirkungsquerschnitte für Eisen

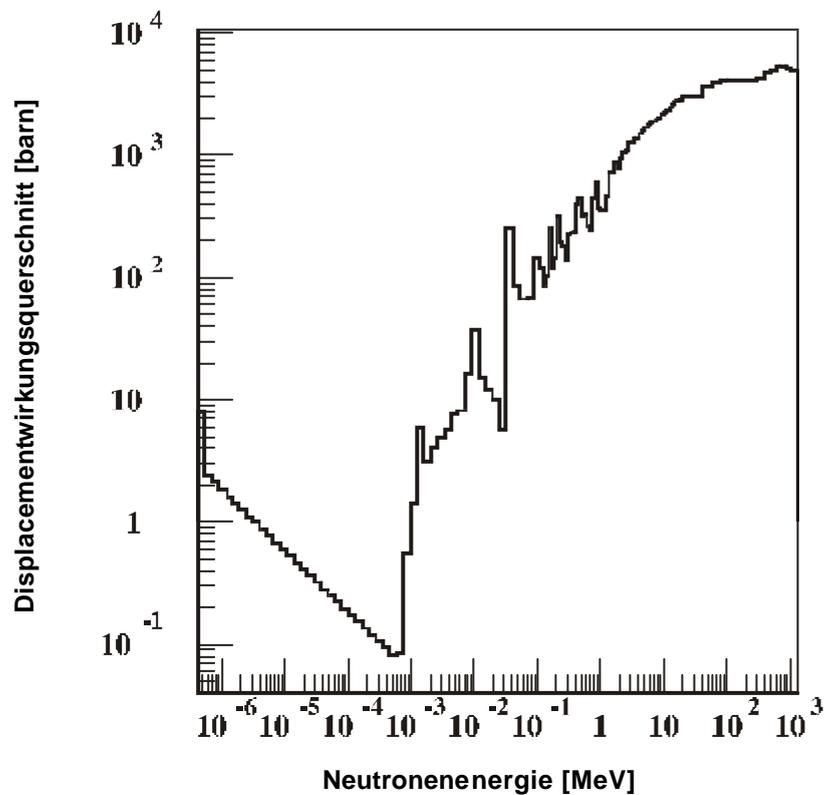


Abb. 9.8: Displacement-Neutronenwirkungsquerschnitt für Eisen

Die Schädigungsraten und weitere Daten, die sich aus den Simulationen ergeben, werden in Tabelle 9.2 mit Daten für einen geplanten Kernfusionsreaktor (DEMO) und mit der geplanten Bestrahlungseinrichtung IFMIF gegenübergestellt.

Hierbei werden die sich ergebenden He/dpa und H/dpa Verhältnisse als repräsentative Größen zum Vergleich der einzelnen Anlagen herangezogen.

Die He/dpa- und H/dpa-Ratios sind in der Targetmitte wesentlich höher als bei IFMIF durch die bei der ESS vorhandenen hochenergetischen Protonen im Target bedingt. Die Displacementrate an dieser Position entspricht jedoch nur in etwa dem, was mit der „sogenannten „Medium-Flux-Region (MFTM)“, siehe Tabelle 9.2, Spalte 4) von IFMIF zu erwarten ist. In der Reflektorposition der ESS ergibt sich eine Absenkung der Raten und eine deutliche Absenkung der Displacementrate pro Betriebsjahr der Anlage. Bei dieser Rate (4.3 Displacements) muß eine Bestrahlungsprobe ca. 9mal länger bestrahlt werden als bei IFMIF in der „High-Flux-Zone (HFTM)“, d.h. wenn ESS 2012 in Betrieb gehen würde und IFMIF 2020, dann wäre dieser Nachteil durch die 8 Jahre frühere Startzeit fast aufgehoben.

	DEMO 2MW/m ² *	IFMIF 10 MW		ESS 5MW LPTS	
		HFTM*	MFTM*	Fe-Zylinder	
				Targetmitte	Reflektor
Totaler Fluß [n/cm ² *s]	7.1·10¹⁴	1.2·10¹⁵	-	8.2·10¹⁴ (2.6·10 ¹³ Protonen)	5.31·10¹⁴ (2.34·10 ¹¹ Protonen)
Anteil > 15 MeV [%]	0	15	-	5	1.3
He-Produktionsrate [appm/s]	5.7·10⁻⁶	1.1·10⁻⁵	3.0·10⁻⁶	1.6·10⁻⁵	7.1·10⁻⁷
H-Produktionsrate [appm/s]	2.2·10⁻⁵	4.2·10⁻⁵	1.1·10⁻⁵	3.0·10⁻⁵ (nur Neutronen)	4.28·10⁻⁶ (nur Neutronen)
Displacementrate [dpa/s]	5.4·10⁻⁷	1.2·10⁻⁶	3.2·10⁻⁷	5.5·10⁻⁷	1.38·10⁻⁷
He/dpa ratio [appm/dpa]	11	9.2	9.2	29	5.1
H/dpa Ratio [appm/dpa]	41	35	35	73	31.24
Displacements pro Betriebsjahr [dpa]	17	38	10	17	4.3
Transmutationsrate [ppm/s]	-	-	-	nicht berechnet	2.73·10⁻³
Testvolumen [l]	-	0.4	6	0.5	0.5

*Die Werte für DEMO sind für die erste Wand, die direkt den Fusionsneutronen ausgesetzt ist; für IFMIF ist HFTM das High-Flux-Test-Module und MFTM das Medium-Flux-Test-Module (siehe /nod1998/). Der Flußanteil durch Protonen ist maximal 10%.

Tabelle 9.2: Berechnete Schädigungsraten für die jeweiligen Bestrahlungspositionen in der ESS im Vergleich mit DEMO und IFMIF

Aus dem Vergleich der Werte aus Tabelle 9.2 können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Es gibt technisch realisierbare Positionen im Reflektor oberhalb des Hg-Targets der ESS-Target-Moderator-Reflektor-Anordnung.
- Die dort verfügbaren Flüsse schneller Neutronen führen zu Verlagerungsraten, die etwa 70% der im DEMO-Fusionsreaktor erwarteten Maximalraten erreichen.
- Die He/dpa und H/dpa Verhältnisse sind geringfügig kleiner als im Fusionsfall.
- Die betrachteten Bestrahlungspositionen in der Targetstation ESS sind kompatibel mit dem derzeitigen ESS-Referenzentwurf und beeinträchtigen nicht die Nutzung der ESS als Neutronenquelle.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Mittels der Monte-Carlo-Simulationen für die geplante Spallationsquelle ESS ist es möglich, erste Abschätzungen über die Leistungsfähigkeit diverser Moderator-konzepte zu geben und verschiedene Einflußparameter auf eine maximale Neutronenstromdichte hin zu optimieren, um eine Grundlage zu geben für die spätere Auswahl eines Moderator-konzeptes und der sicherheitstechnischen Auslegung der ESS-Anlage.

Grundlagen über Spallation, über die verwendete Monte-Carlo-Simulationsmethode und insbesondere über die verwendeten Wirkungsquerschnitte wurden beschrieben.

Zunächst wurde nach dem Referenzdesign /ess1996/ die Kurzpulstargetstation SPTS mit vier Moderatoren in Winggeometrie nachgebildet und Berechnungen der Neutronenstromdichten für Wasser- und Wasserstoffmoderatoren in den drei Konzepten gekoppelt, entkoppelt und entkoppelt + vergiftet durchgeführt. Die höchsten Intensitäten sind mit der gekoppelten Variante zu erreichen, dabei liegt das Maximum der mittleren Neutronenstromdichten beim Wassermoderator bei ca. 25 meV, d.h. der Moderator ist nahezu im thermischen Gleichgewicht. Beim Wasserstoffmoderator allerdings ist das Maximum bei ca. 4 meV statt theoretisch bei 2 meV, was der Moderatortemperatur von 20 K entspricht. Beim Wasserstoff sind mehr Verluste gegeben wie z.B. durch Spinumklappung und dem generellen Verhalten von Wasserstoff, der nicht ausreichende Anregungsmechanismen in den niedrigen Energiebereichen, um das thermische Gleichgewicht im Moderator herzustellen.

Der Einfluß der Entkopplung ist beim Wasserstoffmoderator erheblich größer, da dieser mit einem Vormoderator ausgestattet wurde. Da im Vormoderator ein hoher thermischer Neutronenfluß Richtung Moderator strömt und das Entkopplungsmaterial zwischen Moderator und Vormoderator sitzt, absorbiert der Entkoppler einen großen Anteil des Neutronenflusses, der ansonsten vom Wasserstoffmoderator thermalisiert wird. Das Entkopplungsmaterial war Kadmium; werden andere Materialien verwendet, können sich andere Resultate ergeben.

Wird bei den entkoppelten Moderatoren zusätzlich eine Vergiftung eingesetzt, so führt dies sowohl beim Wasser- als auch beim Wasserstoffmoderator zu einer weiteren Schmälerung der Pulsbreite, d.h. Neutronen mit einer längeren Aufenthaltszeit im Moderator werden eingefangen. Bei der hohen Leistung der ESS ist die Dicke der Vergiftungsschicht sehr bedeutsam für die Lebensdauer. Als Mindestdicke wird dabei 500 µm angegeben.

Die Langpulsstargetstation LPTS wurde nachgebildet mit einem Zweimoderatorkonzept, bei dem beide Moderatoren als gekoppelt angenommen wurden, um höhere Intensitäten zu garantieren. Zwar wurde auch der Wassermoderator untersucht, aber der Schwerpunkt bei der LPTS liegt auf kalte Moderatoren wegen den Anforderungen der Neutronenstreuexperimente. Ein wesentlicher Unterschied zu der SPTS-Geometrie ist der weitere Öffnungswinkel der Strahlrohre (45° statt 30°).

Dabei wurde versucht, zunächst eine Abschätzung über die Leistung einer sogenannten Fluxtrapanordnung und der – wie in der SPTS verwendeten – Wing-Anordnung zu geben. Beide Anordnungen wurden für diese Abschätzung in stark vereinfachter Weise dargestellt. Zwar ergab erstere höhere Intensitäten, aber nicht in dem Maß, die eine derart komplizierte Bauweise des Flüssigmetalltargets aus Quecksilber in der ESS rechtfertigen würden.

