

Zentralabteilung Technologie

**Sicherheitstechnische Analyse und  
Auslegungsaspekte von Abschirmungen  
gegen Teilchenstrahlung am Beispiel von  
Spaltungsanlagen im Megawatt Bereich**

***Romuald Hanslik***





***Sicherheitstechnische Analyse und  
Auslegungsaspekte von Abschirmungen  
gegen Teilchenstrahlung am Beispiel von  
Spallationsanlagen im Megawatt Bereich***

*Romuald Hanslik*

**Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 4225**

ISSN 0944-2952

Zentralabteilung Technologie

D 468 (Diss., Wuppertal, Univ., 2006)

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek, Verlag  
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

☎ 02461/61-5220 · Telefax: 02461/61-6103 · e-mail: [zb-publikation@fz-juelich.de](mailto:zb-publikation@fz-juelich.de)

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Abschirmungsproblematik von Teilchenstrahlungen, die in Hochstrom-Protonenbeschleunigern, Spallationsneutronenquellen und sog. ADS-Anlagen (Accelerator Driven Systems) erzeugt werden. ADS-Anlagen werden in Zukunft als Systeme für die Transmutation des radioaktiven Abfalls aus Kernreaktoren und zur Energieerzeugung große Bedeutung gewinnen.

In der Arbeit werden die physikalischen Faktoren, die sicherheitstechnischen Anforderungen, und entsprechende strahlenschutzsichere Abschirmkonzepte dargestellt, ausführlich diskutiert und neue Wege in der Abschirmungsauslegung aufgezeigt. Insbesondere wird im Vergleich zur Abschirmung von Kernreaktoren die ganz andere sicherheitstechnische Problematik erläutert.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die sicherheitstechnische Betrachtung der Beschleunigeranlagen und der Blanket- und Targetstationen sowie von Instrumentenabschirmungen von Spallationssystemen bezüglich der von ihnen ausgehenden Strahlung. Dabei werden die sicherheitstechnischen Abschirmanforderungen formuliert und diskutiert. Viele strahlenschutztechnische Fragestellungen bei der Abschirmungsauslegung von Spallationssystemen können nur durch Computersimulationsmethoden erfasst und analysiert werden. Die heute wichtigsten semiempirischen, deterministischen und stochastischen Computersimulationsmethoden als Verfahren zur Abschirmungskonzeption werden systematisch verglichen und in ihrer Anwendbarkeit diskutiert.

Ein breiter Raum der Arbeit wird den Abschirmungsmaterialien und ihrer Abschirmwirkung gegen verschiedene Strahlungsarten gewidmet. Dabei wird die Verwendung von Recycling-schrott als preiswerte Alternative diskutiert.

Aufgrund der Analysen und gewonnenen Erkenntnisse werden für die Erstellung und Auslegung der Beschleuniger- und Targetstationabschirmung generelle Ablaufschemata aufgestellt. Nach diesen Ablaufschemata können strahlenschutzsichere Abschirmungskonzepte für zukünftige ADS-Anlagen konzipiert und ingenieurtechnisch ausgearbeitet werden.

## Abstract

This paper discusses the shielding of particle radiation from high current accelerators, spallation neutron sources and so called ADS-facilities (Accelerator Driven Systems). ADS-facilities are expected to gain importance in the future for transmutation of long-lived isotopes from fission reactors as well as for energy production.

In this paper physical properties of the radiation as well as safety relevant requirements and corresponding shielding concepts will be discussed. New concepts for the layout and design of such shielding will be presented. Focal point of this work will be the fundamental difference between conventional fission reactor shielding and the safety relevant issues of shielding from high-energy radiation.

Key point of this paper is the safety assessment of shielding issues of high current accelerators, spallation targets and ADS-blanket systems as well as neutron scattering instruments at spallation neutron sources. Safety relevant shielding requirements will be presented and discussed. For the layout and design of the shielding for spallation sources computer base calculations methods are used. A discussion and comparison of the most important methods like semi-empirical, deterministic and stochastic codes will be presented.

Another key point within the presented paper is the discussion of shielding materials and their shielding efficiency concerning different types of radiation. The use of recycling material, as a cost efficient solution, will be discussed.

Based on the conducted analysis, flowcharts for a systematic layout and design of adequate shielding for targets and accelerators have been developed and will be discussed in this paper. By use of these flowcharts layout and engineering design of future ADS-facilities can be performed.

## Résumé

Ce travail concerne les problématiques de radioprotection liées aux émissions de particules produites par les accélérateurs de protons à haut flux, par les sources de neutrons à spallation et les installations ADS (Accelerator Driven Systems). Les installations ADS vont avoir une importance grandissante dans le futur pour la transmutation des déchets radioactifs provenant de réacteurs nucléaires ainsi que pour la production d'énergie.

Dans ce travail nous présenterons les facteurs physiques, les exigences de sécurité, et les concepts de protection contre les rayonnements radioactifs et nous présenterons de nouveaux moyens de radioprotection. Surtout, nous montrerons que les techniques de sécurité sont toutes autres que celles liées aux réacteurs nucléaires.

Un point important de ce travail est l'examen des techniques de sécurité liées aux accélérateurs, aux Blanket et aux cibles, ainsi qu'à la protection des instruments des systèmes à spallation. Par ailleurs, nous formulerons et discuterons des exigences de protection. Beaucoup de questions relatives aux techniques de protection des rayonnements ne peuvent être analysées que par des méthodes de simulation par ordinateur. Nous comparerons de manière systématique les méthodes de simulation par ordinateur aujourd'hui les plus importantes, c'est-à-dire les semi empiriques, les déterministes et les stochastiques, et nous discuterons de leur applicabilité.

Une large place sera consacrée aux matériaux utilisés pour la radioprotection et à leur efficacité contre diverses sortes de rayonnements. En outre, nous discuterons de l'utilisation des déchets recyclés comme une alternative financièrement intéressante.

Grâce aux connaissances acquises, nous présenterons des schémas de procédure généraux pour la conception de moyens de radioprotection des accélérateurs et des cibles. De ces schémas de procédure, les concepts de radioprotection pour les futures installations ADS pourront être conçus et réalisés.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Spallationsquelle und Abschirmungsproblematik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Neutronennutzung .....	3
2.2	Abschirmung von Spallationsquellen und Spaltungsreaktoren im Vergleich.....	3
2.2.1	Hochenergetische Neutronen .....	5
2.2.2	Abschwächung der Hochenergieneutronen.....	8
2.2.3	Teilchenfluss und Dosis .....	9
2.2.4	Gammastrahlung .....	10
2.3	Fazit.....	10
<b>3</b>	<b>Berechnungsmethoden für Abschirmungen .....</b>	<b>11</b>
3.1	Deterministische Berechnungsmethoden .....	12
3.1.1	Einfache Abschirmabschätzungen .....	12
3.1.2	Berechnungsmethoden nach dem Prinzip der diskreten Ordinaten ( $S_n$ -Verfahren) .....	14
3.1.3	Semi-Empirische Berechnungsmethoden .....	15
3.2	Stochastische Berechnungsmethoden .....	19
3.2.1	Die HETC-basierten Systeme .....	20
3.3	Kopplungsberechnungsmethoden .....	23
3.4	Abschirmungsexperimente zur Validierung von Berechnungsverfahren .....	24
<b>4</b>	<b>Eigenschaften der verwendeten Materialien für die Abschirmung .....</b>	<b>34</b>
4.1	Wechselwirkung von Teilchen mit Materie .....	34
4.2	Analyse der Materialeigenschaften für Abschirmungen.....	34
4.2.1	Erdreich als Abschirmmaterial.....	34
4.2.2	Beton als Abschirmmaterial .....	35
4.2.3	Wasserstoffhaltige Materialien –Wasser, Paraffin, Polyethylen.....	36
4.2.4	Eisen und Stahl als Abschirmmaterialien.....	37
4.2.5	Schwermetalle wie Blei, Uran als Abschirmmaterialien .....	38
4.2.6	Andere Materialien wie Lithium, Beryllium, Bor, Graphit, Aluminium als Abschirmmaterialien .....	38
4.3	Abschirmungsmaterialien von schwachradioaktiven Reststoffen.....	40
4.4	Anforderungen an die Abschirmungsmaterialien .....	41
4.5	Aktivierung von Abschirmmaterialien.....	43
4.6	Strahlenschädigung von Abschirmmaterialien.....	44
<b>5</b>	<b>Abschirmungsaspekte und Anforderungen an Spallationssysteme .....</b>	<b>46</b>
5.1	Abschirmungsarten in einem Spallationssystem.....	50
5.2	Designanforderungen an die Abschirmung eines Spallationssystems .....	52
5.3	Sky- und Groundshine Phänomene .....	53
<b>6</b>	<b>Konzeptionelle und technische Umsetzung der Beschleunigerabschirmung. ....</b>	<b>59</b>
6.1	Sicherheitstechnische Anforderungen an die Beschleunigerabschirmung.....	60
6.2	Abschirmungsanforderungen für einen Spallationsquellenbeschleuniger .....	62
6.3	Ausführungsbeispiele der Beschleunigerabschirmung .....	70
6.4	Fazit.....	78

<b>7</b>	<b>Konzeptionelle und technische Umsetzung der Targetstationsabschirmung in einer Spallationsneutronenquelle.....</b>	<b>80</b>
7.1	Auslegung der Targetabschirmung .....	81
7.1.1	Abschirmung der Protonenstrahlführung zum Target.....	82
7.1.2	Abschirmung des Targetsystems.....	85
7.1.3	Anforderungen an die Targetabschirmung.....	99
7.1.4	Beispiele der Targetstationabschirmung .....	100
7.2	Konzeptionelle und technische Umsetzung der Instrumentenabschirmung .....	107
7.2.1	Sicherheitstechnische Anforderungen an die Instrumentenabschirmung .....	107
7.2.2	Beispiele der Instrumentenabschirmung .....	109
7.3	Fazit.....	115
<b>8</b>	<b>Sicherheitstechnische Aspekte von beschleunigergetriebenen Systemen zur Transmutation und Energieerzeugung .....</b>	<b>118</b>
8.1	Abschirmungsproblematik an beschleunigergetriebenen Systemen .....	122
8.1.1	Auslegung der Protonenbeschleunigerabschirmung .....	123
8.1.2	Abschirmungsproblematik bei der Target-Blanketstation .....	126
8.2	Fazit.....	132
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion.....</b>	<b>133</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>135</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>152</b>

# 1 Einleitung

In jüngerer Zeit gewinnt eine alternative Methode der Freisetzung von Neutronen aus Materie zunehmend an Bedeutung, nämlich die Spallation. Im Gegensatz zur Kernspaltung wird dabei nicht eine sich selbst erhaltende Reaktion ausgenutzt, sondern es wird ein energiereicher Teilchenstrahl auf schweres Metall (Target) geschossen, aus dessen Kernen dann die Neutronen freigesetzt werden. Diese Technik bietet drei wesentliche Vorteile: Erstens lässt sich der treibende Teilchenstrahl nahezu beliebig ein- und ausschalten, wodurch es möglich wird, die Neutronen mit einer für viele Anwendungen vorteilhaften Zeitstruktur zu erzeugen (gepulste Neutronenquellen); zweitens wird pro erzeugtem Neutron weniger Energie im Target umgesetzt, was die Kühlung wesentlich erleichtert; und drittens ist der Prozess nicht auf einige wenige spaltbare Isotope begrenzt, sondern findet in praktisch jedem Material statt, wenn auch mit unterschiedlicher Neutronenausbeute /Bau 01/.

Ein halbes Jahrhundert wurden auf der Kernspaltung basierende Reaktoren zur Energieerzeugung und als Neutronenquellen für die Forschung genutzt. Das Maß für die Leistungsfähigkeit eines Forschungsreaktors ist dabei der maximale thermische Neutronenfluss. Den weltweit höchsten Neutronenfluss erzielte der 1971 in Betrieb gegangene Hochflussreaktor in Grenoble (57 MW) mit  $1,2 \cdot 10^{15}$  Neutronen/cm<sup>2</sup>s. Leichtwasserreaktoren erzielen eine thermische Neutronenflussdichte von  $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s und schnelle Brüter eine Flussdichte von  $3 \cdot 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s. Hohe Neutronenflüsse sind nur durch Kompaktierung des Reaktorkerns möglich geworden. Da sich dadurch gleichzeitig die Leistungsdichte enorm erhöht, stößt man an die Grenzen der Kühlbarkeit.

Während in Kernreaktionen der erreichbare Neutronenfluss durch Wärmeabfuhrprobleme begrenzt wird, eröffnen die beiden letztgenannten Eigenschaften der Spallation die Möglichkeit, Neutronenquellen mit sehr hohen Flüssen zu bauen, weil die an sich bereits geringere Wärme durch Einsatz flüssiger Metalltargets besonders effektiv abgeführt werden kann. Trotzdem stellt die Entwicklung leistungsstarker Spallations-Neutronenquellen eine erhebliche technische Herausforderung dar.

Außer in der Forschung können die durch Spallation erzeugten Neutronenflüsse gezielt zur Umwandlung langlebiger Isotope oder Spaltstoffbrütung unter möglicher Nettoenergiegewinnung in konzeptionell bereits angedachten Transmutationsanlagen genutzt werden. In jedem Fall werden die Kernprozesse unterkritisch durch einen Primärteilchenbeschleuniger getrieben.

Zur zukünftigen Nutzung des Potentials von Spallationsquellen verschiedener Art werden in Europa, Japan und USA stärkere Spallationsquellen für die Grundlagenforschung sowie Transmutationsanlagen studiert, projektiert und gebaut. Dabei zeigt sich, dass auf den Feldern der Beschleuniger- und Targettechnologie eine Vielzahl sicherheitstechnischer Fragestellungen gelöst werden müssen. In dem Zusammenhang darf die Abschirmungsproblematik und Abschirmungstechnologie für diese Spallationsanlagen nicht vernachlässigt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Sicherheitsproblematik der Abschirmungstechnik für Spallationsquellen zu liefern. Sie gibt den bisher erreichten technischen Wissensstand von gebauten und geplanten Spallationsquellen wieder und zeigt neue Wege in der sicherheitstechnischen Abschirmungsauslegung für zukünftige Spallationsanlagen auf.

Die verschiedenen Abschirmungsbereiche in Spallationsanlagen werden in dieser Arbeit dargestellt und unter Strahlenschutzaspekten diskutiert.

Diese Arbeit stellt die Ausführung der Abschirmung moderner Spallationsquellen im Hinblick auf sicherheitstechnische Fragestellungen im Bereich der Beschleuniger- und Targettechnologie dar und untersucht, inwieweit die Abschirmungstechnik den Sicherheitskriterien der je-

weiligen Spallationsanlagen entspricht. Die im Rahmen der Arbeit behandelten Fragestellungen an Beschleunigern und Targetstationen gehen von Teilchenenergien bis in den 3 GeV-Bereich aus.

Im folgenden Kapitel werden Abschirmungen an verschiedenen Spallationsquellen behandelt (SNS, JSNS, ESS etc.). Abschließend werden sicherheitstechnische Fragestellungen und Abschirmungsfragen der zukünftigen Transmutationssysteme (ADS) diskutiert. Dabei werden insbesondere die Abschirmtechniken der im Bau befindlichen Hochstromquellen SNS /McN 01/, /Joh 00/, J-PARC /Ike 03/ und der geplanten Hochstromquelle ESS /ESS 03/ dargestellt und analysiert.