Daraufhin wurde die Winganordnung - mit einem Wassermoderator oberhalb und einem Wasserstoffmoderator mit Vormoderator unterhalb des Targets - detaillierter aufgebaut. Der Hauptunterschied lag in dem Einbau der Strahlrohre, die zu einem Intensitätsverlust der Neutronenstromdichte um ca. 75% führen, aber realistisch sind.

Mittels verschiedener Abwandlungen und Optimierung von Dimensionen wurde letztendlich ein realistisches Konzept für einen 100%para-Wasserstoffmoderator ($T=20\text{K}$) mit H_2O -Vormoderator gefunden, das eine hohe Neutronenstromdichte bietet. Bei einer Betrachtung anderer Reflektormaterialien wurde das ursprünglich im ESS Referenzdesign verwendete Bleireflektor (mit 15Vol.% D_2O als Kühlmittel) als sehr gut geeignet eingestuft, gleichzeitig hohe Intensitäten und einen schnellen Pulszerfall zu ermöglichen.

Ausgehend von den sehr unterschiedlich verlaufenden Neutronenstreuungsquerschnitten im thermischen Bereich von ortho- und para-Wasserstoff wurden Berechnungen durchgeführt mit verschiedenen ortho-para-Verhältnissen im gekoppelten Wasserstoffmoderator (sowohl in der SPTS- als auch in der LPTS-Geometrie). Dabei zeigten sich die größten Unterschiede zwischen 100% ortho- und 100%para-Wasserstoff, insbesondere in der LPTS-Geometrie. Bei ortho-Wasserstoff werden besonders kalte Neutronen hochgestreut zu höheren Energien.

Im Vergleich 100%para-Wasserstoff zu Festmethan als Moderatormaterial, je bei $T=20\text{K}$, sind mit Wasserstoff ähnliche Spitzenintensitäten zu erreichen, jedoch maßgeblich beeinflusst von der Existenz und den Dimensionen des Vormoderators.

Wird der material- und größenidentische Vormoderator des Wasserstoffmoderators bei Festmethan eingesetzt, so hat dieser keine intensitätssteigernde Wirkung zu dem Festmethanmoderator ohne Vormoderator, allerdings wirkt der Vormoderator auch als „Vorkühler“; er sorgt für eine geringere Energiedeposition des eigentlichen Moderators. Im Falle des Methans bedeutet dies eine geringere Strahlenbelastung und weniger Radiolyse, also Verringerung von Polymeren im Moderatorbehälter und Minimierung des „burping“-Phänomens. Der Vorteil des Methanmoderators liegt in hohen Intensitäten bei sehr niedrigen Energien (ca. 2meV). Sollte die Entscheidung für einen Methanmoderator fallen, ist ein Vormoderator notwendig, jedoch eine weitere Dickenoptimierung desselben durchzuführen, da eine zu große Dicke zur Intensitätssenkung führen kann.

Die alternativen Moderatorkonzepte - der multispektrale „side-by-side“-Moderator und der „back-to-back-Moderator - zeigen keine Vorteile bezüglich der Neutronenintensität im Vergleich zu den ursprünglich betrachteten Moderatorkonzepten.

Im Vergleich zu anderen Spallationsquellen zeigt bei Normierung auf dieselbe Leistung die ESS ähnliche Ergebnisse wie gegenwärtig existierende und geplante Quellen.

Im Vergleich zur ISIS erzielt man mit dem gekoppelten Wasserstoffmoderator in der SPTS-Geometrie ähnliche Spitzenintensitäten wie mit dem „grooved“-Methanmoderator, jedoch bei einer höheren Energie (4 statt 2 meV bzw. 2 statt 3 Å) und in einem wesentlich schmaleren Energieband. Allerdings ist die ESS fünfzigfach stärker hinsichtlich der Leistung ausgelegt und demzufolge die absolute Intensität ebenfalls 50 x größer als bei ISIS.

Die Ähnlichkeit zwischen der ESS und SNS ist in der grundsätzlichen Ähnlichkeit der Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen (für kurze Pulse) zu finden. Zwar ist bei der SNS ein Berylliumreflektor vorgesehen und die Moderatoren unterscheiden sich etwas in den Dimensionen, jedoch liegt bei beiden ein Quecksilbertarget vor und para-Wasserstoffmoderatoren mit Wasser-Vormoderatoren. Die Leistung der ESS ist mit 5MW 2,5fach größer als die geplanten 2MW der SNS.

Die Ergebnisse von J-PARC und der ESS sind nahezu identisch, da die Geometrieanordnungen ebenfalls sehr ähnlich sind. Die Leistung der ESS ist höher ausgelegt (5MW statt 2MW).

Die SINQ zeigt mit D_2 und D_2O ebenfalls ähnliche Spektren wie die ESS, aber die Volumina der Moderatoren sind bedingt durch das Moderatormaterial auch größer ausgelegt. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, daß SINQ kontinuierlich betrieben wird.

Die ESS als Bestrahlungseinrichtung für Fusionsmaterialien macht nur Sinn, wenn der zeitliche Rahmen diese zusätzliche Komplikation in der Target-Moderator-Reflektor-Anordnung es erlaubt, d.h. wenn die ESS mindestens 10 Jahre vor der IFMIF-Anlage fertiggestellt wäre. Mit der ESS sind annähernd gleich große Schädigungsraten möglich wie bei IFMIF.

Die durchgeführten Berechnungen dienen alle dazu, im Vorfeld verschiedene Parameter in den Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen der ESS bezüglich der Moderatorkonzepte zu testen und die Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkung auf die sich ergebenden Neutronenstromdichten an der Moderatoroberfläche zu prüfen. Daraufhin kann das am besten geeignete Moderatorkonzept ausgewählt und optimal sicherheitstechnisch und konstruktionsgemäß geplant werden.

Die Möglichkeit, die verschiedenen Parameter wie Vormoderatordicken mittels Monte-Carlo-Simulationen zu testen und hinreichend genaue Ergebnisse zu präsentieren, spart einen enormen Zeit- und Kostenaufwand.

Ebenfalls wichtig ist die Betrachtung der ESS im Vergleich zu anderen Spallationsquellen. Dies macht deutlich, daß die Spektren zwar ähnlich sind, jedoch die hohe Leistung von 5MW ganz neue Perspektiven für die Neutronenstreuexperimente bietet.

11. Literaturangaben

- /all1998/ G.M. Allen, T.A. Broome et al.: The ISIS Cold Moderators, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Edts. J.M.Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm
- /anl2001/ Daten zu SNS-Moderatorleistungen Basismodell 2/21/01-hl211f_td_05 (gek. H₂) + hl21_r_tu_02(entk.+verg.H₂):
⇒<http://www.sns.anl.gov/components/moderators.shtml>
- /apt1999/ Laurie S. Waters (Edt.); MCNPX User's Manual Version 2.1.5, Los Alamos, TPO- E83-G-UG-X-00001, Revision 0, 14.11.1999
- /bau1992/ G.Bauer: Die Spallations-Neutronenquelle SINQ, Paul-Scherrer-Institut, Villingen 1992
- /bau1998/ G. Bauer: Pulsed Neutron Source Cold Moderators - Concepts, Design and Engineering, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources,
Edts. J.M. Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm
- /ber1963/ H.Bertini: Low Energy Intranuclear Cascade Calculation, Phys. Rev. 113, No. 4 1801, 1963
- /ber1969/ H.W. Bertini, Phys. Rev. 188, p.1711, 1969
- /ber1989/ W. Bernnat et al.: Flüssigkeitsmodelle für die Neutronenstreuung an Wasserstoff und Deuterium unter Berücksichtigung der innermolekularen und zwischenmolekularen Interferenz, IKE 6-175, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Stuttgart, 1989
- /bru1998/ ⇒http://www.isis.rl.ac.uk/accelerator/lectures/Archive/target/target_layout.html
- /cha1998/ L.A. Charlton, J.M. Barnes, J.O. Johnson und T.A. Gabriel: Progress Report: SNS Neutronic Studies, Proceedings of the ICANS XIV, 14. Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Starved Rock Lodge, Utica, Illinois 14.-19. 07.1998
- /clo1988/ P.Cloth et al.: HERMES, A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interaction Studies, Forschungszentrum Jülich Report Jül-2303, 1988
- /cra1998/ R.K.Crawford, T.O. Brun: Report of the Working Group on Novel Concepts and Materials, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Edts. J.M. Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm

- /cse1998/ L.Cser: Organic Compounds for Cold Moderators, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Edts. J.M. Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm
- /dol1982/ Th.J. Dolon: Fusion Research, Pergamon Press, New York 1982
- /dro1972/ D.G.Droon: Neutron Displacement Cross Sections for Stainless Steel and Tantalum Based on a Lindhard Modul, Nucl. Science Eng. 49, p130, 1972
- /eme1969/ D.Emendörfer, K.H. Höcker: Theorie der Kernreaktoren, Teil I+ II, BI-Hochschultaschenbücher 411/411a+412/412a, 1969
- /ess1996/ G.Bauer et al. (Edt.): ESS Volume III –The ESS Technical Study, ISBN 0902376659, ESS-96-53-M, 11/1996
- /ESS2002/ ESS Council (Edt.)The ESS Project: Vol. III, Technical Report, ISBN 3-89336-303-3, Mai 20002
- /Ess2002/ ESS Council (Edt.)The ESS Project: Vol. IV, Technical Report, ISBN 3-89336-304-1, Mai 20002
- /ess2002/ Homepage: ⇒http://www.fz-juelich.de/ess/ess/neutron_user3.htm
- /fil1992/ D.Filges: Moderne Monte Carlo Teilchentransport Simulationsverfahren für sicherheitstechnische Anwendungen und Fragestellungen in der Beschleunigertechnik und in der Raumfahrt, Berichte des Forschungszentrums Jülich Jül-2609, ISSN 0366-0885, 04/1992
- /fil2001/ D. Filges, F. Goldenbaum, M.Enke et al.: Spallation neutron production and the current intra-nuclear cascade and transport codes, Eur. Phys. J. A 11, 467-490 (2001)
- /fzj1999/ Forschungszentrum Jülich: Forschen in Jülich, Nr. 1/99, ISSN 1433-7371, 1999
- /gab1998/ T.A.Gabriel et al.: Overview of Target Systems for the Spallation Neutron Source, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Edts. J.M. Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm
- /gur1968/ I.I. Gurevich und L.V. Tarasov: Low-Energy Neutron Physics, North Holland Publishing Company, Amsterdam 1968
- /har2000/ M. Harada et al.: Optimization of decoupled Hydrogen Moderator, Proceedings of ICANS-XV, 15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, JAERI-Conf 2001-002, Vol. II, 6-9.11.2000