## 2 Spallationsquelle und Abschirmungsproblematik

### 2.1 Neutronennutzung

Je nach Neutronennutzungsart werden Spallationsquellen auf drei Gruppen aufgeteilt:

- I. Spallations-Neutronenquellen für die Grundlagenforschung.
- II. Spallations-Neutronenquellen für die Transmutation von Actiniden.
- III. Spallations-Neutronenquellen für die Spaltstofferzeugung und zur Energieerzeugung.

Für die Grundlagenforschung sind Neutronen eine Sonde, mit der ein grundlegendes Verständnis der Materialien und ihrer Eigenschaften ermöglicht wird.

Deshalb werden die neuen, entweder geplanten oder auch im Bau befindlichen, Spallationsquellen einen gewaltigen Fortschritt mit einer Intensitätserhöhung um nahezu zwei Größenordnungen hervorbringen und die Neutronenforschung revolutionieren.

Der radioaktive Abfall ist unabhängig von der Zukunft der Kernenergie in großen Mengen bereits vorhanden. Der radioaktive Abfall wird bis zur Abschaltung eines Kernkraftwerks weiter produziert, so dass es unabdingbar ist, weiterführende Arbeiten in den Bereichen Actinidenforschung, Brennstoffverfahren und Umwandlungsverfahren (Transmutation) von Actiniden und Plutonium sowie Arbeiten zur Endlagerung des radioaktiven Abfalls durchzuführen.

In einer Transmutationsreaktion werden Actinide und langlebige Spaltprodukte in kurzlebige Isotope oder stabile Elemente umgewandelt. Die Umwandlung (Transmutation) kann besonders effektiv in beschleunigergetriebenen Systemen erfolgen. In einem beschleunigergetriebenen System (ADS-englisch: Accelerator Driven System) verursachen durch Spallationsprozesse erzeugten hochintensive Neutronenflüsse  $\gg 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s die gewünschten Transmutationsreaktionen.

Die strategische Zielsetzung und gesellschaftliche Bedeutung eines ADS ist die Energieerzeugung /Rub 93/ oder die Transmutation von langlebigem radioaktivem Abfall, um die Menge und Radiotoxizität von radioaktivem Abfall zu verringern /Kne 01/.

### 2.2 Abschirmung von Spallationsquellen und Spaltungsreaktoren im Vergleich.

Den physikalischen Abläufen bei der Spallation und der Kernspaltung geben die ersten Hinweise auf die Abschirmungsfragen und die Unterschiede zwischen den Abschirmungen in der Spallationsquelle und bei den Spaltungsreaktoren.

Beim Spallationsprozess werden geladene Teilchen meistens Protonen als Primärteilchen hoher kinetischer Energie auf ein Ziel (Target) aus Schwermetallkernen geschossen. Die hochenergetischen Primärteilchen dringen in den Kern ein und verursachen Stoßreaktionen mit den Nukleonen innerhalb des Kerns (inelastische Hadron-Kern Wechselwirkung). In dieser Interaktion innerhalb des Targetkerns (sogenannte intranukleare Kaskade) werden hauptsächlich Neutronen und Protonen des Kerns freigesetzt. Die so freigesetzten hochenergetischen Kaskadenteilchen können wiederum mit anderen Targetkernen in einer sogenannten internuklearen Kaskade reagieren. Der Restkern bleibt energetisch angeregt zurück. Er dampft in einem Spallationsprozess niederenergetische weitere Nukleonen und massive Kernbausteine ab. Für diesen Prozess ist charakteristisch, dass wesentlich mehr Neutronen als andere Teilchen

erzeugt werden. Liegt ein größeres Volumen Schwermetall in Form eines sogenannten Targets vor, können pro eingeschossenes Primärteilchen etwa 20 bis 40 Neutronen freiwerden (Abb. 2.2-1).

Die Zahl der Spaltneutronen liegt je nach verwendetem Spaltmaterial im Mittel zwischen 2 und 3. Spaltneutronen zeigen eine breite Energieverteilung mit maximalen Neutronenenergien bis 10 MeV. Die mittlere Energie der Spaltneutronen beträgt etwa 2 MeV, die wahrscheinlichste etwa 1 MeV.

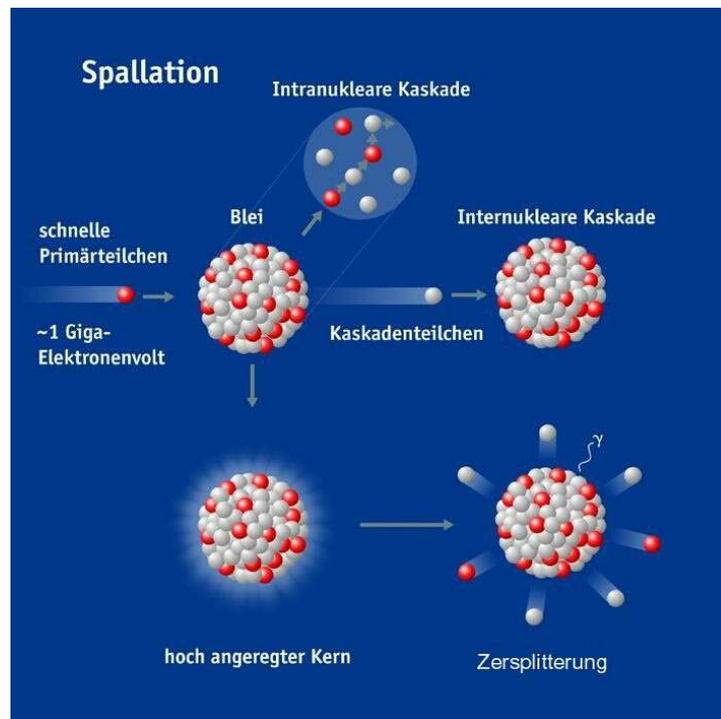


Abb. 2.2-1: Schematische Darstellung eines Spallationsprozesses

Beim Vergleich der Prozesse werden nicht nur Unterschiede in der Neutronenproduktion festgestellt, sondern auch in der Menge der deponierten Energie pro erzeugtes Neutron. Die Teilchentransportsimulationen für Schwermetalltargets zeigen, dass bei der Spallation 47 % der einfallenden Protonenenergie im Target in Form von Wärme pro erzeugtes Neutron deponiert wird (vergl. Kap. 7.1.2). In diesem Spallationsprozess werden pro einfallendes Proton ca. 20 Neutronen erzeugt. Bei Protonenenergie von 1,334 GeV (ESS) wird eine Energie von ca. 32 MeV pro erzeugten Neutron im Target deponiert. Dagegen wird im Kernspaltungsprozess (2,4 Neutronen) Energie von ca. 200 MeV pro Spaltung im Kern deponiert. Dieses Phänomen zeigt die Kühlgrenzen des Kerns in modernen Kernspaltungsreaktoren auf.

Die bei der Spallation erzeugten Neutronen haben viel höhere Energie (vor allem die hochenergetische Kaskadeneutronen) als bei der Spaltung. Die hochenergetischen Neutronen sind extrem durchdringend (Kap. 2.2.1), was bei der Auslegung der Abschirmung berücksichtigt werden muss.

### 2.2.1 Hochenergetische Neutronen

Verschiedene Neutronenquellen weisen je nach Art der Neutronenentstehung verschiedene Neutronenspektren auf. In der Abb. 2.2.1-1 wird ein Vergleich verschiedener Neutronenspektren gezeigt, wie sie bei der Spaltung, Fusion und Spallation zu erwarten sind. In Spallationsquellen können Neutronenenergien bis zur Energie der eintreffenden Protonen (1,3 GeV-3,0 GeV) auftreten.

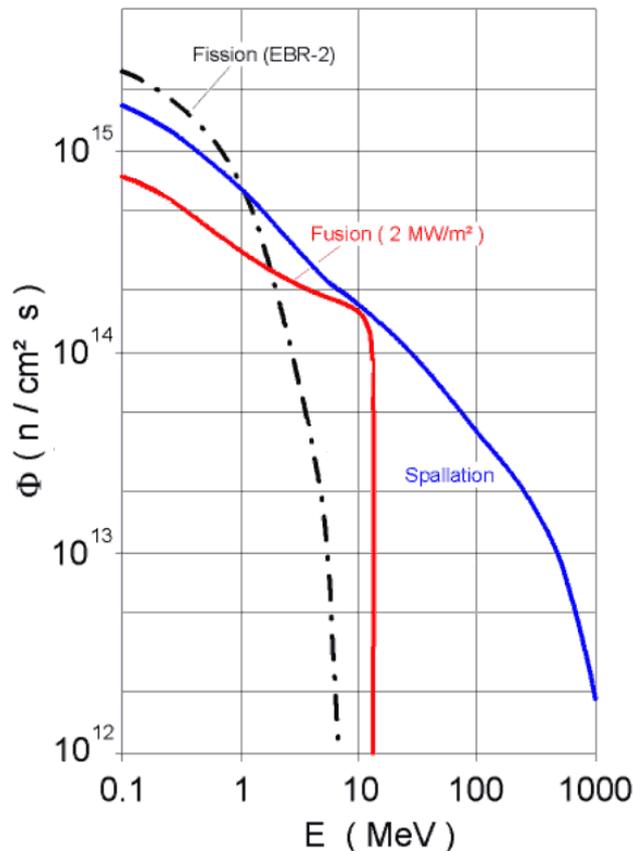


Abb. 2.2.1-1: Neutronenspektren verschiedener Quellen

Die bei den Spallationsprozessen entstehenden Neutronen können in zwei Energiebereiche geteilt werden: niedrigenergetische ( $< 20\text{MeV}$ ) und hochenergetische ( $> 20\text{MeV}$ ). Die niedrigenergetischen Neutronen können auf verschiedenen Wegen erzeugt werden: a) bei der Verdampfung; b) aus Kernspaltungsprozessen (Hochenergiespaltung). Diese niedrigenergetischen Neutronen sind fast isotrop emittiert. Die damit gebundene Abschirmungsproblematik ist bekannt aus der Spaltreakorteknik und sehr gut untersucht.

Die Abb. 2.2.1-2 zeigt typische Neutronenspektren einer Spallationsquelle und bei der Kernspaltung. Es ist deutlich zu sehen, dass im Gegensatz zum konventionellen Spaltreaktor mehr als 15% der Neutronen Energie größer als 20 MeV und ca. 3% Energie höher als 150 MeV besitzt.

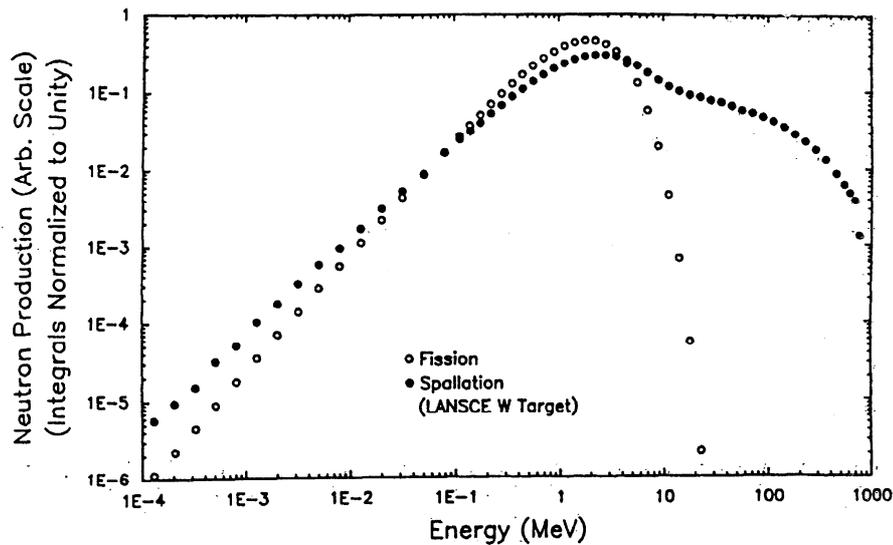


Abb. 2.2.1-2: Neutronenspektrum bei Spaltung und Spallation Beschuss des Wolfram-targets mit 800 MeV Protonenstrahl /Rus 90/

Die aus den Nukleon-Nukleon Reaktionen resultierenden hochenergetische Neutronen zeigen starke Energieabhängigkeit und anisotropische Verteilung. In der Abb. 2.2.1-3 wurden die Experimentelle Daten beim Beschuss von Blei-Pb und Eisen-Fe mit 1600 MeV Protonen mit den berechneten Daten aus Bertinis Preequilibrium Modell (BPQ) und INCL2 (Intranukleare-Kaskade-Modell) dargestellt /HIN 03/. In der Vorwärtsrichtung ( $0^\circ$  zum Protonenstrahl) reicht die höchste Neutronenenergie bis zur Energie des wechselwirkenden Primärteilchens. Das Hochenergieneutronenspektrum schwächt sich mit der Winkelzunahme zum Protonenstrahl beträchtlich ab.

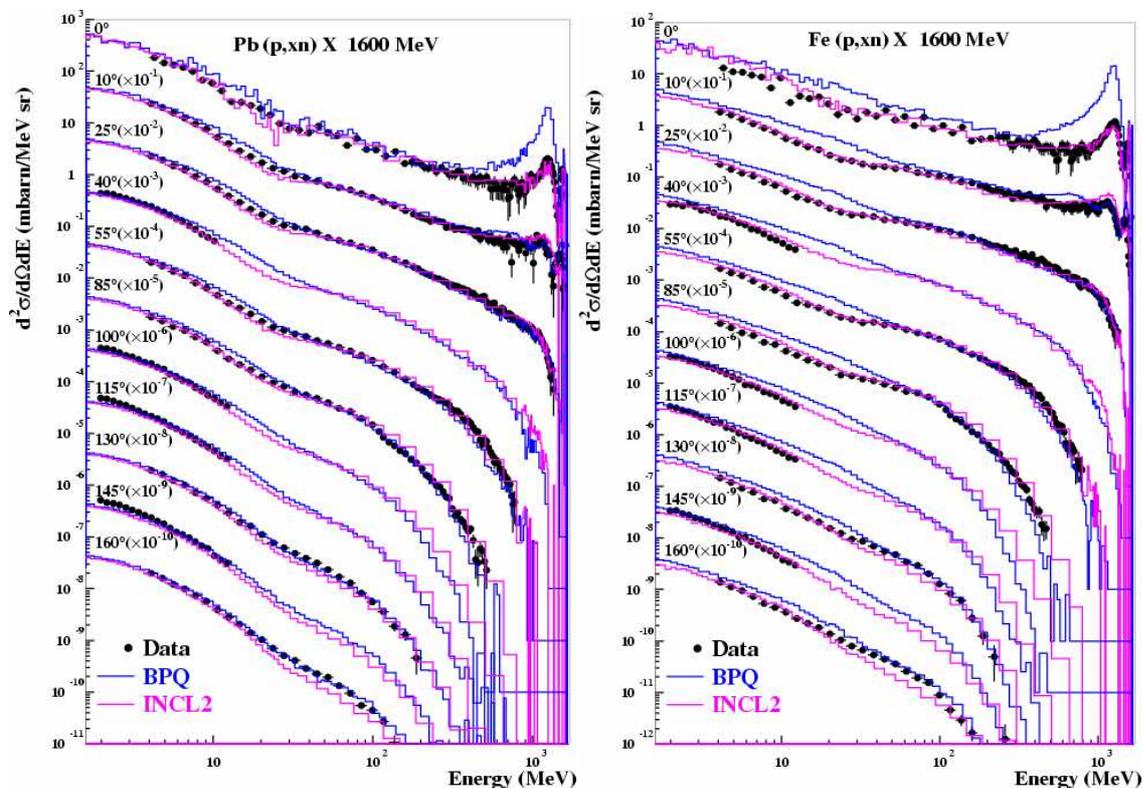


Abb. 2.2.1-3: Doppel-differentielle Neutronen-Produktionsquerschnitte beim Beschuss von Blei-Pb(links) und Eisen-Fe (rechts) mit 1600 MeV Protonen im Winkelbereich von  $0-160^\circ$  /HIN 03/

Die berechneten doppelt-differentiellen (Energie und Winkel) Neutronen-Produktionsspektren zeigen beim Beschuss eines Targets aus Quecksilber mit 1,334 GeV Protonen im hochenergetischen Bereich starke Winkelabhängigkeit, aber haben eine fast isotrope Verteilung im Bereich der Niedrigenergieutronen (Abb. 2.2.1-4).

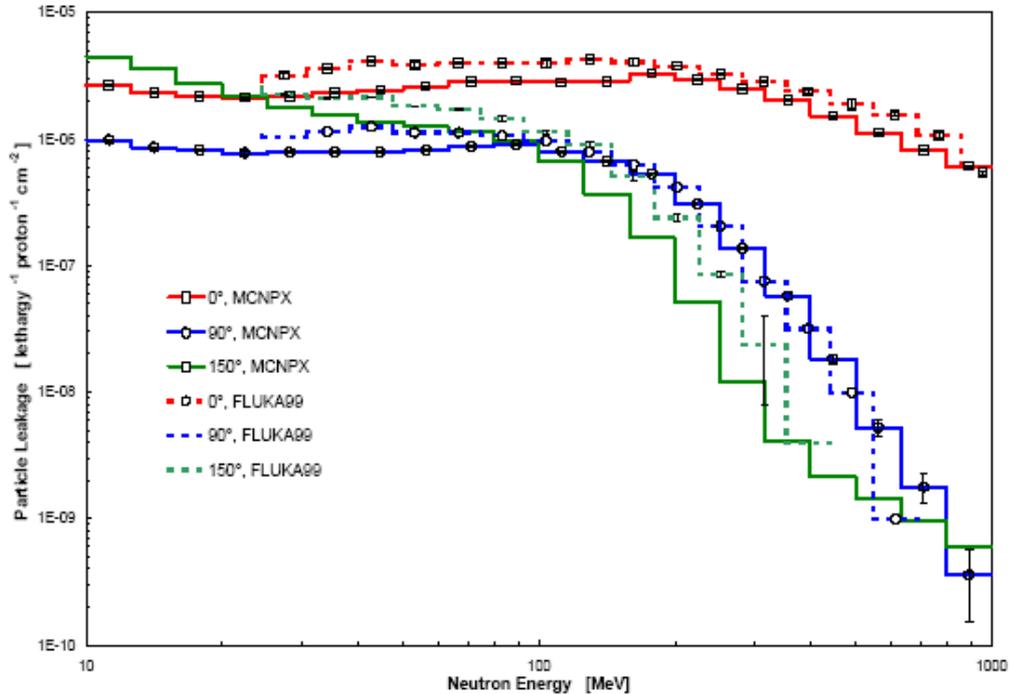


Abb. 2.2.1-4: Berechnete mittels MCNPX und FLUKA Neutronenspektren beim Beschuss von Quecksilbertarget durch 1,334 GeV Protonen /Kop 02/

Gleichzeitig variieren beim Targetbeschuss mit Protonen die Neutronenspektren und der Anteil der hochenergetischen Neutronen verschiedenen Targetmaterialien.

In der Abb. 2.2.1-5 sind die berechneten Ausflussneutronenspektren von Targets aus Quecksilber, Tantal und Wolfram gegenüber gestellt. Die unterschiedlichen Spektren sind deutlich zu erkennen.

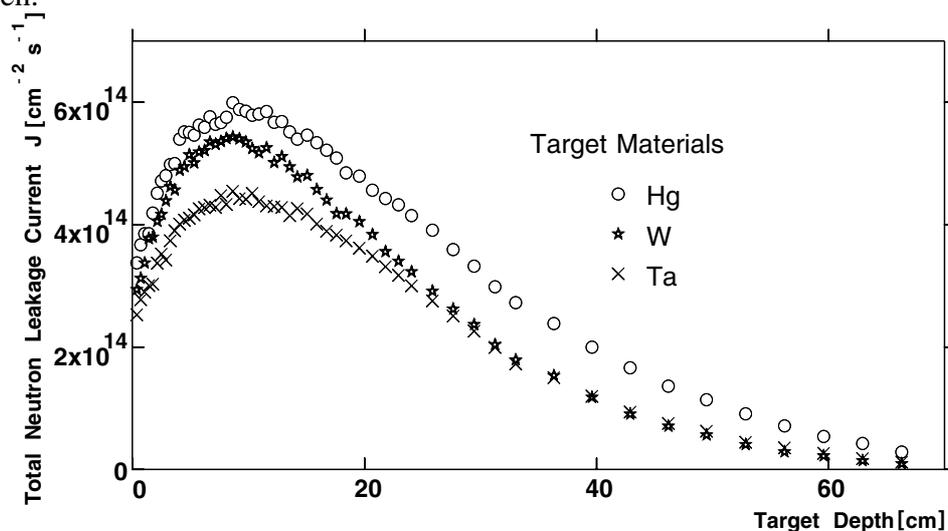


Abb. 2.2.1-5: Berechnete Ausflussneutronenspektren beim Beschuss von Quecksilber-, Tantal- und Wolframtarget durch 1,334 GeV, 5 MW Protonenstrahlleistung /ESS 97/

Auch die Materialabhängigkeit der Neutronenproduktion beim Spallationsprozess gestalten die Spallationsabschirmung im Vergleich zur Reaktorabschirmung aufwendiger und komplexer.

### 2.2.2 Abschwächung der Hochenergieneutronen

Die hochenergetischen primären Teilchen verursachen in der Abschirmung Hadronenkaskaden und elektromagnetische Kaskaden, wobei je nach den primären Teilchen die eine oder andere Kaskade überwiegt. Der größte Teil der einfallenden Energie wird durch elektromagnetische Prozesse an das Abschirmmaterial abgegeben und nur ein kleiner Teil in neue Teilchen umgesetzt. Die geladenen Teilchen werden durch ihre elektromagnetische Wechselwirkung ziemlich schnell abgebremst. Lediglich die Neutronen und Myonen (in Vorwärtsrichtung) bleiben als weitreichende Komponente übrig /Fre 72/(Abb. 2.2.2-1). Diese Teilchen bestimmen daher weitgehend die Dicke der Abschirmung. Die Abschirmberechnungen für hochenergetische Myonen sind wesentlich einfacher als die für die Neutronenabschirmung notwendigen Methoden. Die Erzeugung von Myonen erfolgt bei Hadronenstrahlen vorwiegend aus dem Pionenzerfall und ist stark nach vorne gebündelt. Allerdings ist die myonische Komponente bei Protoneneinschussenergien unter 3 GeV vernachlässigbar. Da der Energieverlust bei Myonen im Wesentlichen nur durch Ionisation erfolgt, kann man (unter Berücksichtigung der Coulomb-Streuung /Nel 68/) Rechenprogramme aufstellen, die analytisch die notwendige Abschirmdicke berechnen.

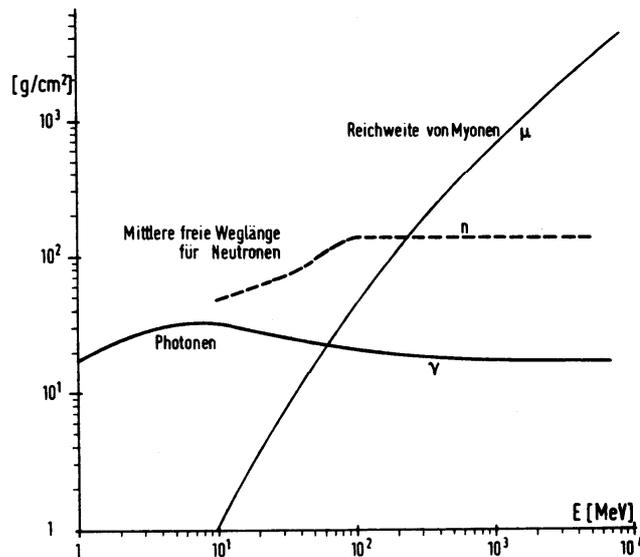


Abb. 2.2.2-1: Mittlere freie Weglänge von Photonen und Neutronen sowie Reichweite von Myonen in Kupfer in Abhängigkeit von der Teilchenenergie /Fre 72/

Die elastischen Hadron-Kern-Wechselwirkungen verursachen bei den Hochenergieneutronen mit Energien über 100 MeV nur kleine Energieverluste und geringe Winkelablenkungen. Diese Neutronen können effektiv nur durch inelastische Stoßvorgänge mit schweren Atomkernen gebremst werden. Erst unterhalb von 50 MeV Neutronenenergie tragen auch die elastischen Prozesse zur Schwächung bei.

Aber die Abschirmung selbst wird auch zu einer weiteren Quelle für die Neutronen. Hoch- und Niedrigenergieneutronen produzieren Gammaquanten niedriger Energie, welche auch zur

Oberflächendosis beitragen. Die hochenergetischen Neutronen bestimmen also mit ihrer Abschwächungslänge im Wesentlichen die notwendige Dicke der Abschirmung. Diese Abschwächungslänge wiederum hängt von der Dichte des Abschirmungsmaterials ab.

Die resultierende Oberflächendosis wird im Unterschied zur Reaktorabschirmung nicht nur durch die Hochenergieutronen sondern auch durch deren Sekundärneutronen- und Gammastrahlungsproduktion bestimmt.

### 2.2.3 Teilchenfluss und Dosis

Die nächste Komplikation bei der Betrachtung der Spallationsquellenabschirmung ist die Bestimmung der Konversion von Teilchenfluss zu Dosis, welche vor allem bei der Berechnung der Dosis oder des Teilchenflusses große Fehler verursachen kann. Bei den meisten Berechnungsprogrammen werden die Rechenergebnisse in Teilchenflüssen angegeben. Um diese in Äquivalentdosis auszudrücken, wird eine Umrechnung mit Hilfe eines energieabhängigen Konversionsfaktors benötigt (Abb. 2.2.3-1). Der Teilchenfluss [ $n/cm^2*s$ ] multipliziert mit dem entsprechenden energieabhängigen Konversionsfaktor [ $Sv*cm^2$ ] ergibt die Äquivalentdosis in Sv/s. Die Multiplikation dieser Äquivalentdosis mit dem Faktor  $3,6*10^{09}$  ergibt die Äquivalentdosis in  $\mu Sv/h$ .

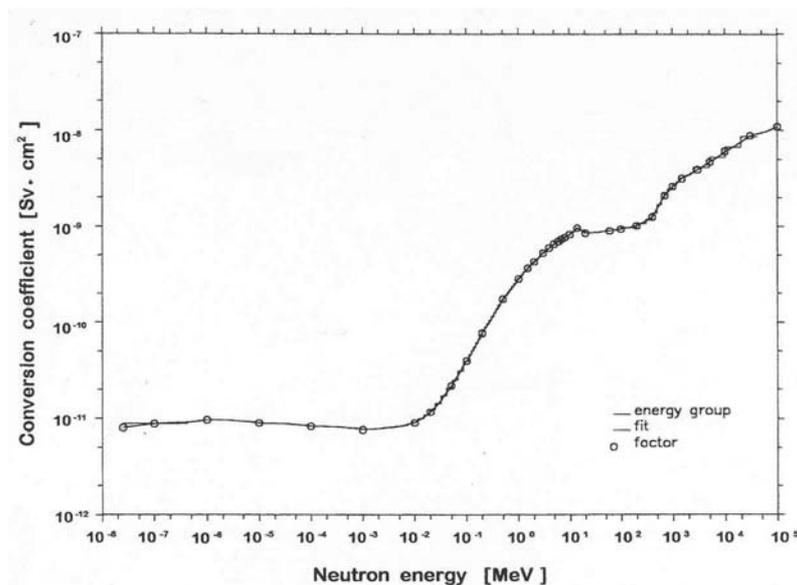


Abb. 2.2.3-1: Verlauf des energieabhängigen Konversionsfaktors für Neutronen  
/Sta 93/

Der als Funktion der Energie sich schnell ändernde Fluss-/Dosis-Konversionsfaktor kann jedoch große Fehler in der Berechnung der Äquivalentdosis erzeugen, wenn die Teilchenspektren nicht genau bekannt sind.

Teilchenfluss und die Dosis werden aufgrund der Energieabhängigkeit der Konversionsfaktoren sehr unterschiedlich durch eine Abschirmung abgeschwächt. Bei der Abschwächung der niedrigenergetischen Neutronen werden die Neutronen innerhalb der Abschirmung moderiert und absorbiert, was die Dosis vermindert. Allerdings werden durch Absorption und inelastische Wechselwirkung Gammaquanten produziert, die an der Abschirmungsfläche einen zusätzlichen Beitrag zur Gesamtdosis liefern, was aber im Neutronenflusskonversionsfaktor nicht berücksichtigt ist. Deswegen muss bei der Auslegung einer Abschirmung eine detaillierte Bestimmung der einzelnen Teilchenschauerkomponente wie: Teilchenarten und -spektren durchgeführt werden.

### **2.2.4 Gammastrahlung**

Für die Auslegung der biologischen Abschirmung ist es wichtig die Gesamtdosis an der Oberfläche zu bestimmen.

Die niederenergetischen Neutronen werden entweder in der Abschirmung absorbiert oder erzeugen Leckage. Diese niederenergetischen Neutronen erzeugen auch Gammastrahlen. Zusätzlich zu der Absorption und der inelastischen Wechselwirkung werden Gammastrahlen im Spallationsprozess selbst produziert, die einen zusätzlichen Beitrag zur Gesamtdosis liefern.

Bei der Auslegung der Abschirmung für eine Spallationsquelle sollte man alle drei Neutronenkomponenten (primäre niederenergetische Neutronen, primäre hochenergetische Neutronen und sekundäre niederenergetische Neutronen) und gleichzeitig Gammastrahlenproduktion von der Spallation selbst in Betracht ziehen.

## **2.3 Fazit**

Die Abschirmung einer Spallationsquelle mit ihren Komponenten (Teilchenbeschleuniger, Targetstation, Instrumente) gestaltet sich damit viel komplexer als die Kernreaktorabschirmung. Die unterschiedlichen Hochenergieneutronenspektren mit ihrer starker Anisotropie, die in der Abschirmung erzeugten Gammaquanten und sekundären Hoch- und Niedrigenergie-neutronen führen zu ganz anderen sicherheitstechnischen Überlegungen bei der Auslegung der Abschirmung. Dies wird im Folgenden für verschiedene Abschirmungskonzepte von Spallationsquellen und den zukünftigen ADS-Systemen diskutiert und verglichen.