- /hey1998/ H. Heyck, private Mitteilung, 31.01.2002
- /how1975/ R. Howerton, D. Cullen, R. Haight et al.: The LLL Evaluated Nuclear Data Library (ENDL): Evaluation Techniques, Reaction Index and Descriptions of Individual Reactions, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-50400, Vol. 15, Part A, September 1975
- /hug1997/ H.G.Hughes et al.: MCNPX- The LAHET/MCNP Code Merger, X-Division Research Note XTM-RN(U)97-012, LA-UR-97-4891, Los Alamos National Laboratory, 1997
- /ica2000/ J. Suzuki und S. Itoh (Edts.): Proceedings of the Fifteenth Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources ICANS XV, JAERI-Conf 2001-002, 6-9. November 2000
- /ica2003/ D. Filges et al.: Layout Optimisation of the ESS TMR Unit – Neutron Performance of the New Moderator Concept, Proceedings of the ICANS-XVI Vol. II, The 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Düsseldorf-Neuss, 12.-15. Mai 2003
- /ifm1996/ IFMIF CPA Team: IFMIF Conceptual Design Activity, Final Report, ENEA report , RT/ERG/FUS/96/11
- /isi2000/ Council for the Central Laboratory of the Research Councils: A second Target Station at ISIS, ISBN 0-9023-7606-3, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, OX11 0QX,UK
⇒<http://www.isis.rl.ac.uk>
- /isi2001/ Council for the Central Laboratory of the Research Councils: ISIS Facility Annual Report 2001, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, OX11 0QX,UK
⇒<http://www.isis.rl.ac.uk>
- /ive2001/ E.Iverson, private Mitteilung
- /jes2000/ The JESSICA Collaboration: An Advanced Cold Moderator Test Facility with a Realistic ESS Target Moderator Reflector Mockup, 2000
- /jkj2002/ ⇒<http://jkj.tokai.jaeri.go.jp/>
- /kei1973/ J.Keinert: THERM123 - Eine Datenbibliothek für thermische Neutronenwirkungsquerschnitte, Teil 1: Moderation, Bericht Nr. 6-61/1, Institut für Kernenergetik Universität Stuttgart, 1973
- /kei2002/ J. Keinert et al., Internal Report IKE 6-198, Universität Stuttgart, Okt. 2002
- /kin1979/ R. Kinsey: Data formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF, Brookhaven National Laboratory Report, BNL-NCS-50496 (ENDF102) 2nd Edition (ENDF/B-V), Ocotober 1979

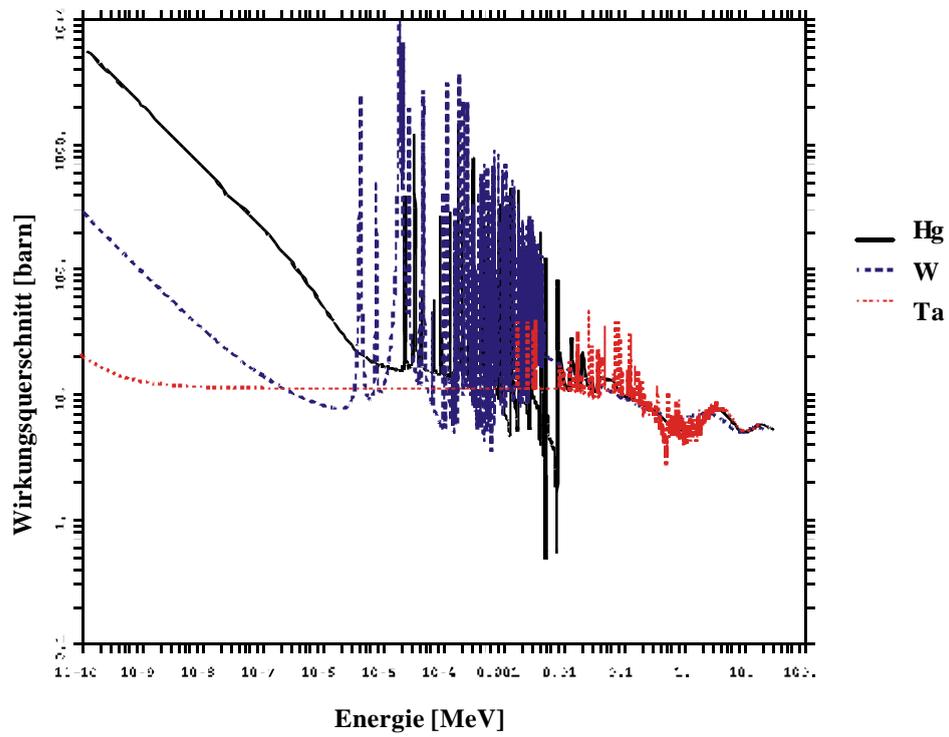
- /kiy1990/ Y. Kiyanagi und N. Watanabe: Some Neutronic Studies on Flux-Trap Type Moderators , Proceedings of the ICANS XI, 11th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, KEK Tsukuba, 22-26.10.1990
- /lah1980/ R.E.Prael u. H. Lichtenstein: User Guide to LCS: The LAHET Code System, LA-UR-89-3014, Los Alamos National Laboratory, 9/1989,
⇒[http:// www.xdiv.lanl.gov/XCI/PROJECTS/LCS/lahet-doc.html](http://www.xdiv.lanl.gov/XCI/PROJECTS/LCS/lahet-doc.html)
- /lin1972/ J. Linhard et al.: Kgl. Danske Videnskab Selskab, Mat.-Fys. Medd. 33, No. 14, 1963
- /may1996/ C.Mayr et al.: Development of Cross Sections for Materials Damage and Helium Production for ESS, ESS-Report ESS 96-45-T, 07/1996
- /mcf1990/ R. Mc Farlane: Cold Moderator Scattering Kernel, Proceedings of the International Workshop on Cold Neutron Sources Los Alamos, LA-12146-C, 5.-8.3.1990
- /mcf1994/ R. McFarlane: New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2, LA-12639-MS (ENDF356) LANL 03/1994
- /mcn2000/ J.F.Briesmeister (Edt.): MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 3/2000
- /moe2000/ A. Moeslang et al.: Suitability and Feasibility of the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) for Fusion Materials Studies, Nuclear Fusion Vol. 40, No. 3y, , pp 619, March 2000
- /mot2001/ Motoki Ooi, private Mitteilung
- /nel1960/ M. Nelkin:Scattering of Slow Neutrons by Water, Physical Review, Vol 119 Nr.2, pp 741-746, 1960
- /nod1998/ K.Noda et al.: User's Requirements for IFMIF, Journal of Nuclear Materials, Vol. 258-263, pp. 97-105, 1998
- /nün2001/ K. Nünighoff: Experimente und Theorien zur Neutronenproduktion in Schwermetalltargets, Anwendbarkeit von Monte-Carlo-Simulationsverfahren zur sicherheitstechnischen Auslegung der Europäischen Spallationsquelle ESS, Jül-3916, Berichte des Forschungszentrums Jülich, ISSN 0944-2952, 10/2001
- /nün2003/ K. Nünighoff et al.: Experimental Investigations of Advanced Cold Moderators at JESSICA at COSY-Jülich and Comparison with MCNPX Simulations, AccApp 2003, San Diego, USA, Juni 1-5, 2003
- /ogw1999/ Y. Ogawa, Y. Kiyanagi et al.: Intensity Enhancement of cold Neutrons from a coupled liquid-Hydrogen Moderator for pulsed cold Neutron Sources, Nuclear Instruments and Methods, in Physics Research A 432, pp 415-421, 1999

- /poh2003/ C.Pohl: Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der thermischen Neutronenflüsse an einem Target-Moderator-Reflektorsystem einer Spallationsneutronenquelle, Berichte des Forschungszentrums Jülich, Nr. 4071, ISSN 0944-2952, 2003
- /rob1972/ M.T. Robinson, Radiation Induced Voids in Metals, Eds. J.W. Corbett, L.C. Ianello, CONF-710601, pp397, 1972
- /rus1990/ G.J.Russell et al.: Spallation Physics – An Overview, Proceedings of the ICANS XI, 11th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, KEK Tsukuba, 22-26.10.1990
- /rus1998/ G.J.Russell et al.: Sensitivity Studies of the Ortho/para Hydrogen Concentration on the Neutronic Performance of the Lujan Center Liquid Hydrogen Moderator Using State of the Art Computational Tools, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Edts.J.M. Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm
- /rus2001/ G.J.Russell et al.: Overview of Spallation Neutron Physics, World Scientific 11/01/2201
- /sac2001/ D. Filges et al.: Particle Transport Simulations of the Neutronic Performance of Moderators of the ESS Mercury Target-Moderator-Reflector System, ESS-SAC-MOD-No.3, 27.04.2001
- /sat1941/ R.G. Sachs und E. Teller: The Scattering of Slow Neutrons by Molecular Gases, Physical Review, Vol. 60, pp18-27,1941
- /seg2001/ D.Filges et al.: Neutronic Performance of SPTS, Vortrag auf dem 7. ESS General Meeting, Seggau (A), 26.-29.09.2001
- /sei1970/ W.D. Seiffert: Messung der Streuquerschnitte von flüssigem und festem Wasserstoff, Deuterium und Deuteriumhydrid für thermische Neutronen, EUR-5566d, 1970
- /sha1998/ E.Shabalin: Consideration of the „Burp“ Phenomenon in Solid Methan Accounting for nonuniform Distribution of Irradiation Defects, Proceedings of the International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Edts.J.M. Carpenter and E.B Iverson, Argonne, Illinois, 28.9-2.10.1997
⇒http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/proceed.htm
- /sin2001/ ⇒<http://sinq.web.psi.ch>
- /sns2002/ Spallation Neutron Source Parameters List, Rev. 7, Mai 2002
⇒ <http://www.sns.gov/documentation/pubs.htm>
- /squ1997/ G.L.Squires: Introduction to the Theory of Thermal Neutron Scattering, ISBN 0- 486-69447-X, Dover Publications, ,New York, 1997