### 3 Berechnungsmethoden für Abschirmungen

Die wichtigste Aufgabe der Abschirmung ist es, die mögliche Strahlenbelastung von Personen und Umwelt unter einer bestimmten Grenze zu halten. Um die Stärke der Abschirmungen auszulegen, müssen Berechnungen durchgeführt werden. Diese können mit verschiedenem Aufwand durchgeführt werden: Von einfachen Abschätzungen bis hin zu komplizierten Rechenverfahren. Mobile Abschirmungen werden oft aus Abschirmmaterialien gebaut und nach Bedarf verstärkt. Stationäre Abschirmungen erfordern genauere rechnerische Auslegung.

Für die Berechnungen der Abschirmungen wurden verschiedene komplexe Rechenmodelle entwickelt und eingesetzt. Jedoch existieren für die hochenergetischen Neutronen nur wenige experimentelle Daten zur Validierung der Berechnungen. Die verschiedenen Rechenmodelle können in deterministische, stochastische und Kopplungsverfahren unterteilt werden. In der Tabelle 3-1 sind die wichtigsten Berechnungsmethoden zusammengestellt.

Tab 3-1: Die wichtigsten Berechnungsmethoden zur Abschirmungsberechnung

Berechnungs-Methoden	Modell		Code-Name	Referenz
Deterministische Methoden	Differentielle Transportmethoden- Diskrete Ordinaten $S_n$		1 – Dimensional ANISN	/War 73/
			2-Dimensional DOT	/Rho 78/
			2-Dimensional DORT	/Rho 88/
			3 – Dimensional TORT	/Rho 97/
			1-,2-,3-Dimensional DOORS	/RSI 98/
	Integrale Transport Methoden		PALLAS	/Tak 81/
			BERMUDA	/Suz 92/
	Semi-Empirische Methoden		Moyer	/Moy 62/
			CASL	/Arm 84//Fil 95/ /Wol 96/
Stochastische Methoden	Monte Carlo Simulationen für Energien bis zu 20 MeV	Punktdatenmodelle	MVP	/Mor 94/
			MCNP	/Bri 86/
		Gruppendatenmodelle	MORSE	/Emm 79/
			VIM	/Blo 80/
			TART97	/Cul 97/
		Monte Carlo Simulationen für Energien über 20 MeV		HETC

Berechnungs-Methoden	Modell	Code-Name	Referenz
Stochastische Methoden	Monte Carlo Simulationen für Energien über 20 MeV	HERMES (HETC-KFA+MORSE-CG+EGS4+NDM)	/Clo 88a/
		LAHET	/Pra 89/
		MCNPX	/Hug 97/
		FLUKA	/Fas 93/
Kopplungsmethoden	Kopplung HETC+ANISN	HETC+ANISN	/Mol 91/
	Kopplung Monte Carlo+ANISN	MTA	/Gal 01/
	Kopplung Monte Carlo+DORT	MTD	/Gal 01/
	Kopplung Monte Carlo+TORT	MTT	/Gal 01/
	Kopplung DORT+DORT	DTD	/Lil 90/

### 3.1 Deterministische Berechnungsmethoden

Die deterministischen Berechnungsmethoden sind für die Berechnung des Neutralteilchentransports ( $n, \gamma$ ) in der Fusions- und Reaktorphysik fundamentalen Berechnungsverfahren. Diese Verfahren beruhen auf unterschiedlichen Lösungsansätzen der Boltzmann-Gleichung /Lew 93/. In diesem Berechnungsverfahren werden keine einzelnen Teilchen behandelt, sondern es wird eine doppelt differenzielle Flussverteilung berechnet. Das sog.  $S_N$ -Verfahren oder die Methode der diskreten Ordinaten löst die Boltzmann-Gleichung durch ein numerisches Verfahren, indem der Phasenraum in eine Anzahl diskreter Punkte unterteilt wird. Hierbei werden die Winkelverteilungen der Neutronen und Photonen über die entsprechenden Streumatrizen der verwendeten Wirkungsquerschnitts-Bibliotheken in Legendre-Entwicklungen dargestellt. In mehreren Iterationsebenen werden die wechselseitigen Einflüsse der Energie-, Winkel- und Raumintervalle berücksichtigt und der resultierende Fluss an der nächsten Intervallgrenze innerhalb der Geometrie berechnet /Lew 93/. Einige Berechnungsverfahren werden in den nächsten Kapiteln näher erläutert.

#### 3.1.1 Einfache Abschirmabschätzungen

Im Kap. 2. wurden die wichtigsten Faktoren, wie: Abschwächungslänge der Teilchen und die Dichte des Materials für die Abschirmung von Mittel- und Hochenergieteilchen angesprochen. Für dicke Abschirmungen, von mehreren mittleren freien Weglängen von der Quelle, hängt die Teilchenfluss- oder Dosisabschwächung annähernd exponentiell von den Faktoren Abschwächungslänge und Dichte des Materials und linear von der Quellstärke ab. Für die ersten Abschätzungen kann der Teilchenfluss mittels folgender Formel dargestellt werden /Arm 82/:

$$\varphi(E,r) \approx S \cdot B(E) \cdot \exp(-\rho r / \lambda_{\text{att}}) / r^2 \quad [\text{GL. 3.1-1}]$$

mit

S = Quellterm

B(E) = Aufbaufaktor („Buildup“-Faktor) [dimensionslos]

$\lambda_{\text{att}}$  = Abschwächungslänge in  $[\text{g}/\text{cm}^2]$

r = Entfernung zur Quelle [cm]

$\rho$  = Dichte des Abschirmmaterials in  $[\text{g}/\text{cm}^3]$

Der wichtigste Faktor zur Auslegung der Abschirmung in dieser Formel ist die Abschwächungslänge  $\lambda_{\text{att}}$ . Die Abschwächungslänge definiert die Dicke eines Materials bei deren Durchdringung der Neutronenfluss einer bestimmten Energie materialabhängig um den Faktor  $e^{-1}$  geschwächt wird. Es liegen nur sehr ungenaue Werte dieses Parameters vor. Die Tab. 3.1.1-1 zeigt die unterschiedlichen nominellen Werte für mittlere freie Weglänge und Abschwächungslänge  $\lambda_{\text{att}}$  verschiedener Materialien. In /Tho 68/ werden Messergebnisse verschiedener Laboratorien für die unterschiedlichen Abschwächungslängen  $\lambda_{\text{att}}$  aufgelistet.

Tab. 3.1.1-1: Nominelle Werte für mittlere freie Weglängen und Abschwächungslängen verschiedener Materialien im Vergleich

Material	Dichte	Mittlere freie Weglänge $\lambda_n$ für inelastische Stöße $\lambda_n \approx 33 A^{1/3} (*)$ /Arm 81/		Abschwächungslänge $\lambda_{\text{att}}$ /Arm 81/	Mittlere freie Weglänge $\lambda_n$ für inelastische Stöße $\lambda_n \approx 38 A^{0,31} (*)$ /Pat 73/		Abschwächungslänge $\lambda_{\text{att}}$ /Pat 73/
		$\text{g}/\text{cm}^2$	cm		$\text{g}/\text{cm}^2$	cm	
Eisen	7,8	130	16	120-200	134	17,4	119-179
Blei	11,3	195	18	-	202	18,4	-
Uran	18,7	205	11	-	210	11,2	-
Normal-Beton	2,5	90	38	110-170	-	-	108-172
Schwer-Beton	3,4-4,3	90	21-26	110-170	-	-	115-201

(\*) A= Massenzahl

Die Ursache für die unterschiedlichen Abschwächungslängenwerte  $\lambda_{\text{att}}$  sind auf unterschiedliche experimentellen Messtechniken sowie auf die unterschiedlichen Interpretationen der Abschwächungslängen ( $\lambda_{\text{att}}$  ist in erster Näherung eine Materialkonstante) zurückzuführen. Wegen unterschiedlicher Teilchenspektren unterscheiden sich  $\lambda_{\text{att}}$ -Messungen entlang der Strahlachse eines Teilchenstrahls von Messungen außerhalb der Strahlachse.

Jedoch sind die exakt bestimmten Abschwächungslängen für die Abschirmungsberechnungen außerordentlich wichtig. Schon eine 10%-ige Unsicherheit in der Bestimmung des Materialabschwächungsfaktors führt zu einem Fehler von mehr als einer Größenordnung in der Teilchenfluss- und Dosisratenbestimmung am Ende der Abschirmung (siehe /Fil 92/).

Auch der sog. Aufbaufaktor B(E) kann nur ungenügend beschrieben werden, da keine genaue Beschreibung von Fluss und Dosisrate in der Quellnähe vorliegt. Deswegen kann mit solchen Abschirmungskonzepten nur die Dicke der Abschirmung bestimmt werden.

### 3.1.2 Berechnungsmethoden nach dem Prinzip der diskreten Ordinaten ( $S_N$ -Verfahren)

Der eindimensionale Transportmodell **ANISN** ist ein  $S_N$ -Berechnungsverfahren für Neutronen- und Photonenteilchentransport in Materie. ANISN löst die 1-dimensionale Form der Boltzmann-Gleichung in Platten-, Zylinder-, und Kugelgeometrie. Das numerische Verfahren ist im Gegensatz zum Monte-Carlo Verfahren (Vergl. Kap. 3.2) unabhängig von stochastischen Größen, deswegen eignet es sich besonders zum Einsatz bei sog. „Deep-Penetration“ (sehr lange bzw. tiefe Transportstrecken über viele freie Weglängen).

Zusätzlich benötigt ANISN zur Berechnung der Dosis bzw. des Teilchenflusses in der Abschirmung energieabhängige Wirkungsquerschnitte für die einzelnen Materialien. Diese Daten werden dem Programm in externen Datensätzen in Form von Datenbibliotheken zur Verfügung gestellt. Zwei Wirkungsquerschnitts-Bibliotheken HILO86-Library und LAHI-Library stehen dem ANISN-Programm zur Verfügung. Der Unterschied der beiden Datensätze liegt in der obersten Energiegrenze für Neutronen: HILO86:  $E_{\max} = 400 \text{ MeV}$ , LAHI:  $E_{\max} = 2,8 \text{ GeV}$ . Die unterste Grenze für Neutronen beträgt bei beiden Dateien  $0,41 \text{ eV} - 10^{-3} \text{ eV}$ .

Zu den weiteren Diskreten Ordinaten Transportprogrammen gehören der **DORT**- und **TORT-Code**. Beide Code verwenden die Methoden der diskreten Ordinaten mit einer Vielgruppenlösung der Boltzmann-Gleichung für Neutronen und Photonen. Der DORT-Code behandelt die ein- und zweidimensionalen Form der Boltzmann-Gleichung und TORT zwei und dreidimensionalen Form. Zusammen mit ANISN sind DORT und TORT die integralen Komponenten des modularen Code DOORS. In der Abb. 3.1.2-1 ist die Anwendung der Diskreten Ordinaten Methoden in der Kopplungsberechnungsmethoden zur Berechnung der Dosiswerten (siehe Kap. 3.3) dargestellt.

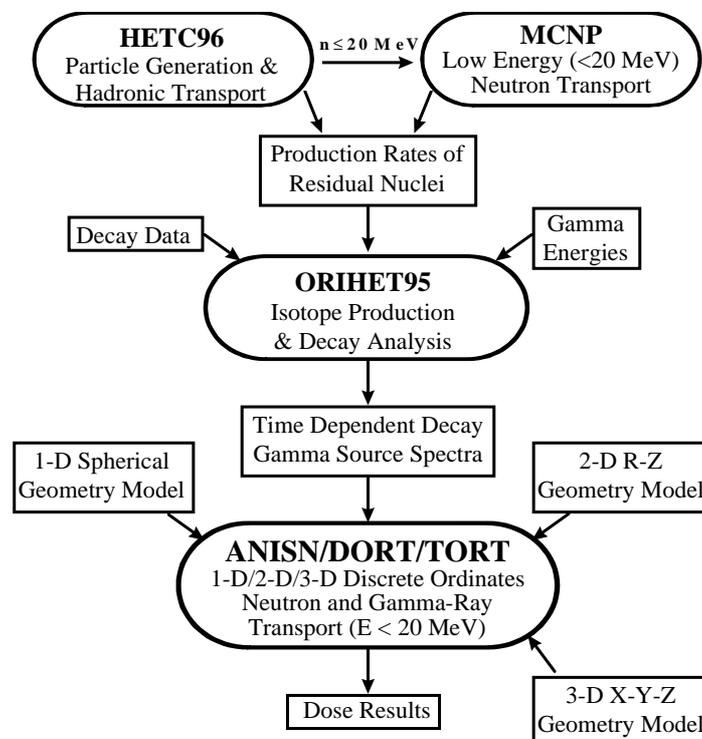


Abb. 3.1.2-1: Schematisches Diagramm für Kopplungsberechnungsmethoden HETC96 und ANISN/DORT/TORT zur Berechnung der Dosiswerten /Joh 00a/.

### 3.1.3 Semi-Empirische Berechnungsmethoden

#### Das Moyer-Modell

Anfang der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts entwickelte Moyer /Moy 61/ basierend auf Experimenten am Bevatron Protonenbeschleuniger (6GeV) des Lawrence-Radiation Laboratory eine semi-empirische Berechnungsmethode, die über die Berechnung des hochenergetischen Neutronenflusses die Bestimmung der Äquivalentdosisleistung an der Oberfläche der Abschirmung ermöglichte. Bei einer entsprechend dicken Abschirmung und einer Protonen-Punktquelle, die mit einem dünnen Target reagiert (Abb. 3.1.3-1), kann die Dosis an der Oberfläche der Abschirmung mit folgender Gleichung berechnet werden /IAE 88/.

$$H = \frac{1}{r^2} \cdot \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} F(E) \cdot B(E, \theta) \cdot e^{-\frac{d(\theta)}{\lambda(E)}} \cdot \frac{d^2 n(E, \theta)}{dE d\Omega} \cdot dE \quad [\text{GL. 3.1-1}]$$

mit

H = Dosis am Aufpunkt P [Sv/s]

F(E) = Dosiskonversionsfaktor [Sv\*cm<sup>2</sup>]

B(E,θ) = Aufbaufaktor („Buildup“-Faktor) [dimensionslos]

λ(E) = Abschwächungslänge [cm]

$\frac{d^2 n(E, \theta)}{dE d\Omega}$  = Neutronenertrag bei Richtungswinkel θ pro Einheit Energieintervall dE und Raumwinkel dΩ [n/s]

Der Aufbaufaktor B stellt einen tiefen- und energieabhängigen Korrekturfaktor dar. Er dient der Korrektur der anfänglichen geringen Überhöhung des Neutronenflusses in Quellnähe.

Die Abschwächungslänge λ ist einer der wichtigsten Parameter der Dosisleistungsgleichung. Sie definiert die Dicke eines Materials, bei deren Durchdringung der Neutronenfluss einer bestimmten Energie materialabhängig um den Faktor e<sup>-1</sup> geschwächt wird.

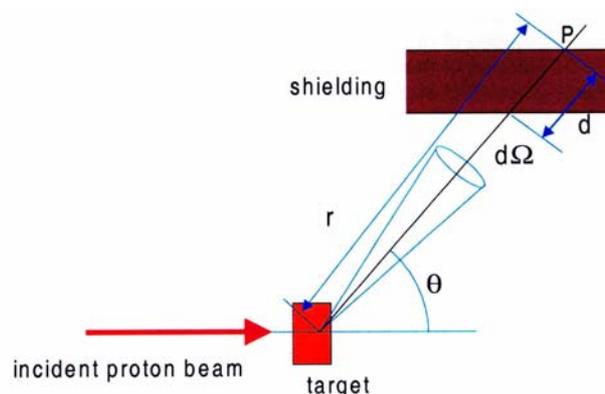


Abb.: 3.1.3-1: Schematische Darstellung der Abschirmungsgeometrie für das verallgemeinerte Moyer-Modell /IAE 88/

Die dargestellte Gleichung [GL. 3.1-1] wurde von Moyer durch verschiedene Annahmen vereinfacht:

- Die Schwächungslänge λ(E) für Neutronenenergien E > 150 MeV wird als konstant (nur materialabhängig) angenommen. Neutronen mit Energien E ≤ 150 MeV werden bei der Berechnung der Schwächung nicht berücksichtigt:

$$\lambda (E > 150 \text{ MeV}) = \lambda$$

$$\lambda (E \leq 150 \text{ MeV}) = 0$$

- Der Dosiskonversionsfaktor  $F(E)$  wird als Konstante gehandhabt. Dies berücksichtigt die Tatsache, dass die Dosis überwiegend durch die Neutronen der Energie  $E \leq 50 \text{ MeV}$  produziert wird.
- Der „Buildup“-Faktor  $B(E, \theta)$  wird als Konstante gehandhabt, die nur vom jeweiligen Targetmaterial und vorliegenden Protoneneinschussenergie abhängig ist.

Die Berücksichtigung der o.g. Annahmen in der [Gl. 3.1-1] führt zur Berechnung der Äquivalentdosis proportional zum Teilchenfluss beim Gleichgewicht der Kaskade und Protoneneinschussenergien über  $150 \text{ MeV}$  gemäß [Gl. 3.1-2]:

$$H = \frac{1}{r^2} \cdot F \cdot B \cdot e^{-\frac{d(\theta)}{\lambda}} \cdot \int_{E=150 \text{ MeV}}^{E_{\max}} \frac{d^2 n(E, \theta)}{dE d\Omega} \cdot dE \quad [\text{GL. 3.1-2}]$$

### Berechnungsverfahren CASL (Computer Aided Shield Layout)

T.W. Armstrong /Arm 83/ stellte 1983 eine CASL-Methode (Computer Aided Shield Layout) zur Dosisleistungs- und Flusskalkulation mit einer Schwächungsgleichung auf der Basis des Moyer-Modells vor.

Das CASL-Verfahren wurde entwickelt für die Berechnung von Dosisleistungs- und Flusswerten bei „Deep-Penetration“ Problemen. Ausgangspunkt der Berechnungen ist ein beschleunigter Protonenstrahl, der durch die Wechselwirkung mit dem Targetmaterial einen Neutronenfluss erzeugt. Dieser Neutronenfluss charakterisiert die Dosisleistungs- und Teilchenflussverteilung in der Abschirmung.

Für die Berechnung eines Strahlenschutz- bzw. Abschirmungsproblems mit CASL sind lediglich folgende Angaben erforderlich:

- die Geometrie und die Materialzusammensetzung der Abschirmung,
- die Energie, der Teilchenstrom und die Richtung des Protonenstrahls,
- die Materialbeschaffenheit am Quellpunkt (Target) und
- die Aufpunktkoordinaten der zur berechnenden Äquivalentdosisleistungen und der Neutronenflüsse /Wol 96/

In der Abb. 3.1.3-1 ist das Schema des CASL- Verfahrens dargestellt.

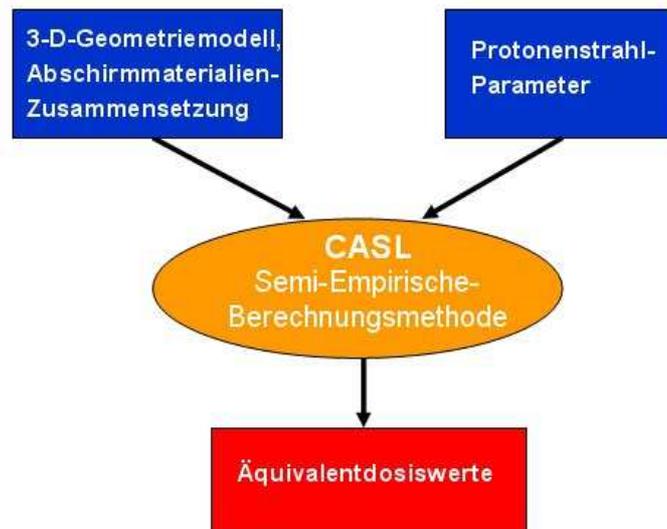


Abb. 3.1.3-1: Schematischer Aufbau des CASL-Berechnungsflussdiagramms

Diese Dosiskalkulation wurde u.a. für die ersten Abschirmungsberechnungen der Spallationsquellenprojekte ESS /Sch 96/ und SNS /Joh 00/ angewendet. Sie basiert auf der oben beschriebenen Erkenntnis, dass die inelastischen Stoßvorgänge der hochenergetischen Neutronen in einer Kaskade ein Sekundärneutronen- und -teilchenspektrum und Gammaquanten niedriger Energie produzieren. Dieses Neutronenspektrum bildet in jedem Punkt des gleichbleibenden Abschirmmaterials in etwa ein Gleichgewichtsspektrum, was die Dosis in dem Punkt determiniert. /Fil 00/. Das Schwächungsverhalten beim Transport von der Quelle zum jeweiligen Punkt wird charakterisiert durch den Verlauf des hochenergetischen Neutronenflusses gemäß folgender Formel:

$$\dot{D}(\vec{r}) = \frac{\tilde{D}(T) \cdot \dot{S}_n(\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_0; E_0, A_t) \cdot B(E_0, d) \cdot \exp(-d / \lambda(E_0, d))}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} \quad [\text{GL. 3.1-3}]$$

mit

- $\dot{D}(\vec{r})$  = Äquivalentdosis [ $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ] am Aufpunkt  $\vec{r}$  in der Abschirmung
- $\tilde{D}(T)$  = Dosisfaktor [ $\text{Sv} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{n}^{-1}$ ], berücksichtigt den Anteil der Neutronen unter 100 MeV, der zur gesamten Dosis beiträgt.
- $\dot{S}_n(\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_0; E_0, A_t)$  = winkelabhängige Produktionsrate hochenergetischer Neutronen in Abhängigkeit von Protoneneinschussenergie  $E_0$  und der Strahlrichtung  $\vec{\Omega}_0$  sowie der Richtung des Aufpunktes  $\vec{\Omega}$  und der Massenzahl  $A_t$  des Targets
- $B(E_0, d)$  = Buildup-Faktor in Abhängigkeit von der Protonenenergie  $E_0$  und der durchdrungenen Abschirmungstiefe  $d$  [dimensionslos].
- $\lambda(E_0, d)$  = Schwächungslänge [cm] für hochenergetische Neutronen in Abhängigkeit von der Protonenenergie und der durchdrungenen Abschirmungstiefe  $d$ .

Diese semi-empirische Berechnungsmethode des CASL verwendet die Daten von Monte-Carlo HETC- Berechnungen und eindimensionalen ANISN- Neutronentransportrechnungen. Die Daten für die winkelabhängige Produktionsrate hochenergetischer Neutronen liefert das

Programm HETC. Die notwendigen Schwächungsparameter ( $\lambda$ , B,  $\tilde{D}(T)$ ) werden aus den Neutronenflussverteilungen (ANISN) berechnet. Allerdings werden die Programme ANISN und HETC nicht gekoppelt bzw. die Daten vom einen Programm in das andere transferiert, sondern es werden mit beiden Programmen Daten errechnet, die in dem gemeinsamen Simulationsverfahren CASL weiter verarbeitet werden.

Für das CASL-Verfahren wird ein Algorithmus gewählt, der sich zwar an der Dosisgleichung nach Moyer orientiert, da für die Berechnungen der Schwächung auch im CASL nur die hochenergetischen Neutronenflüsse ( $E \geq 100$  MeV) berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu Moyers Annahmen werden die wichtigsten Parameter jedoch nicht als Konstante angesehen, sondern als energie-, material-, und tiefenabhängige Parameter intervallweise berechnet, um die unterschiedlichen Energiespektren zu berücksichtigen. Dies setzt voraus, dass die Neutronenflüsse über den für den hochenergetischen Fluss relevanten Energiebereich (100 MeV bis 2,8 GeV) und für alle Materialien tiefenabhängig zur Verfügung stehen. Die intervallweise Zuordnung der Abschirmungsparameter entspricht einer Kurvenschar, die im Gegensatz zu Moyer nicht das Schwächungsverhalten über der gesamten Abschirmungstiefe als konstant ansieht, sondern für jedes Intervall eine Schwächungsfunktion definiert, mit der für das jeweilige Intervall konstanten Schwächungslänge  $\lambda$  und dem entsprechenden „Buildup“-Faktor B /Wol 96/. Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Moyer und CASL-Berechnungsmethoden sind in der Tab. 3.1.3-1 dargestellt.

Tab. 3.1.3-1: Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Moyer und CASL-Berechnungsmethoden

Parameter	Moyer-Modell	CASL-Verfahren
Abschwächungslänge $\lambda$	konstant (nur materialabhängig) $\lambda (E > 150 \text{ MeV}) = \lambda$ $\lambda (E \leq 150 \text{ MeV}) = 0$	material- und energieabhängig, berechnet intervallweise für jedes Abschirmungsmaterial und jeden Energiebereich. Die Neutronenflussverteilungen werden mittels ANISN berechnet
Dosisfaktor	konstant	energie- material- und tiefenabhängig berechnet intervallweise für jedes Abschirmungsmaterial. Die Neutronenflussverteilungen werden mittels ANISN berechnet
„Buildup“-Faktor B	konstant	energie- material- und tiefenabhängig berechnet intervallweise für jedes Abschirmungsmaterial. Die Neutronenflussverteilungen werden mittels ANISN berechnet
Winkelabhängige Neutronenproduktionsrate	Moyer-Integrale	Daten aus HETC-Rechnungen

Beim Einsatz der semi-empirischen Methoden (Moyer und CASL) muss berücksichtigt werden, dass sie für Deep-Penetration Anwendungen ausgelegt sind. Sie können nicht im Nahbereich der Quelle eingesetzt werden, da sie die Schwächung nur in Abhängigkeit von der durchdrungenen Abschirmung und direkt in Aufpunktichtung berechnen und dabei nicht beachten, welche Beiträge die Umgebung auf dieser Schwächungsstrecke liefert.

## 3.2 Stochastische Berechnungsmethoden

Naturgemäß ist der Teilchentransport durch eine Abschirmung ein Zufallsprozess. Bei diesem Teilchentransport muss die Wechselwirkung von verschiedenen Teilchen (Neutronen, Photonen, Elektronen, Positronen, Pionen und Myonen) betrachtet werden. Auch die unterschiedlichen Energiebereiche führen zu unterschiedlichen physikalischen Prozessen, z.B. bei der Spallation: Intranukleare Kaskade (INC) und Verdampfung (Evaporation), die auch bei den Transportrechnungen betrachtet werden. In solchen Situationen müssen die differentiellen materialabhängigen Wirkungsquerschnitte bekannt sein. Die Wirkungsquerschnitte sind Werte für eine Wahrscheinlichkeit, dass ein Primärteilchen der bestimmten Energie einen Kern trifft und dabei ein Sekundärteilchen anderer Energie und unter bestimmten Winkel emittiert wird.

Die stochastischen Prozesse bei Teilchentransportproblemen werden durch sog. Monte Carlo Transportmodelle behandelt. Diese Methode löst die Boltzmann-Gleichung, in dem sie eine endliche Anzahl von Teilchen in Abhängigkeit von verschiedenen Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten errechnet. Der Berechnungsalgorithmus wird wie folgt beschrieben: Zuerst wird das Teilchen aus einer physikalischen Zufallsverteilung durch Stichproben gewählt. Dann wird für das Teilchen eine mittlere freie Weglänge zum Wechselwirkungspunkt errechnet. Wenn diese Weglänge innerhalb der Geometrie liegt und keine Materialänderung vorliegt, wird das Teilchen zur neuen Position transportiert und das erzeugte Sekundärteilchen gespeichert und weiter verfolgt. Bei wechselnder Materialzusammensetzung innerhalb der Geometrie wird das Teilchen bis zur entsprechenden Trenngrenze, die beide Materialien in der Geometrie trennt, transportiert. Danach wird für das Teilchen eine neue mittlere freie Weglänge (entsprechend dem anderen Material) zugeordnet etc. Wenn die freie Weglänge außerhalb der Geometrie liegt, wird das Teilchen bis zur Geometriegrenze transportiert und verlässt das System durch Leckage. Dieser Ablauf wird für die Primär und Sekundärteilchen solange wiederholt, bis die Teilchen absorbiert oder zur Geometriegrenze transportiert wurden. Das Schicksal dieser Teilchen ist dann vollständig. Danach wird ein neues Teilchen analysiert. Am Ende kann eine Aussage getroffen werden mit der entsprechenden statistische Genauigkeit über:

- die Anzahl der absorbierten Teilchen im System
- die Anzahl der Teilchen, die eine bestimmte Materialgrenze passierten
- die Anzahl der Teilchen, die die Geometriegrenze erreicht haben und als Leckageteilchen das System verlassen haben.

Mit diesen Methoden können die Teilchenflüsse in sehr komplexen 3-D Geometrien bestimmt werden. Diese wiederum können weiter zur Berechnung von Äquivalenzdosis, Aktivierung, Wärmedeposition genutzt werden.

Die Monte-Carlo-Berechnungsmethoden sind in den folgenden Kapiteln kurz beschrieben. In der Tab. 3.2-1 sind die deterministischen- und stochastischen Berechnungsmethoden verglichen und die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden aufgelistet.

Tab. 3.2-1: Die wichtigsten Unterschiede zwischen den deterministischen und stochastischen Berechnungsmethoden

	Deterministische Berechnungsmethoden	Stochastische Berechnungsmethoden
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deterministische numerische Lösung der Transportgleichung</li> <li>- Die Rechnungen sind sehr effizient für Deep-Penetration (dicke Abschirmung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3-dimensionale Berechnung des Teilchentransportes</li> <li>- Geladene Teilchen und Photonen werden transportiert</li> <li>- Eine realistische 3-D Geometrie mit Spalten, Kanälen etc. kann zum benötigten Detailgrad modelliert werden</li> <li>- Es können die Energiedeposition, Materialschädigung sowie Aktivierung berechnet werden</li> <li>- Es werden keine Hochenergiequerschnitte benötigt</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Rechnungen sind nur für Neutralteilchen zu verwenden</li> <li>- Für die Rechnungen müssen Hochenergiequerschnitte verfügbar sein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufwändige und langwierige Transportrechnungen in komplexen dicken Abschirmungen</li> <li>- Stochastische Teilchentransportrechnungen sind für die Deep Penetration rechenzeitaufwändig</li> </ul>

### 3.2.1 Die HETC-basierten Systeme

Das **HETC-Programm** (High Energy Transport Code) wurde schon Anfang der 70-er Jahre durch Armstrong /Arm 72/ entwickelt. Das Modell wurde mehrmals modifiziert (siehe HETC-KFA-2 /Clo 84/) und kann in seinen Versionen den Teilchentransport von Energien bis zu 20 TeV verfolgen. Das HETC-Programm ist ein extrem flexibler Berechnungscode für die Behandlung hochenergetischer Stoßprozesse und des Transportes von n, p, d, t,  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\mu^\pm$ , Ionen ( $A \leq 10$ ) und Schwere Ionen ( $A < 20$ ) bestens geeignet. Wie schon in früheren Kapiteln erwähnt, können die hochenergetischen Stoßprozesse in zwei folgenden Stufen gegliedert sein: Intranukleare Kaskade (INC) und Verdampfung (Evaporation). Die Behandlung des INC-Prozesses im HETC geht auf das Modell von Bertini /Ber 63//Ber 69/ zurück. Der Verdampfungsprozess wird mit dem Modell von Dresner /Dre 62/ simuliert. Das HETC - Programm beansprucht jedoch sehr große Rechnerkapazitäten und damit auch sehr lange CPU-Nutzung.