- /tie 2001/ A.Tietze: Grundlegende Untersuchung sicherheitsrelevanter Materialbelastungen zum Targetsystem der Europäischen Spallations-Neutronenquelle (ESS) – Vergleich Experiment und Theorie, Berichte des Forschungszentrums Jülich Jül-3857, ISSN 0944-2952, 03/2001
- /ünl1995/ K. Ünlü, C. Rios-Martinez und B.W. Wehring, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 193, No. 1, pp 145-154 ,1995
- /uts1977/ M.Utsuro und M. Sugimoto: Journal of Nuclear Science and Technoloy 14, pp 72-74, 1977
- /van1954/ L. Van Hove: Correlations in Space and Time and Born Approximation – Scattering in Systems of Interacting particles, Physical Review, Vol. 95, Nr. 1, pp 249-262, 1954
- /whi1961/ W.L.Whittemore and A.W.McReynolds: Different Neutron Thermalization, General Atomic Report GA-2505, 1961
- /you1964/ J.Young und J. Koppel: Slow Neutron Scattering by Molecular Hydrogen and Deuterium, Physical Review, Vol 135, Nr. 3A, pA603-A611, 1964

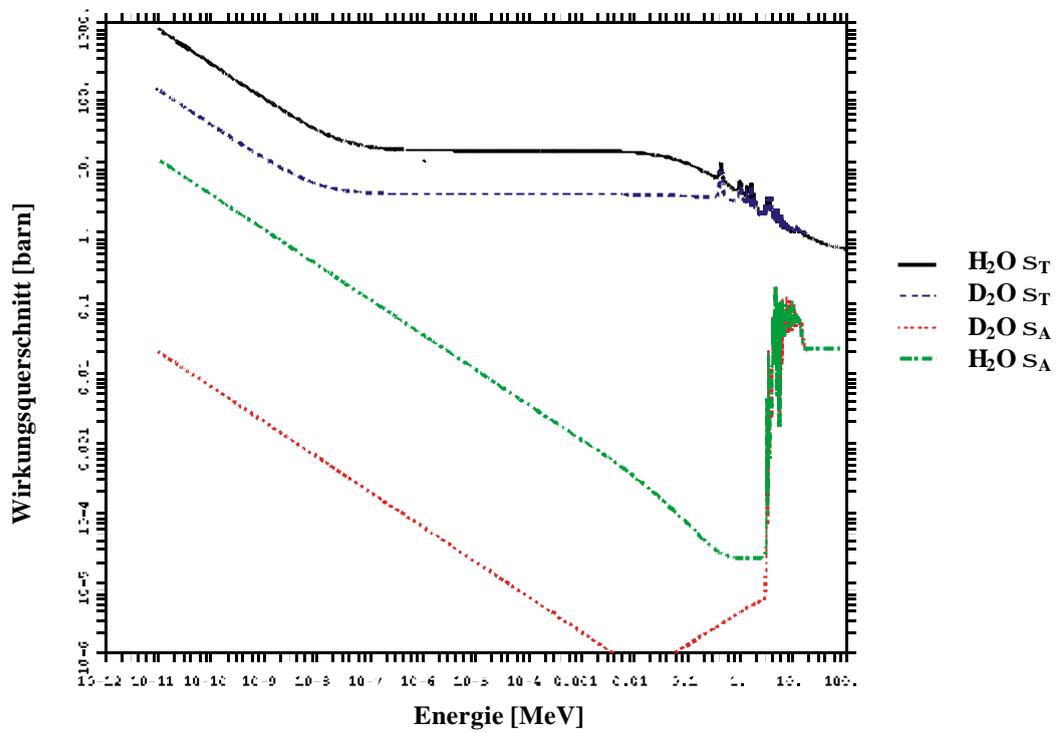
Anhang

- A** Targetmaterialien Quecksilber (Hg), Wolfram (W), Tantal (Ta):
Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (T=300K)
- B1** Moderatormaterialien Wasser (H₂O) und schweres Wasser (D₂O):
Totale σ_T und Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (T= 300 K)
- B2** Moderatormaterialien Wasser (H₂O) und schweres Wasser (D₂O):
Inelastische S($\alpha\beta$) Streuwirkungsquerschnitte (T= 300 K)
- C1** Moderatormaterialien Wasserstoff (H₂) und Deuterium (D₂):
Totale σ_T und Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (T= 300 K)
- C2** Moderatormaterialien Wasserstoff (H₂) und Deuterium (D₂):
Inelastische S($\alpha\beta$) Streuwirkungsquerschnitte für ortho- und para- Zustand (T=300K)
- D** Moderatormaterial Methan (CH₄):
Inelastische S($\alpha\beta$) Streuwirkungsquerschnitte (T=100K, 22K, 26K, 30K)
- E** Entkopplungsmaterialien Borkarbid (B₄C), Gadolinium (Gd), Kadmium (Cd):
Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A im Vergleich zu Wasserstoff
- F1** Vormoderatormaterialien Wasser (H₂O), Polyethylen (C₂H₄) und Zirkoniumhydrid (ZrH):
Inelastische S($\alpha\beta$) Streuwirkungsquerschnitte (T=300 K)
- F2** Vormoderatormaterialien Polyethylen (C₂H₄) und Zirkoniumhydrid (ZrH)
Elastische S($\alpha\beta$) Streuwirkungsquerschnitte (T=300K)
- G1** Reflektormaterialien Blei (Pb), Beryllium (Be), Graphit (C) und schweres Wasser (D₂O):
Totale Wirkungsquerschnitte σ_T (T=300K)
- G2** Reflektormaterialien Blei (Pb), Beryllium (Be), Graphit (C) und schweres Wasser (D₂O):
Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (T=300K)

A: Targetmaterialien Quecksilber (Hg), Wolfram (W) und Tantal (Ta):Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (T=300K)

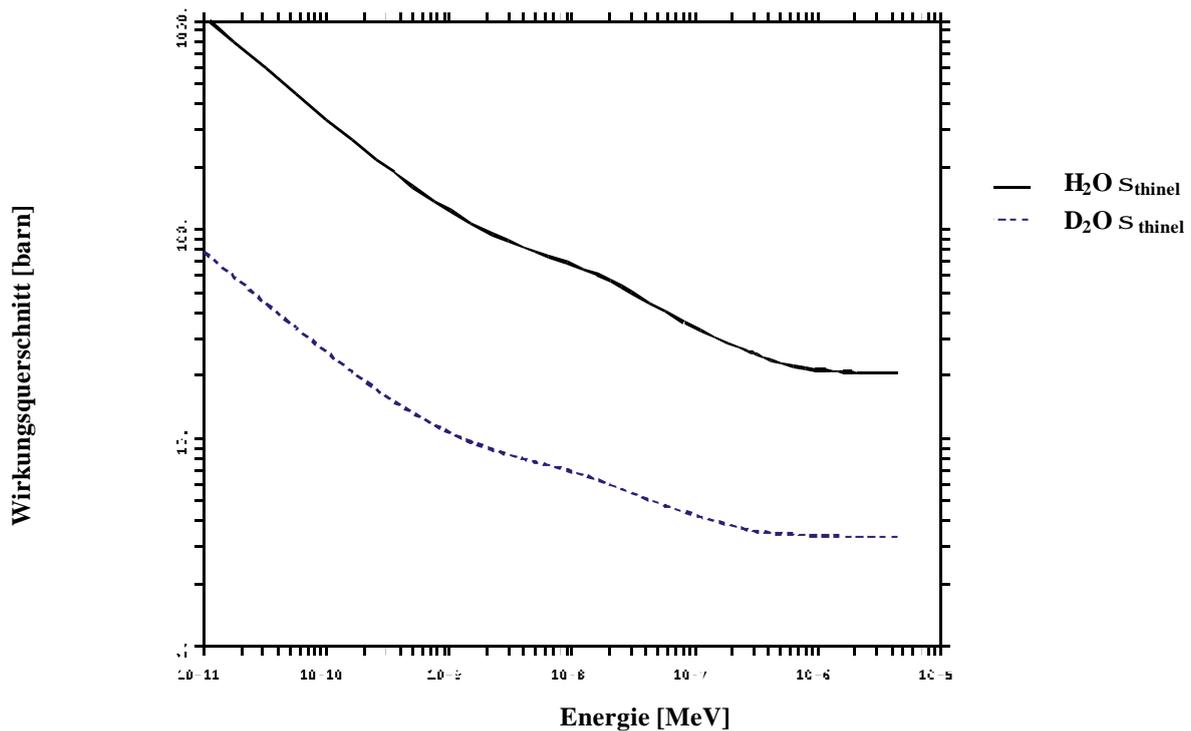
B1: Moderatormaterialien Wasser (H_2O) und schweres Wasser (D_2O):

Totale σ_T und Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (beide für $T=300K$)



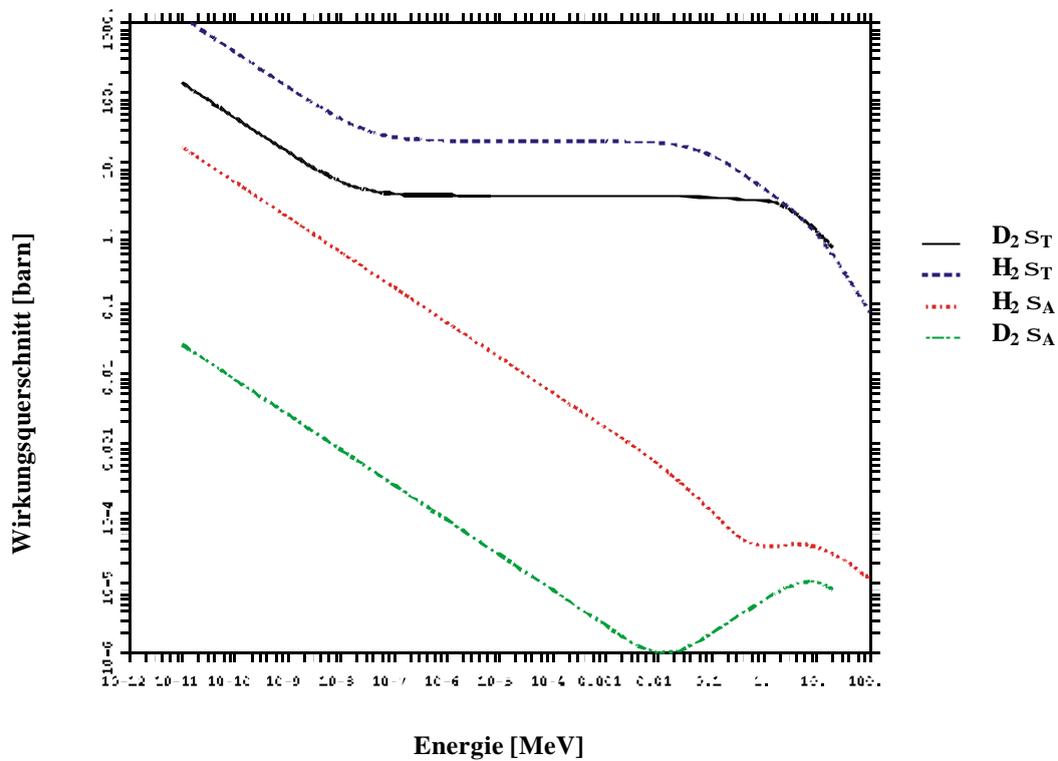
B2: Moderatormaterialien Wasser (H_2O) und schweres Wasser (D_2O):