Das **MCNP – System** (Monte-Carlo N-particle) ist ein Mehrzweck Monte Carlo Code, der für die Beschreibung des Niedrigenergieneutronen-, Photonen-, Elektronen- oder gekoppelten Neutronen/Photonen/Elektronentransports angewendet werden kann. Dieser Code behandelt beliebige drei-dimensionale Materialkonfiguration in geometrischen Regionen, begrenzt mit Oberflächen ersten- und zweiten Grades. Das MCNP – System ist in LANL (Los Alamos National Laboratory, USA) entwickelt worden /Bri 86/. Die energetischen Grenzen für die Gültigkeit des Modells liegen für die Neutronen zwischen  $10^{-11}$  MeV und 150 MeV und für die Photonen und Elektronen zwischen 1 keV und 1 GeV. Die Wechselwirkungsquerschnitte für alle Neutronenreaktionen sind in den Standardbibliotheken für MCNP wie z.B. ENDF/B-VI zusammengestellt. Wirkungsquerschnitte für thermische Neutronen werden in Form von Gas- und Teilchenstreuungsmodellen beschrieben. Die Photonen werden in MCNP in Form von verschiedenen physikalischen Modellen betrachtet (kohärente und inkohärente Streuung, Photoionisation etc.).

Der **LAHET-Code** ist die Modifizierte Version des Codes HETC, entwickelt durch Prael und Lichtenstein im LANL (Los Alamos National Laboratory) /Pra 89/. Diese Variante ermöglicht die Berechnung des Transports von Neutronen, Photonen, Wasserstoff- und Heliumionen von 1 MeV bis zu 4 GeV. LAHET nutzt genau so wie HETC das Bertini/Ber 69/ oder das ISABEL Modell /Yar 79/ für die Beschreibung der INC-Prozesse und das Dresdner-Modell/Dre 62/ für die Beschreibung der letzten Phase der Verdampfung (siehe auch /Nün 01/).

In einer typischen LAHET-Simulation werden die Daten in zwei separate Dateien geschrieben. Der Niedrigenergietransport der Neutronen und Photonen wird in einer Datei gespeichert, die weiter als Quelle für MCNP dient. Die von LAHET erzeugten Transportdaten der hochenergetischen Neutronen sowie Protonen, Pionen und Myonen werden in einer Datei sog. History File geschrieben. Dieser „History File“ kann weiter für die Analyse von Hochenergieneutronenflüssen, Protonenflüssen und der Produktion von Nukliden in einem Analyseprogramm HTAPE genutzt werden. Die Photonen- und Niedrigenergieneutronentransportdaten können in eine zusammengefügte Datei geschrieben und an MCNP übergeben werden.

Das **MCNPX – System** (Monte Carlo N Particle eXtended) ist eine Erweiterung des MCNP-Codes. Dieses System verbindet den LAHET-Code für hochenergetischer Teilchentransport und MCNP. MCNPX ist ein auf Fortran 90 (F90) basierter Monte Carlo Teilchentransportcode, der den Transport von 34 unterschiedlichen Teilchen bis zu Energie von 1 TeV verfolgt. Das Programm nutzt neue Wirkungsquerschnittsbibliotheken, z.B. für Neutronen MCNP4B bis 150 MeV. Die physikalischen Modelle LAHET Code System (LCS) und CEM (Cascade Exciton Model) stehen für die Beschreibung der Intra-Nuclearen-Kaskade (INC) zur Verfügung.

Das MCNPX-Programm gewinnt immer mehr an Bedeutung bei der Auslegung von Abschirmungen. In den folgenden Abbildungen ist die Anwendung des MCNPX-Programms in der Abschirmungs-, Aktivierungs- und Zerfallwärmeleistungsanalyse bei der Abschirmungsauslegung der Spallationsquelle SNS (USA) dargestellt.

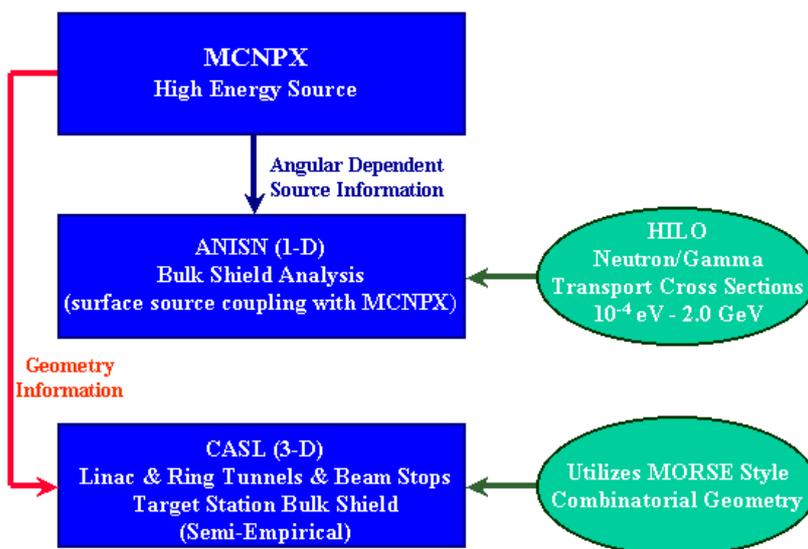


Abb. 3.2.1-1: Flussdiagramm für die Abschirmungsanalyse bei der SNS-Abschirmungsauslegung/Joh 00/

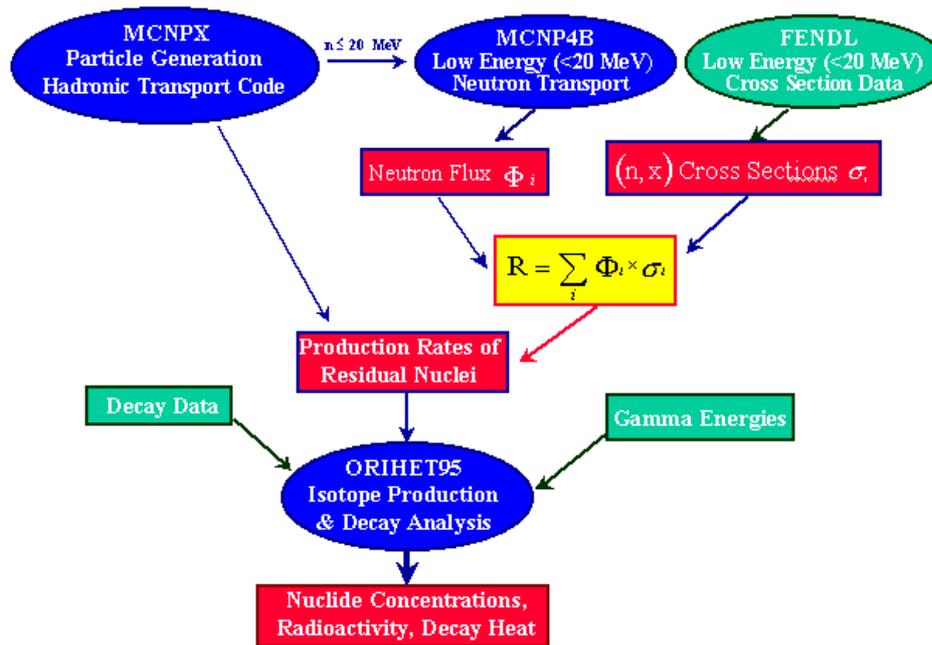


Abb. 3.2.1-2: Flussdiagramm für die Aktivierungs- und Zerfallwärmeleistungsanalyse  
/Joh 00/

Eines der leistungsfähigsten Simulationsprogramme für die Berechnung des Teilchentransports in der Materie ist das **HERMES** - System. Das System HERMES (High-Energy-Monte-Carlo-Elaborate-System) integriert mehrere Monte-Carlo-Transport-Programme zur Simulation des Strahlungsdurchgangs durch Materie. Das System ist so aufgebaut, dass in einer einheitlichen Datenstruktur mehrere Programme auf das gleiche Problem angewendet werden können. Der Datentransfer zwischen den Programmen erfolgt über ein Interface, die sog. Submission Files. In diesem Interface werden die Informationen über die Teilchen (Teilchenart, Ort, Richtung, Energie), die in einem Programm nicht behandelt werden können, gesammelt (z. B. auch die Restkerne, die im Programmmodul HETC produziert werden). Die besondere Struktur der gespeicherten Datensätze ermöglicht es den anderen HERMES-Programmen, den Submission File zu lesen und weiter zu behandeln.

Jedes der Programme simuliert Teilchentransport anhand eines bestimmten physikalischen Modells.

- So werden die hochenergetischen Stoßprozesse (vor allem INC oder Evaporation) sowie der Transport von: n, p, d, t,  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\mu^\pm$ , Ionen ( $A \leq 10$ ) und Schwere Ionen ( $A < 20$ ) im HETC Modul behandelt.
- Die energetischen Grenzen für die Gültigkeit des Modells liegen bei 3,5 GeV. Die niederenergetischen Neutronen und  $\gamma$ -Quanten werden in MORSE (Multigroup Oak Ridge Stochastic Experiment) weiterverfolgt.
- Weiterhin wird der  $\pi^0$  - Zerfall als Quellverteilung sowie die elektromagnetischen Schauer im Energiebereich von keV bis TeV in EGS4 (Electron Gamma Shower) behandelt.
- NDEM (Nucleus Deexcitation Module) berechnet den Übergang der angeregten Restkerne in den Grundzustand, die auf diese Weise entstandenen  $\gamma$ -Quanten können auf einen Submission File abgelegt und mit MORSE oder EGS4 weiterverarbeitet werden.
- Zuletzt wird die Interpretation und Analyse der simulierten Daten durch STATIST unterstützt.

Die Technik der Submissionfiles erlaubt eine zusammenhängende Behandlung und Ausgabe korrelierter Rechnungen. Durch diese Struktur ist das System für zukünftige Erweiterungen ausgelegt.

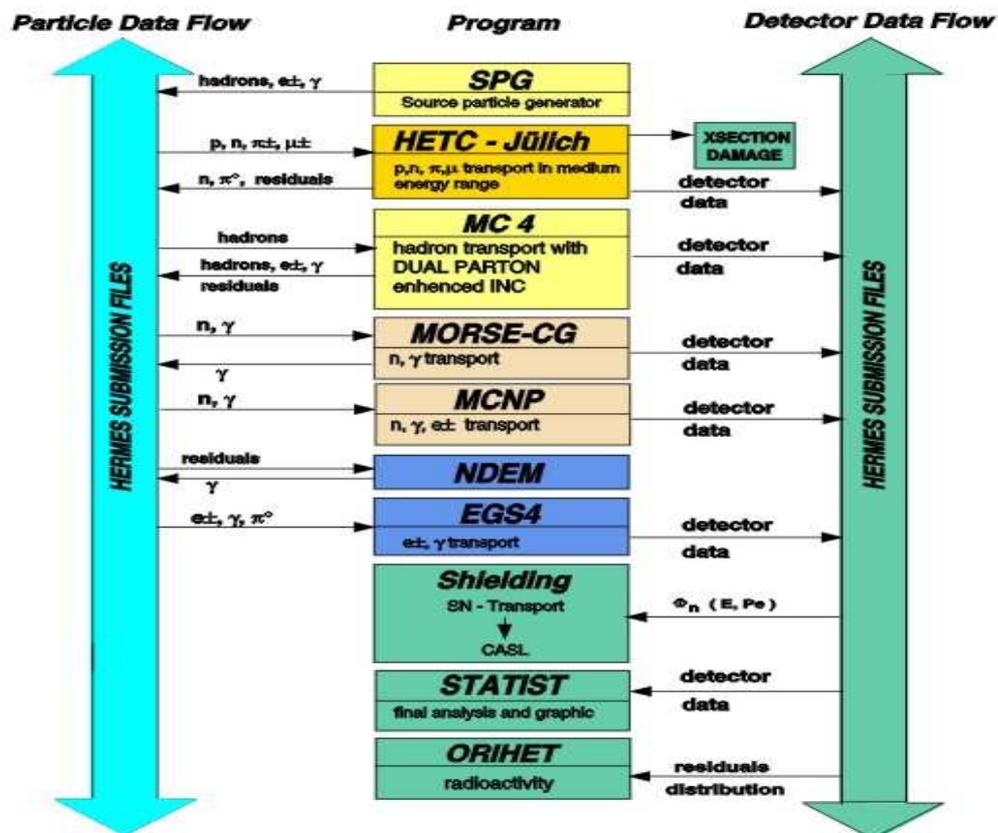


Abb.3.2.1-3: Flussdiagramm des Hermes-Systems /Gol 04/

Zur Simulation der hadronischen und elektromagnetischen Kaskaden, kosmischen Myonen, sowie thermischer Neutronen kann auch das sog. FLUKA-System verwendet werden. Das FLUKA-System ist ein vielfältiges „multi-particle“ Monte-Carlo-Programm, das eine breite Auswahl von Strahlungstransportproblemen behandelt. Dieser Code wurde durch A. Fasso und A. Ferrari /Fas 93/ weiterentwickelt. Die energetischen Grenzen für die Gültigkeit des Modells reichen von einigen keV (für thermische Neutronen) bis zu einigen TeV.

### 3.3 Kopplungsberechnungsmethoden

Die Monte Carlo Methoden erlauben ein aufwendiges Design der zu berechneten Geometrie in dreidimensionaler Form. Jedoch bei sehr dicken Abschirmungen über viele freie Weglängen (Dicken im Eisen über 3 bis 4 m) stoßen die MC-Methoden auf Grenzen, die mit der Natur der ablaufenden Prozesse zusammenhängen. Der Umfang der Rechnung wird so groß, dass die statistischen Fehler immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Vielzahl der Simulationsdaten benötigt für die Problemlösungen immer größere Rechnerleistung und wird sehr zeitaufwendig.

In deterministischen Verfahren kann die Schwächung des Teilchenflusses über viele freie Wegelängen berechnet werden. Das Verfahren ist aber auf den Transport von Neutralteilchen eingeschränkt.

Um die Vorteile beider Berechnungsmethoden zu kombinieren, entstand die Idee, die beiden Verfahren zu koppeln. Damit wird es möglich den Teilchenfluss durch komplizierte dicke Abschirmungen zu simulieren.

Auf diese Weise wird in der Abschirmung eine interne Grenze definiert, wo die Neutronen dominieren. An dieser Stelle wird eine Kopplungsoberfläche definiert. Das Monte Carlo Programm liefert bis zu dieser Kopplungsoberfläche den winkel- und energieabhängigen Neutronen- und Photonenfluss, der in einem deterministischen Programm als Oberflächen-Neutronenquelle weiterverarbeitet wird. In den  $S_N$ -Transportrechnungen mit ANISN, DORT oder TORT werden die Neutronen und sekundär erzeugten Photonen als die dominanten Teilchen behandelt. Deswegen werden in erster Linie diese Programme in den Kopplungsmethoden angewendet. Somit wird die Targetregion mit vielen Teilchenarten bis zu Kopplungsoberfläche exakt mit MC-Programmen behandelt (z.B. HETC oder MCNPX). Danach wird die winkel- und energieabhängige Neutronenquelle an ein deterministisches Programm übergeben. Es ist möglich, dass es an der Kopplungsfläche zu einer Überlappung der Rechenmethoden kommt. An der Stelle können beide Rechenmethoden verglichen werden.