Inelastische $S(a,\beta)$ Streuwirkungsquerschnitte ($T=300K$)



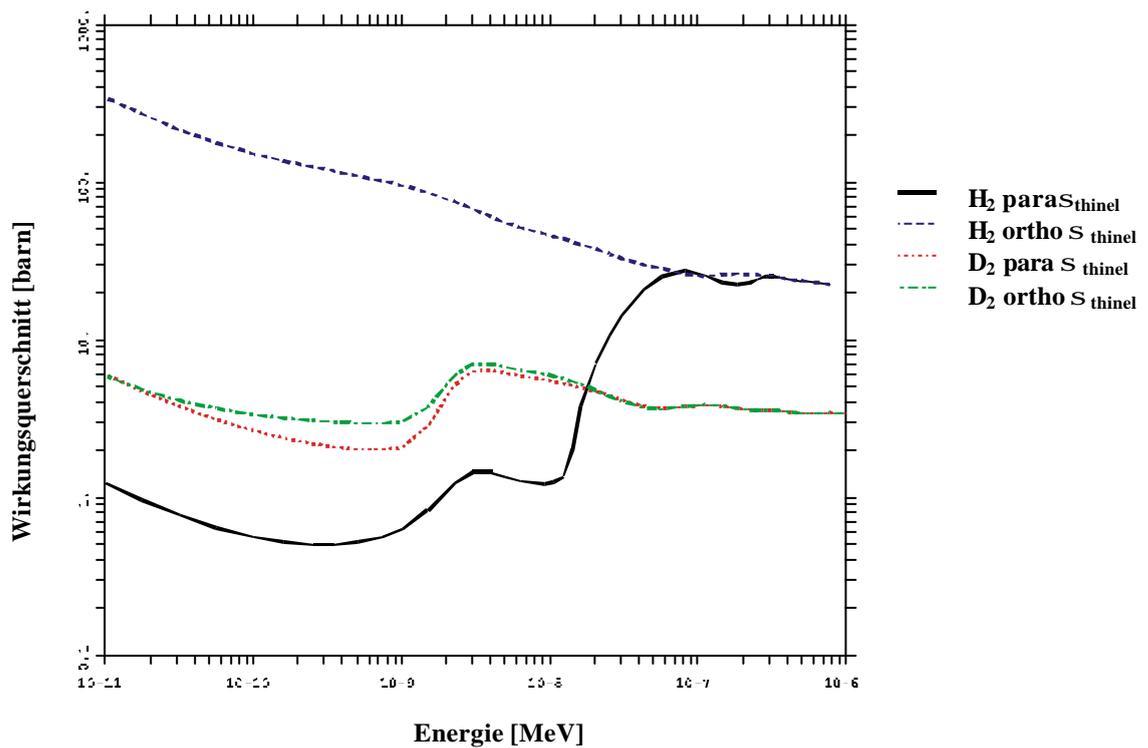
C1: Moderatormaterialien Wasserstoff (H_2) und Deuterium (D_2):

Totale σ_T und Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (beide für $T=20$ K)



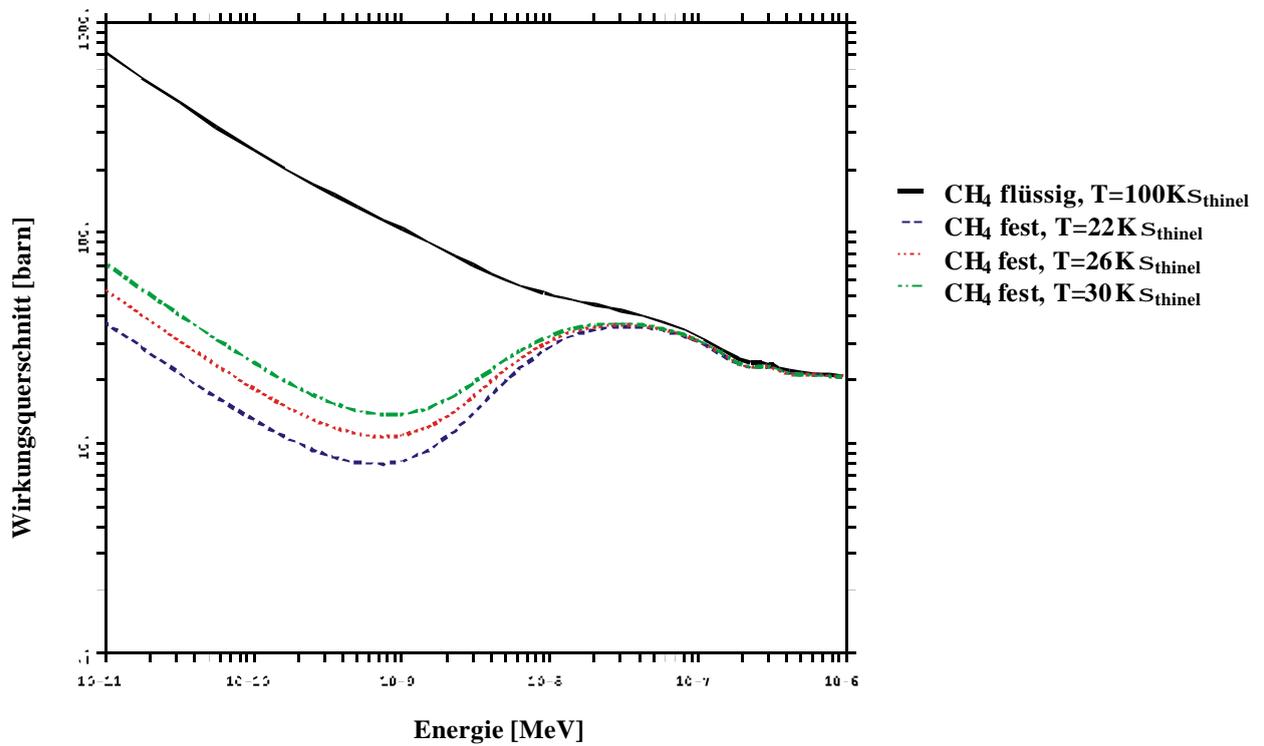
C2: Moderatormaterialien Wasserstoff (H_2) und Deuterium (D_2):

Inelastische $S(a,\beta)$ Streuwirkungsquerschnitte ($T=20$ K) für ortho und para-Zustand



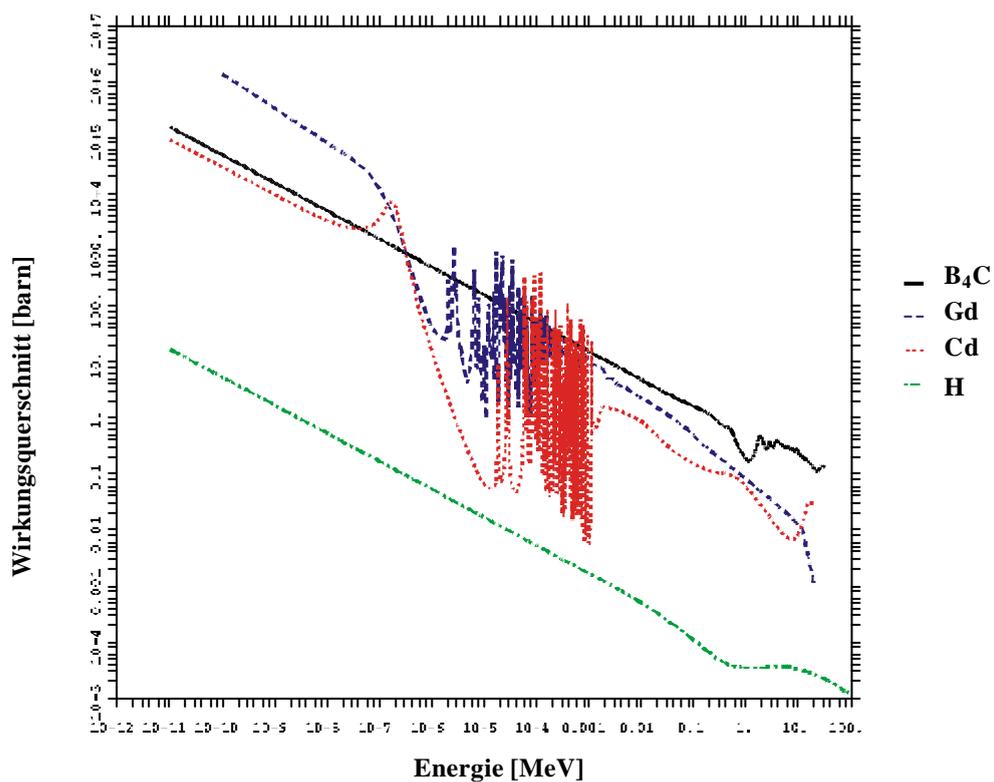
D: Moderatormaterial Methan (CH₄):

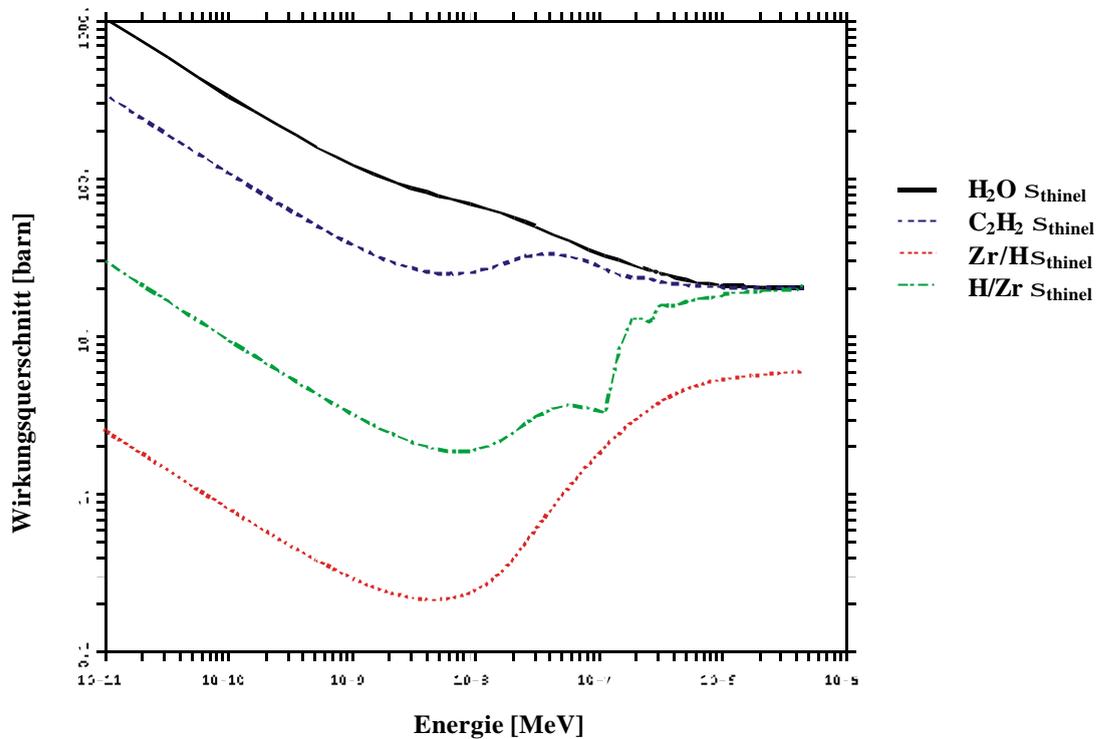
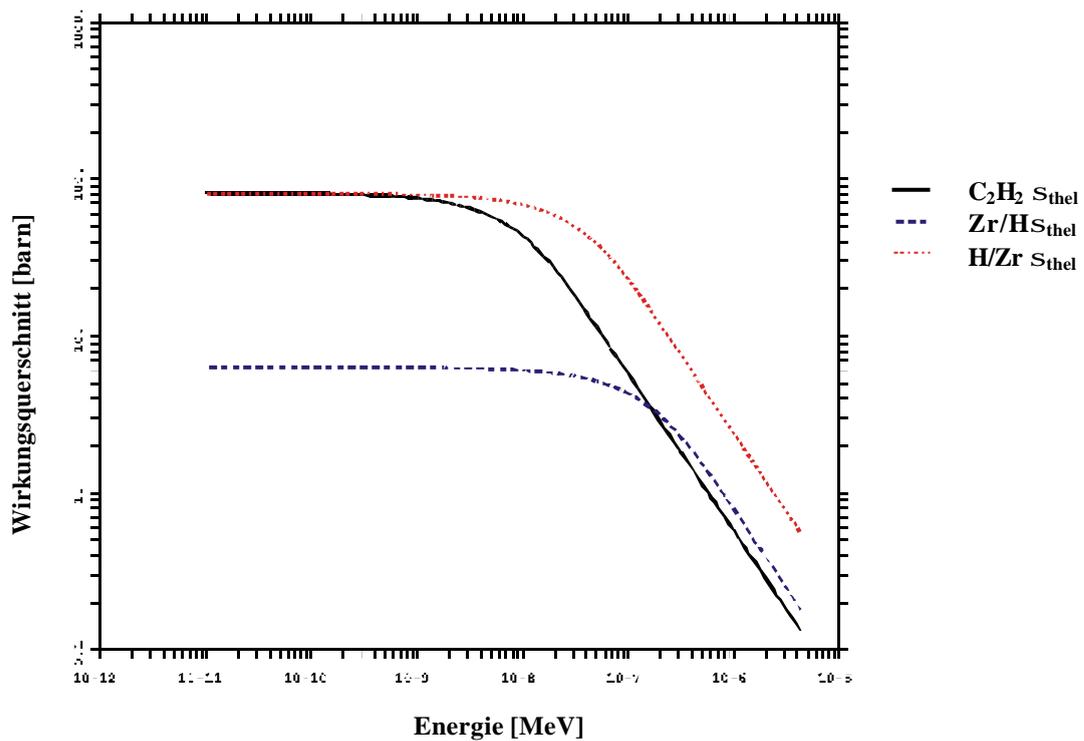
Inelastische $S(\alpha,\beta)$ Streurwirkungswirkungsquerschnitte ($T=100\text{K}, 22\text{K}, 26\text{K}, 30\text{K}$)



E: Entkopplungsmaterialien Borkarbid (B₄C), Gadolinium (Gd) und Kadmium (Cd):

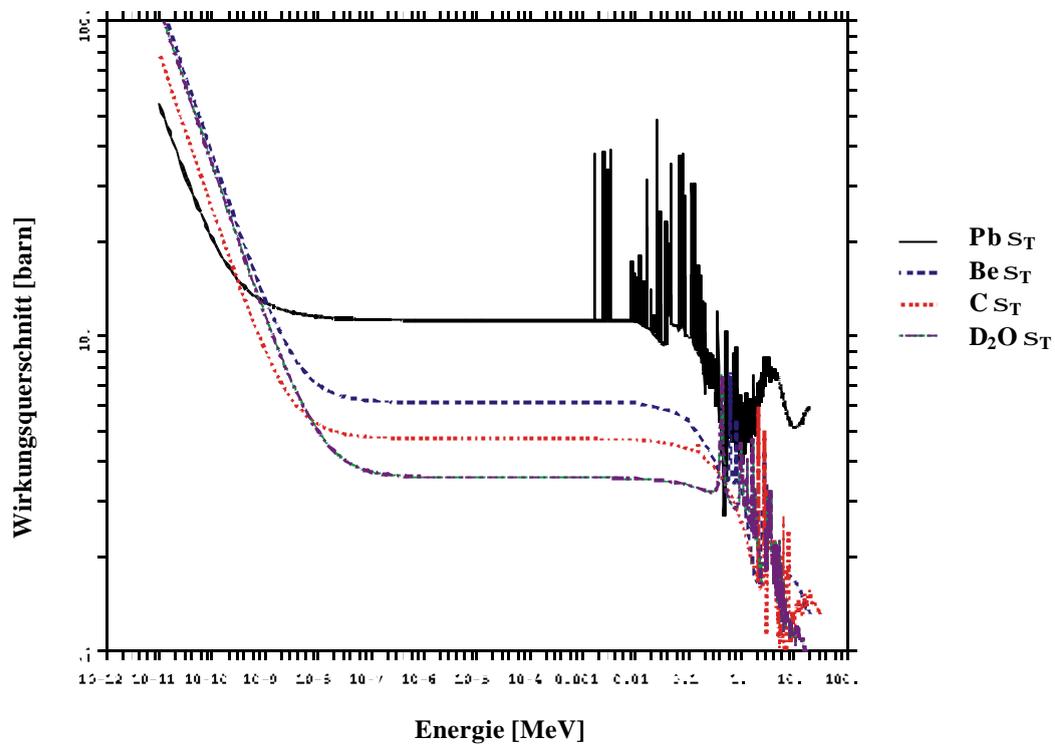
Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A im Vergleich mit Wasserstoff ($T=300\text{K}$)



F1: Vormoderatormaterialien Wasser (H₂O), Polyethylen (C₂H₄) und Zirkoniumhydrid (ZrH):Inelastische S(a, β)Streuwirkungsquerschnitte (T=300K)**F2: Vormoderatormaterialien Polyethylen (C₂H₄) und Zirkoniumhydrid (ZrH):**Elastische S(a, β)Streuwirkungsquerschnitte (T=300K)

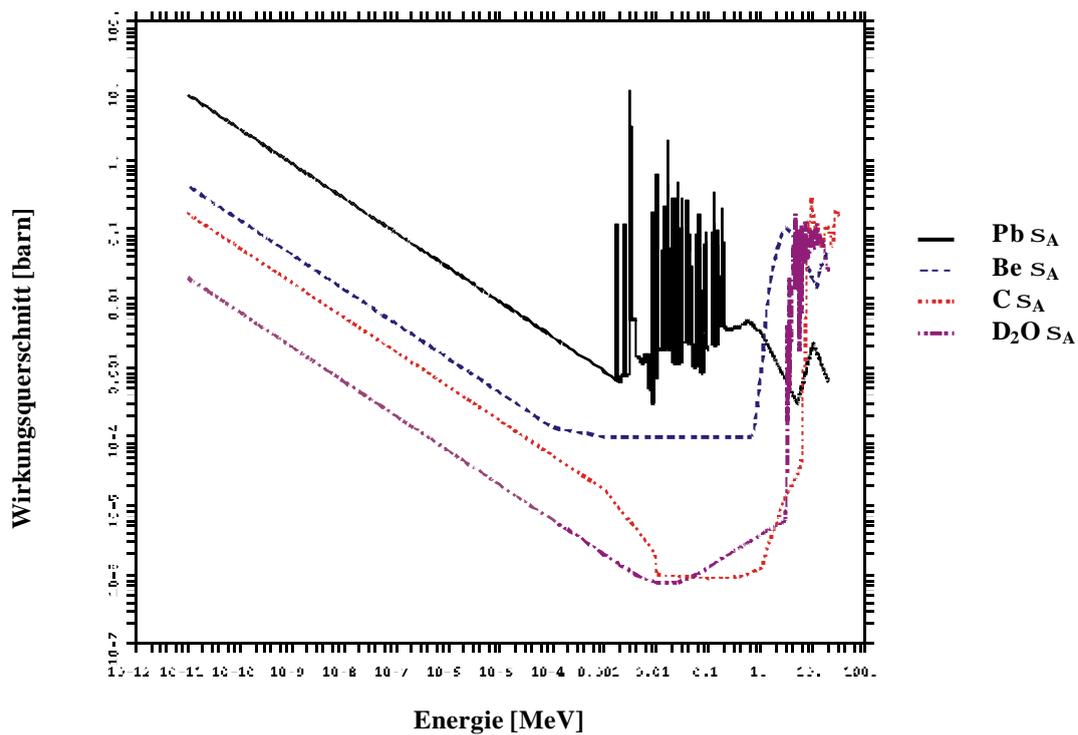
G1: Reflektormaterialien Blei (Pb), Beryllium (Be), Graphit (C) und schweres Wasser (D₂O):