Die Ref. /Mol 91/, /Fil 92/ und /Sta 94/ beschreiben ausführlich diese Kopplungsrechnungsmethoden und geben einen Einblick in die berechneten Ergebnisse. Ein schematisches Flussdiagramm für die Anwendung der Kopplungsmethoden ist in der Abb. 3.3-1 gezeigt.

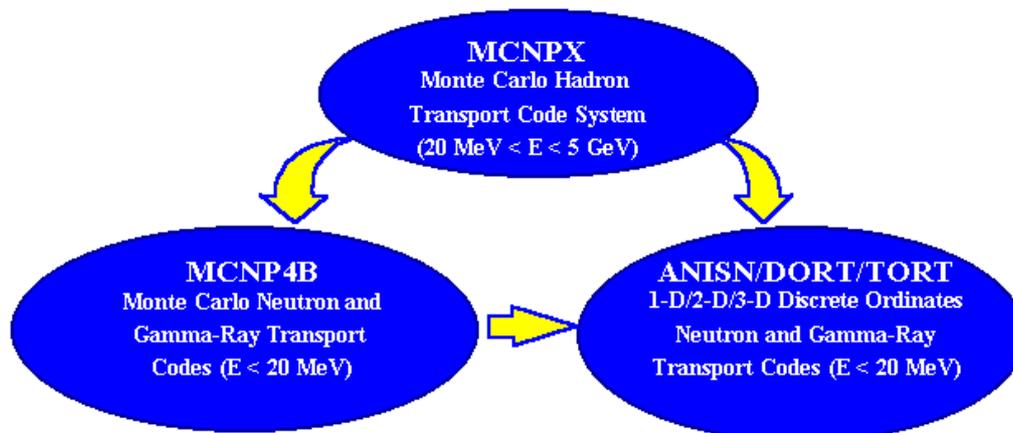


Abb. 3.3-1: Flussdiagramm für die Abschirmungsanalyse mittels Kopplung von: Monte Carlo- und deterministischen Diskreten-Ordinaten Methoden /Joh 00/

### 3.4 Abschirmungsexperimente zur Validierung von Berechnungsverfahren

Die ständige Entwicklung und der Fortschritt in der Computertechnologie verkürzt wesentlich die Rechenzeit. Allerdings bleiben realistische Neutronentransport- Berechnungen durch eine dicke Abschirmung weiter sehr kompliziert, schwierig und immer noch langwierig. Die Anwendung der hochentwickelten Berechnungstechniken und gleichzeitig lange Rechenzeiten sind notwendig, um Teilchenflüsse und Teilchenenergiespektren mit guter Statistik zu simulieren. Umso wichtiger ist die Validierung der Rechenwerte mit den aus den Experimenten gewonnenen Daten. Es wurden jedoch nur sehr wenige entsprechende Experimente durchge-

führt. In diesem Kapitel werden Experimente an der Spallationsquelle WNR in Lansce USA und ISIS in England analysiert. Im Anschluss werden die experimentellen Daten aus dem SATURNE Abschirmungsexperiment in Saclay /Bou 96/ mit den verschiedenen Berechnungsmethoden validiert.

### I. Abschirmungsexperiment an der Spallationsquelle WNR Los Alamos USA

An der bestehenden Hochenergieabschirmung der Spallationsquelle WNR in Los Alamos USA /Ami 86a/ wurden 1985 mehrere Abschirmungsexperimente zur Validierung von Monte Carlo Abschirmverfahren und zur Messung der Abschwächungslängen für Hochenergieutronen durchgeführt. Die wichtigsten technisch-physikalischen Parameter der WNR Spallationsquelle sind in der Tab. 3.4-1 zusammengestellt.

Tab. 3.4-1: *Technisch-physikalische Parameter der WNR Spallationsquelle für die Experimente 1985*

Protonenenergie	800 MeV
Mittlerer Strahlstrom	4 $\mu$ A
Mittlere Strahlleistung	3,2 kW
Pulsfrequenz	120 Hz
Target	Wolfram
Moderator	Wasser
Reflektor	Beryllium

Für die experimentellen Messungen wurden sog. Multireaktion- Spallationsdetektoren und Schwellenwertsonden verwendet. Die Spallationsreaktionen an verschiedenen Materialien u. a. an Kupfer wurden durch Routti /Rut 69/ untersucht und als sog. Schwellenwertsonden-Technik für hochenergetische Neutronen angewendet. Die Untersuchungen ergaben, dass der Wechselwirkungsquerschnitt für viele Spallationsprodukte eine typische Energieschwelle hat, (mit Energien von einigen bis zu hunderter MeV), bei der eine Wechselwirkungsreaktion stattfindet (siehe Abb. 11-6 im Anhang). Dadurch können mit einer Messung einige Neutronenaktivierungs-Produkte mit unterschiedlichen Schwellenenergien detektiert werden.

Die Neutronen für das Experiment wurden in einem Wolframtarget durch Beschuss mit 800 MeV Protonen erzeugt. In der Abb. 3.4-1 ist der schematische Aufbau des Experimentes dargestellt. Der Protonenstrahl fällt senkrecht zur Zeichenebene auf das Target. Im Strahlrohr FP5 wurde der sog. Einschub mit Foliendetektoren positioniert. Es wurden Folien aus: Aluminium, Kupfer, Eisen Indium, Kobalt, Zirkon, Niob und Nickel in den Einschub eingebaut. Die Messdetektoren wurden in der Eisenabschirmung in 90° zur einfallenden Protonenstrahlrichtung eingebaut. Am Ende des Einschubs wurde ein  $^3\text{He}$ -Monitor in einem Polyethylenzylinder positioniert. Dieser  $^3\text{He}$ -Monitor registrierte während der Bestrahlung die vom Target ausgehende Neutronenflussintensität (Abb. 3.4-2)(siehe /Ami 86/).

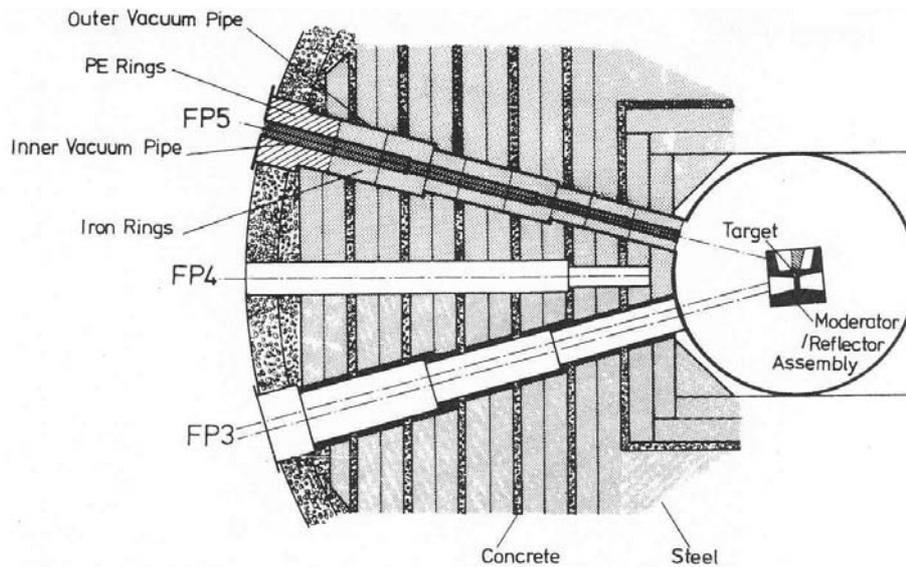


Abb. 3.4-1: Schematischer Aufbau des WNR-Target/Abschirmungssystems. Der Einschub wurde im Rohr FP5 positioniert /Ami 86/.

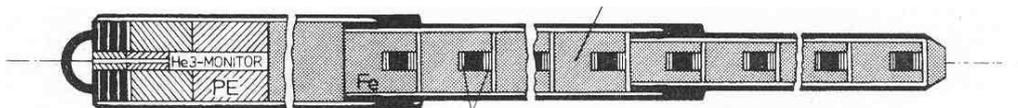


Abb. 3.4-2: Einschubdesign FP5 für die Experimente an WNR (LANSCE). Die Folien sind von massiven Eisenringen umgeben. Am Ende des Einschubs wurde ein  $^3\text{He}$ -Monitor in den PE-Ringen eingebaut /Ami 86/.

Die Messungen wurden insgesamt bis zu einer Abschirmtiefe von ca. 200 cm durchgeführt. Die Schwellwertreaktionen an Al, Cu, Co und Ni hatten Energieschwellen zwischen 1 MeV bis 400 MeV. In der Abb. 3.4-3 ist die gemessene Tiefenabhängigkeit der Reaktionen Cu-nat(n,x) zur Produktion von  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{52}\text{Mn}$  und  $^{48}\text{V}$  abgebildet.

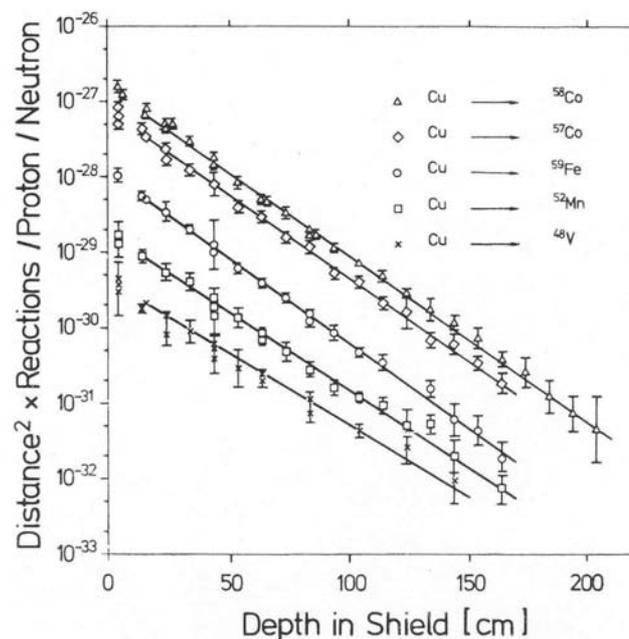


Abb. 3.4-3: Tiefenabhängigkeit der Reaktionen von Kupfer Cu-nat /Ami 86/.

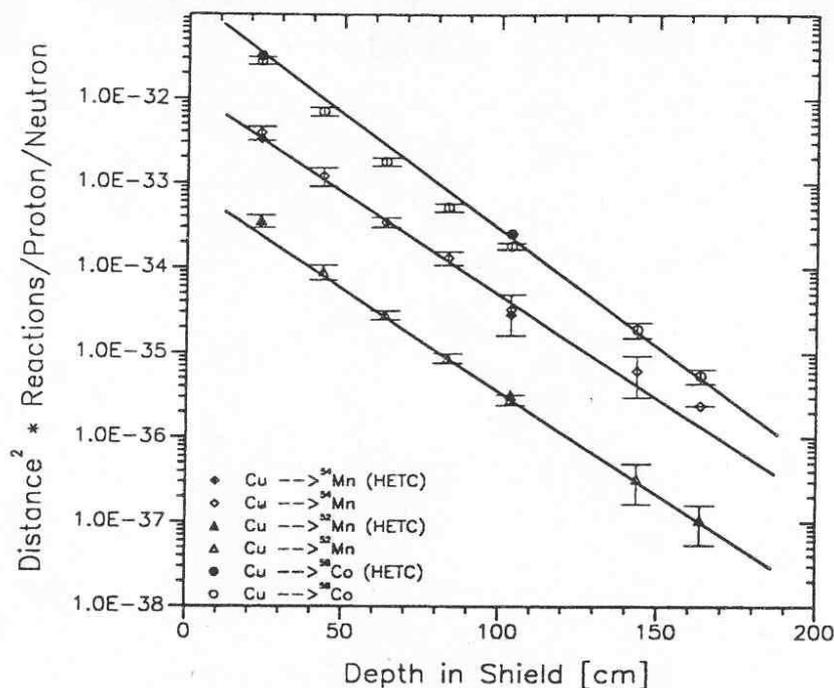


Abb. 3.4-4: Tiefenabhängigkeit der Reaktionen von Kupfer Cu-nat im Vergleich mit MC Simulation (HETC) /Fil 92/.

Für die theoretische Simulation wurde eine Monte Carlo Simulation HETC und gekoppelte Methode HETC-ANISN angewendet. Wegen der aufwändigen Geometrie wurde die Simulation nur für die Abstände 23 cm, 103 cm und 203 cm zum Target durchgeführt. Die so berechneten Neutronenflüsse wurden mit den Produktionswirkungsquerschnitte von  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{52}\text{Mn}$  und  $^{54}\text{Mn}$  in Cu-nat gefaltet /Ami 86/. Daraus wurden die entsprechenden Reaktionsraten erhalten. Es ergab sich gute Übereinstimmung (10-30 %) der gemessenen Ergebnisse mit der Monte Carlo Simulation (Abb. 3.4-4). Weiterhin wurden für die gemessenen und in /Ami 86/ berechneten Reaktionen spektral gewichtete Abschwächungslängen  $\lambda_{\text{att}}$  für Eisen bestimmt. Die dabei resultierende Abschwächungslänge für Eisen von  $19,6 \pm 1,2 \text{ cm}$  oder  $153 \pm 9 \text{ g/cm}^2$  wurde auch in den MC Simulationen HETC bestätigt. Die Unterschiede zwischen den kalkulierten und experimentellen Reaktionsrate-Werten resultieren in erster Linie aus der Bestimmung der Wirkungsquerschnitte für die Energien über 20 MeV.

## II. Abschirmungsexperiment an der Spallationsquelle ISIS in RAL England

In 1998 wurde an der Spallationsquelle ISIS in England ein Abschirmungsexperiment zur Validierung der berechneten und experimentellen Abschirmungsdaten durchgeführt /Nak 03a/. In diesem Experiment wurde zusätzliche Stahl- und Betonabschirmung unterschiedlicher Dicke im Zentrum auf der Targetabschirmoberfläche zur Messung der Neutronspektren und Abschwächungslängen aufgestellt und mit berechneten Spektren verglichen. Die Spallationsquelle ISIS ist eine gepulste Neutronenquelle, wo der Protonenstrahl mit einer Energie von 800 MeV, mittlerem Strahlstrom von  $170 \mu\text{A}$  und einer Pulsfrequenz von 50 Hz auf ein Tantaltarget geschossen wird. Das Tantaltarget besteht aus in Abstand von 1,75 mm zusammengesetzten Scheiben (Durchmesser 90 mm), deren Dicken zwischen 8,2 bis 26,7 mm betragen. Das Tantaltarget wird durch Kühlwasser ( $\text{D}_2\text{O}$ ) gekühlt. Es ist im Zentrum eines Edelstahlbehälters platziert. Schwerwassermoderatoren und Berylliumreflektor sind rund um das Target angebracht. Senkrecht zum Protonenstrahl ist das Target mit einem Stopfen von

284 cm dickem Stahl ( $7,85 \text{ g/cm}^3$ ), und 97 cm dickem Normalbeton ( $2,3 \text{ g/cm}^3$ ) abgeschirmt (Abb. 3.4-5).