Totale Wirkungsquerschnitte σ_T (T=300K)



G2: Reflektormaterialien Blei (Pb), Beryllium (Be), Graphit (C) und schweres Wasser (D₂O):

Absorptionswirkungsquerschnitte σ_A (T=300K)



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Schematische Darstellung einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung und zugehörige Parameter, die den Neutronenutzfluß beeinflussen.....	2
Abb. 1.2: Zu optimierende Pulsformen für kurz- bzw. langgepulste Spallationstargetstationen mit Spitzenintensität, Pulsbreite FWHM und Puls-Zerfallskonstanten τ_K und τ_L	3
Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Spallationsprozesse, hier am Beispiel von Blei (Pb), mit den Phasen intra- bzw. internukleare Kaskade und Verdampfung /fzj1999/.....	5
Abb. 2.2: Vergleich von Neutronenproduktionspektren aus Spaltung (Fission) von Uran-235 und aus Spallation in einem Wolframtarget (LANSCE target) /rus1990/.....	6
Abb. 2.3: Allgemeines Schema zur Berechnung von Neutronenfeldern mittels Monte-Carlo-Teilchentransport-Rechenverfahren: Eingabe-, Transport- und Analyseteil.....	7
Abb. 2.4: Verwendete Wirkungsquerschnitte im MCNPX.....	8
Abb. 3.1: Schematische Darstellung einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung in Seitenansicht.....	12
Abb. 3.2: Isolinien der thermischen ($E_n \leq 413\text{meV}$) Neutronenflußdichten bei einer mittleren Protonenstrahlleistung von 5MW in einem Quecksilbertargetsystem – in Fluxtrapanordnung (siehe nächste Seite) mit Reflektor und Moderatoren im horizontalen Schnitt.....	14
Abb. 3.3: Prinzip verschiedener Moderator-Target-Anordnungen am Beispiel zylindrischer Spallationstargets nach /rus2001/.....	15
Abb. 3.4: Maxwellveteilungen von Neutronenflüssen ϕ (v) für verschiedene Moderator-Temperaturen /squ1997/.....	17
Abb. 3.5: Lethargiedarstellung von Neutronenflußdichten für einen kalten Wasserstoff-Moderator (H_2 bei $T=20\text{K}$) mit und ohne Vormoderator.....	20
Abb. 3.6: Einfluß verschiedener Entkopplungsmaterialien auf die Pulsbreite eines entkoppelten („decoupled“) Wasserstoffmoderators bei einer Neutronenenergie von $E_n \leq 45\text{meV}$ /mot2001/.....	22
Abb. 3.7: Einfluß der Position des Vergiftungsbleches auf die Neutronenpulsbreite der Neutronenstromdichte J [n/sr·s] eines entkoppelten, vergifteten Wassermoderator für ein Wellenlängenintervall von $0.6\text{-}1\text{\AA}$, W = Moderatordicke, Position = Abstand Vergiftungsblech zur betrachteten Moderatorfläche als Bruchteil der Moderatordicke /gab1998/.....	23
Abb. 3.8: Gemessene Neutronenzählraten vom ISIS-Moderator mit flüssigem Methan (100K) Vor (unirradiated) und während Bestrahlung /bru1998/.....	29
Abb. 3.9: Einfluß der Vormoderatordicke (thickness) auf die integrierte Intensität (integrated intensity, große Punkte), Spitzenintensität (Peak intensity, kleine Punkte), Energie-deposition (Energy deposition, Quadrate) und Pulsbreite (FWHM, Dreiecke) eines H_2 -Moderators /har2000/.....	29
Abb. 4.1: Schema der ESS-Anlage /ess2002/.....	31
Abb. 4.2: Prinzip einer Target-Moderator-Reflektor-Anordnung für die ESS /ess1996/.....	34
Abb. 4.3: Neutronenausflüsse für verschiedene Targetmaterialien in der ESS-Geometrie als Funktion der Targetlänge /ess1996/.....	36
Abb. 5.1: Vertikaler Schnitt durch das Geometriemodell für die Target-Reflektor-Moderator-Anordnung der Kurzpulstargetstation SPTS.....	37
Abb. 5.2: Horizontaler Schnitt durch die Ebene des Wasserstoffmoderators im Geometriemodell für die Target-Reflektor-Moderator-Anordnung der SPTS /ESS2002/.....	38

Abb. 5.3: Detailansicht des Wasserstoffmoderators mit Vormoderator, optionaler Entkopplungsschicht (Cd), optionaler Vergiftungsschicht (Gd) und der Verlängerung des Vormoderators in das Strahlrohr für die Target-Reflektor-Moderator-Anordnung der Kurzpulstargetstation SPTS /ESS2002/.....	39
Abb. 5.4: Neutronenstromdichten der Wassermoderatorkonzepte als Funktion der Zeit für verschiedene Wellenlängen bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	40
Abb. 5.4: Neutronenstromdichten der Wassermoderatorkonzepte als Funktion der Zeit für verschiedene Wellenlängen bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	43
Abb. 5.5: Spitzenneutronenstromdichten, Pulsbreiten in FWHM und mittlere Neutronenstromdichten für die Wassermoderatorkonzepte in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	44
Abb. 5.6: Neutronenstromdichten der vormodierten Wasserstoff-Moderatorkonzepte als Funktion der Zeit für verschiedene Wellenlängen bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	46
Abb. 5.7: Spitzenneutronenstromdichten, Pulsbreiten in FWHM und mittlere Neutronenstromdichten als Funktion der Wellenlänge für die premodierten Wasserstoff-Moderatorkonzepte bei einer Protonenstrahlleistung von 5MW und in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	47
Abb. 5.8: Horizontaler Schnitt durch die mittleren Moderatorebenen in „Fluxtrap“-Geometrie(Ausschnitt); Skalierung in cm.....	51
Abb. 5.9: Horizontaler Schnitt durch die Wasserstoffmoderatorebene in einer einfachen Wing-Geometrie mit Plattentarget (Ausschnitt); Skalierung in cm.....	52
Abb. 5.10: Vertikaler Schnitt durch Targetmitte in der vereinfachten Wing-Geometrie (Ausschnitt); Skalierung in cm.....	53
Abb. 5.11: Horizontaler Schnitt durch die mittlere Ebene des Wasserstoffmoderators in der erweiterten Wing-Geometrie mit großem Öffnungswinkel (45°) der Strahlrohre.....	54
Abb. 5.12: Detaillierte Ansicht des ESS-LPTS-Wasserstoff- moderators.....	55
Abb. 5.13: Vergleich der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichten im Wasserstoffmoderator für Fluxtrap- und vereinfachter Wing-Geometrie für $D= 0\text{cm}$ zwischen Moderator und Target.....	58
Abb. 5.14: Vergleich der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenflußdichten im Wasserstoffmoderator für Fluxtrap- und vereinfachter Wing-Geometrie für $D= 7\text{cm}$ zwischen Moderator und Target.....	59
Abb. 5.15: Mittlere Neutronenstromdichten des Wasserstoffmoderators in vereinfachter Wing- und Fluxtrap-Geometrie als Funktion der Wellenlänge.....	60
Abb. 5.16: Vergleich der thermischen ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten eines vormodierten Wasserstoffmoderators (H_2 bei $T=20\text{K}$) in der einfachen und in der erweiterten Wing-Anordnung für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einer Pulslänge von 2,5 ms, die Neutronenstromdichte gilt für einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	61
Abb. 5.17: Einfluß der Distanz D zwischen Moderator und Target auf thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten des vormodierten Wasserstoffmoderators (H_2 bei $T=20\text{K}$) in der erweiterten Wing-Anordnung für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und für die Neutronenstromdichte in einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	63

Abb. 5.18: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte für verschiedene Moderatoricken beim ESS-LPTS-Wasserstoffmoderator für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	64
Abb. 5.19: Mittlere Neutronenstromdichten für verschiedene Moderatoricken in Abhängigkeit der Wellenlänge für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	64
Abb. 5.20: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichten für den ESS-LPTS-Wasserstoff-Moderator mit Dicke $d=10\text{cm}$ bei verschiedenen Vormoderatorgrößen (Vormoderatordicke 2.5cm) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	65
Abb. 5.21: Mittlere Neutronenstromdichten für den ESS-LPTS-Wasserstoff-Moderator mit Dicke $d=10\text{cm}$ bei verschiedenen Vormoderatorgrößen (Vormoderatordicke 2.5cm) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	66
Abb. 5.22: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte des Wasserstoffmoderators ($d=5\text{cm}$, Ext. $=7.5\text{cm}$) für verschiedene Reflektormaterialien für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	68
Abb. 5.23: Thermische ($E_n = 0.413\text{eV}$) Neutronenstromdichte des Wasserstoffmoderators ($d=5\text{cm}$, Ext. $=7.5\text{cm}$) für verschiedene Reflektormaterialien für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	69
Abb. 6.1: Einfluß des ortho(o)-zu-para(p)-Verhältnisses [%] auf die Neutronenintensität in Abhängigkeit von der Moderatordicke D /ogw1999/.....	72
Abb. 6.2: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren ($T=20\text{K}$, Moderatordicke $D=5\text{cm}$) in der SPTS-Geometrie - Abb. 5.3, S. 39 - mit verschiedenen ortho/para-Verhältnissen.....	73
Abb. 6.3: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren ($T=20\text{K}$, Moderatordicke $D=5\text{cm}$) in der SPTS-Geometrie - Abb. 5.3, S. 39 - mit verschiedenen ortho/para-Verhältnissen.....	74
Abb. 6.4: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren ($T=20\text{K}$, Moderatordicke $D=5\text{cm}$) in der LPTS-Geometrie – Abb. 5.12, S. 54 - mit verschiedenen ortho/para-Verhältnissen.....	75
Abb. 6.5: Mittlere Neutronenstromdichten von Wasserstoffmoderatoren ($T=20\text{K}$, Moderatordicke $D=5\text{cm}$) in der LPTS-Geometrie – Abb. 5.12, S. 54 - mit verschiedenen ortho/para-Verhältnissen.....	76
Abb. 6.6: Neutronenintensitäten für den Festmethanmoderator in SPTS-Geometrie – Abb. 5.3, S. 39 - im Vergleich zum Para-Wasserstoffmoderator für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	77
Abb. 6.7: Neutronenintensitäten für den Festmethanmoderator in LPTS-Geometrie – Abb. 5.12, S. 54 - im Vergleich zum Para-Wasserstoffmoderator für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von $\pm 2^\circ$	78
Abb. 7.1: Schematische Darstellung der Neutronenstrahlextraktion vom multispektralen Moderator.....	79
Abb. 7.2a : Anordnung weiterentwickelter Moderatkonzepte in der ESS - Kurzpulstargetstation SPTS: vertikaler Schnitt/Ess2002/.....	81
Abb. 7.2b : Anordnung weiterentwickelter Moderatkonzepte in der ESS - Kurzpulstargetstation SPTS: horizontaler Schnitt /Ess2002/.....	81
Abb. 7.3: Geometriekonzept des „back-to-back“-Moderators für die SPTS /ica2003/.....	82
Abb. 7.4: Geometriekonzept des „side-by-side“-Moderators für die SPTS /ica2003/.....	82

Abb. 7.5a: Anordnung weiterentwickelter Moderatkonzepte in der ESS - Langpuls-Targetstation LPTS: vertikaler Schnitt /Ess2002/.....	85
Abb. 7.5b: Anordnung weiterentwickelter Moderatkonzepte in der ESS - Langpuls-Targetstation SPTS: horizontaler Schnitt /Ess2002/.....	85
Abb. 7.6: Geometrie zur Optimierung des Wasserstoffmoderators in der LPTS /ica2002/....	86
Abb. 7.7: Thermische ($E = 0.383$ eV) Neutronenstromdichten für verschieden große H_2 -Moderatoren, auf Fläche (pro cm^2) normiert.....	87
Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines sogenannten „grooved“ Moderators.....	89
Abb. 8.2: Vergleich der Wellenlängenabhängigkeit der mittleren Neutronenstromdichten verschiedener ISIS Moderatorkonzepte mit entsprechenden ESS-Ergebnissen; alle normiert auf 1MW Protonenstrahlleistung.....	90
Abb. 8.3: Vergleich der mittleren Neutronenstromdichten von SNS- und ESS-Moderatoren für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 1MW.....	92
Abb. 8.4: Vergleich der mittleren Neutronenintensitäten für einen gekoppelten para- H_2 -Moderator in J-PARC-Geometrie und ESS –Geometrie, beide sind auf eine mittlere Stromstärke von 1mA und einem Raumwinkel von $\pm 2^\circ$ normiert..	94
Abb. 8.5: Vergleich der Moderatorleistungen von SINQ und ESS anhand der mittleren Neutronenstromdichten in 1.5 m Entfernung vom jeweiligen Moderator /sinq 2001/ für einen mittleren Protonenstrom von 1mA.....	96
Abb. 9.1: Vertikaler Schnitt durch die Target-Moderator-Reflektor-Anordnung der ESS (Langpulsgeometriesystem LPTS) mit zwei möglichen Bestrahlungspositionen dargestellt durch zwei Eisenzyylinder mit einem Volumen von 500 cm^3	99
Abb. 9.2: Vergleich der für die jeweiligen Bestrahlungspositionen in der ESS berechneten Neutronenflußspektren mit typischen Spektren aus Spalt- und Fusionsreaktor.....	100
Abb. 9.3: Vergleich der differentiellen Neutronenspektren in ESS-Target-Bestrahlungspositionen. Außerdem ist der typische energieabhängige Verlauf des totalen Transmutations-Wirkungsquerschnitts für Eisen (FE) dargestellt.....	101
Abb. 9.4: Isolinien der totalen Neutronenflußdichteverteilung (horizontaler Schnitt – Targetmitte); (Kreis=Eisenzyylinder mit Bestrahlungsvolumen,) die rechte Skala zeigt die Höhe der Flußintensität [n/cm^2s] an für eine Protonenstrahlleistung von 5MW	102
Abb. 9.5: Isolinien der totalen Neutronenflußdichten (horizontaler Schnitt durch Moderatorebene); (Kreis=Eisenzyylinder mit Bestrahlungsvolumen) die rechte Skala zeigt die Höhe der Flußintensität [n/cm^2s] an für eine Protonenstrahlleistung von 5MW	102
Abb. 9.6: Isolinien der totalen Protonenflußdichten (horizontaler Schnitt durch Targetmitte) ; (Rechteck=Target, Kreis=Eisenzyylinder mit Bestrahlungsvolumen,) die rechte Skala zeigt die Höhe der Flußintensität [n/cm^2s] an für eine Protonenstrahlleistung von 5MW	103
Abb. 9.7: Wasserstoff- und Heliumneutronenproduktionswirkungsquerschnitte für Eisen.....	104
Abb. 9.8: Displacement-Neutronenwirkungsquerschnitt für Eisen.....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Physikalische Eigenschaften diverser Targetmaterialien /nün2001/+/isi2001/..13	13
Tabelle 3.2a:	Moderationseigenschaften verschiedener Materialien - Elemente /bau1998/....24	24
Tabelle 3.2b:	Moderationseigenschaften verschiedener Moderatormaterialien - Verbindungen /bau1998/.....	24
Tabelle 3.3:	Moderationseigenschaften von Wasser (H ₂ O) und schwerem Wasser (D ₂ O) bei einer Temperatur von T=300 K.....	25
Tabelle 3.4:	Moderationseigenschaften von Wasserstoff (H ₂) und Deuterium (D ₂) bei einer Temperatur von T=20 K.....	26
Tabelle 3.5:	Moderationseigenschaften von Methan (CH ₄) bei einer Temperatur von 100 K (flüssig) und bei einer Temperatur von 20K (fest).....	28
Tabelle 4.1:	Geplante Auslegungsparameter der ESS-Anlage für die Kurzpulstargetstation (SPTS) und für die Langpulstargetstation (LPTS).....	34
Tabelle 5.1:	Protonenstrahlparameter SPTS /ESS2002/.....	40
Tabelle 5.2:	Zusammenfassung der numerischen Simulationsergebnisse für die Wasser- Moderatorkonzepte (T=300K), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel +/-2°.....	48
Tabelle 5.3:	Numerische Werte der maximalen Neutronenstromdichten J _{max} bei verschiedenen Wellenlängen für die vormodierten Wasserstoff- Moderatorkonzepte (T=20K), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel +/-2°.....	49
Tabelle 5.4:	Numerische Werte der mittleren Neutronenstromdichten J _{mit} bei verschiedenen Wellenlängen für die vormodierten Wasserstoff-Moderatorkonzepte (T=20K), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel +/-2°.....	49
Tabelle 5.5:	Thermische (E _n =413meV) Neutronenflußdichten und Neutronenstromdichten der gekoppelten ESS-SPTS-Moderatoren), Protonenstrahlleistung 5MW, Raumwinkel für die Neutronenstromdichte: +/-2°.....	49
Tabelle 5.6:	Protonenstrahlparameter LPTS /ESS2002/.....	56
Tabelle 5.7:	Numerische Werte der Simulationsergebnisse bei verschiedenen Wellenlängen für den ESS-LPTS-Wassermoderator (T=300K) und zwei verschiedenen vormodierten ESS-LPTS-Wasserstoffmoderatoren (T=20K) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und einen Raumwinkel von +/-2°.....	67
Tabelle 5.8:	Thermische Neutronenfluß- und Neutronenstromdichten für die ESS- LPTS-Moderatoren (Moderatordicken d= 5cm, Ext.=2,5cn) für eine mittlere Protonenstrahlleistung von 5MW und für die Neutronenstromdichte in einem Raumwinkel von +/-2°.....	67
Tabelle 5.9:	Neutronenstromdichten für verschiedene Reflektor-/Moderatorsysteme.....	70
Tabelle 7.1:	Maximale Neutronenstromdichten J _{max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge ? für den ESS-SPTS Referenz-H ₂ -Moderator im Vergleich zur „back-to-back“-H ₂ -Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von +/-15°.....	83
Tabelle 7.2:	Maximale Neutronenstromdichten J _{max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge ? für den ESS-SPTS Referenz-H ₂ O- Moderator im Vergleich zur „back-to-back“-H ₂ O-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von +/-15°.....	83

Tabelle 7.3: Maximale Neutronenstromdichten J_{\max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für den ESS-SPTS Referenz-H ₂ -Moderator im Vergleich zur „side-by-side“-H ₂ -Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von $\pm 15^\circ$	84
Tabelle 7.4: Maximale Neutronenstromdichten J_{\max} und Pulsbreiten FWHM in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für den ESS-SPTS Referenz-H ₂ O-Moderator im Vergleich zur „side-by-side“-H ₂ O-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von $\pm 15^\circ$	84
Tabelle 7.5: Maximale J_{\max} und mittlere J_{mit} Neutronenstromdichten in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ für die ESS-LPTS Referenz-Moderatoren im Vergleich zu Side-by-side-Komponente, jeweils für einen Raumwinkel von $\pm 15^\circ$	87
Tabelle 8.1: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen ISIS und ESS..	88
Tabelle 8.2: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen SNS und ESS..	91
Tabelle 8.3: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen J-PARC und ESS.....	93
Tabelle 8.4: Gegenüberstellung wichtiger Parameter der Neutronenquellen SINQ und ESS.....	95
Tabelle 9.1: Bedingungen für eine Fusionsmaterialbestrahlungsanlage.....	98
Tabelle 9.2: Berechnete Schädigungsraten für die jeweiligen Bestrahlungspositionen in der ESS im Vergleich mit DEMO und IFMIF	105