Um den Einfluss der Leckageneutronen auf die Messungen auszuschließen wurde für das Experiment eine Stahlburg (120 cm Innendurchmesser, 60 cm Dicke und 196 cm Höhe) auf der Targetabschirmungsoberfläche im Zentrum direkt über dem Target aufgebaut. In diese Stahlburg wurden je Betonabschirmelemente von 60 cm Dicke und Stahlabschirmelemente von 30 cm Dicke eingeführt. Auf der Oberfläche dieser Zusatzabschirmung wurden fünf Graphitaktivierungsdetektoren positioniert. Die Neutronenabschwächungslänge wurde aus den Profilen von  $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$  Reaktionsraten für Neutronenenergien oberhalb 20 MeV ermittelt. In der Abb. 3.4-5 ist die Detektorenanordnung dargestellt.

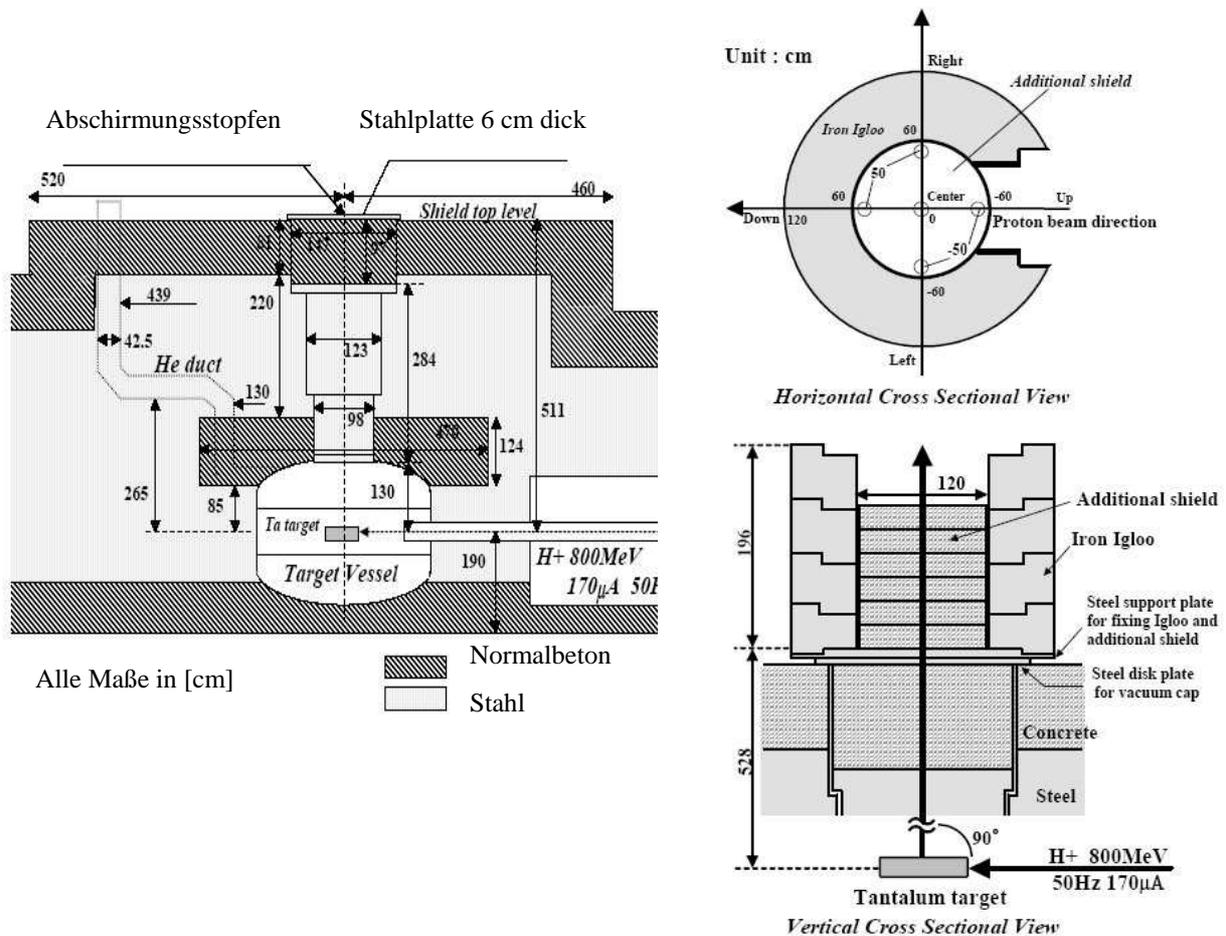


Abb. 3.4-5: Querschnitt durch die ISIS-Targetstation (links und rechts unten). Abschirmungsaufbau für das Experiment und Anordnung der Detektoren (rechts oben) /Nak 03a/

In den Monte Carlo Berechnungen müssen zur Bestimmung der sicherheitstechnischen Parameter die Teilchenflüsse in den untersuchten Systemen bestimmt werden. Anschließend können die Teilchenflüsse mit entsprechenden Reaktionsquerschnitten zur Berechnung von Äquivalenzdosis, Aktivierung, Wärmedeposition oder Materialschädigung gefaltet werden. Die meisten Monte Carlo Methoden verwenden sog. Detektor-Methoden zur Teilchenflussberechnung, weil sie analog wie beim Experiment mit Detektoren die Flussmessung bestimmen. Im ISIS- Experiment wurde für die Berechnung der Neutronenflüsse durch die dicke Abschirmung der 3-dimensionale MARS 14 Monte Carlo Modell /Mok 95/ verwendet. Die Geometrie wurde auf mehrere Bereiche aufgeteilt. Der Neutronenfluss vom Bereich „a“ wurde in

der Kalkulation gleichzeitig als Neutronenquelle für den Bereich „b“ verwendet (siehe Abb. 3.4-6). Dabei wurde für die Teilchenflussberechnung die Detektor-Methode der „Flussberechnung über Weglängen“ (track-length estimator) angewendet. In der Abb. 3.4-6 ist die Geometrie für die Kalkulation dargestellt.

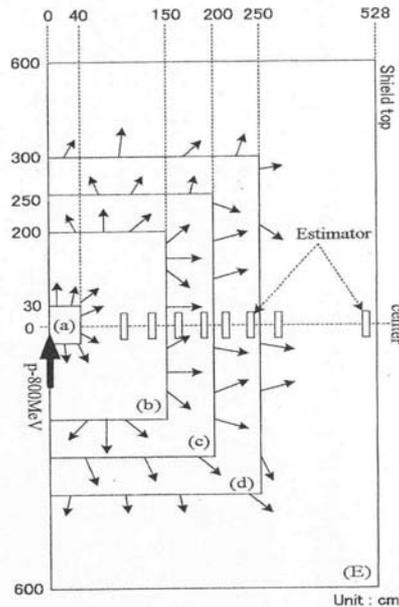


Abb. 3.4-6: Geometrie für die Kalkulation mit MARS14 Code /Nun 02/.

In der Abb. 3.4-7 werden die berechneten Neutronenenergiespektren auf der Abschirmungsfläche, nach 60 cm Betonabschirmung und nach 30 cm Stahlabschirmung mit experimentellen Daten verglichen. Die berechneten Neutronenenergiespektren über 20 MeV für die Betonabschirmung stimmen mit guter 30 % Annäherung mit den experimentellen Daten überein. Die Neutronenenergiespektren für die Stahlabschirmung unterscheiden sich im Bereich über 20 MeV um den Faktor 2, im Bereich unter 20 MeV um den Faktor 3.

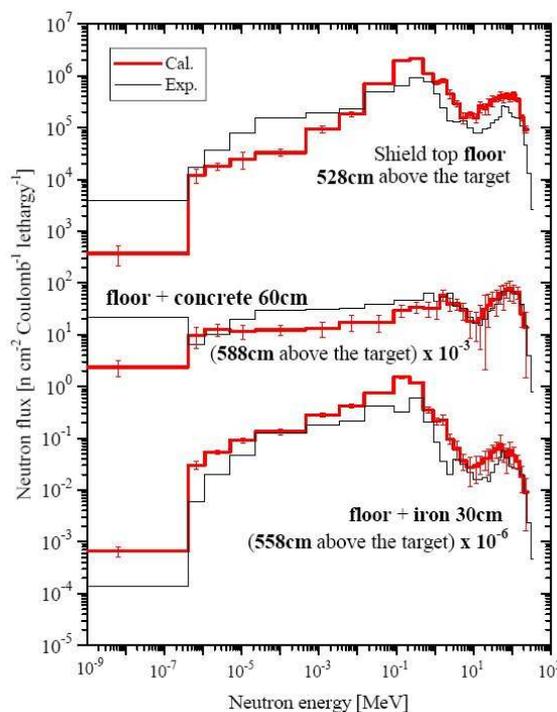


Abb. 3.4-7: Die kalkulierten Neutronenenergiespektren hinter 60 cm dicker Betonabschirmung und 30 cm Stahlabschirmung verglichen mit experimentellen Daten /Nak 03a/

Die Abschwächungslängen für die Neutronen wurden aus den Abschwächungsprofilen für  $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$  Reaktionsraten erhalten. Die berechneten Abschwächungslängen sind um ca. 7 % kürzer als die im Experiment ermittelten (Tab. 3.4-2).

Das Experiment zeigt gute Übereinstimmung der mittels MARS 14- Modells berechneten Werte mit den Experimentswerten. Die Daten der früheren einfachen Berechnungen /Han 97/ unterscheiden sich dagegen bis zu einer Größenordnung von den Ergebnissen aus dem Experiment.

Tab. 3.4-2: Vergleich der berechneten und der gemessenen Neutronenabschwächungslängen erhalten aus den  $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$  Reaktionsraten /Nak 03a/.

Abschirmungsmaterial	Abschwächungslänge [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ] für Neutronenflüsse über 20 MeV		
	Exp.	Theoret.	K/E
Normalbeton [2,36 $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	125,4 $\pm$ 5,1	116,7 $\pm$ 3,8	0,93
Stahl [7,8 $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	161,1 $\pm$ 2,1	150,3 $\pm$ 5,8	0,93

### III. Verifizierung der Messergebnisse im SATURNE Experiment durch die verschiedenen Berechnungsmethoden.

L. Bourgois beschreibt in /Bou 96/ die Dosismessungen beim SATURNE- Experiment in Sac-lay (Frankreich). In diesem Experiment wurden verschiedene Targets mit Protonenstrahlen von 2,7 GeV Energie beschossen. Die Detektoren wurden hinter einer Betonabschirmung in verschiedenen Richtungen zum einfallenden Protonenstrahl ( $50^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $100^\circ$ ) positioniert (siehe Abb. 3.6-8). Die Berechnungen wurde mittels Kopplungsmethoden HET-ANISN, CASL und Monte Carlo Kopplungsmethoden HET-MORSE durchgeführt. In der Abb. 3.4-9 ist der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Dosiswerten dargestellt. Die Ergebnisse aus den Kopplungsmethoden HET-ANISN stimmen mit guter Annäherung mit den gemessenen experimentellen Werten überein, wobei die experimentellen Daten (im Winkel von  $50^\circ$ ) nur auf einer Messung basieren.

Die berechneten Werte aus der CASL- Simulation waren jedoch zu groß. Die Fehlerursache ist die anisotrope Verteilung des Neutronenspektrums. In der Vorwärtsrichtung ( $0^\circ$  zum Protonenstrahl) reicht die höchste Neutronenenergie bis zur Energie des wechselwirkenden Primärteilchens. Das Neutronenspektrum wird mit zunehmendem Winkel zum Protonenstrahl schwächer. Dieser Effekt wird aber in der CASL- Berechnungsmethode nicht berücksichtigt, was die Ergebnisse negativ beeinträchtigt.

Beim Vergleich der reinen Monte Carlo Kopplungsmethoden HET-MORSE mit den Ergebnissen sollte erwähnt werden, dass die Berechnungen ohne die genaue Materialzusammensetzung des Betons durchgeführt wurden.

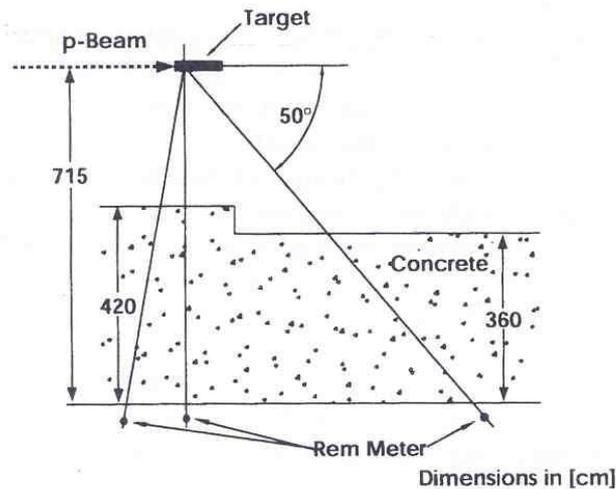


Abb. 3.4-8: Schematischer Aufbau des SATURNE-Experiments /Fil 00/

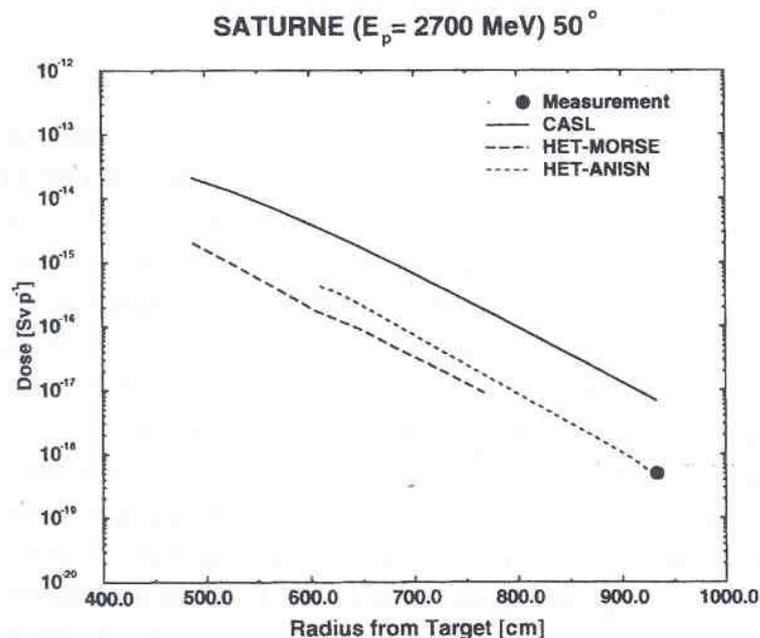


Abb. 3.4-9: Dosisrate beim SATURNE –Experiment im Winkel von  $50^\circ$  zum Protonenstrahl /Fil 00/

#### IV. Abschirmungsexperiment an der Spallationsquelle AGS -Brookhaven USA

1997 wurde an der Spallationsquelle AGS (Alternating Gradient Synchrotron) /Nak 02/ im Brookhaven National Laboratory mehrere Experimente zur Validierung der berechneten und experimentellen Neutronenreaktionen sowie Abschirmungsdaten durchgeführt.

Im Abschirmungsexperiment wurde ein Quecksilbertarget in einer Kaverne aus Normalbeton (2 m breit x 2,7 m hoch) positioniert und mit einem gepulsten Protonenstrahl von 0,86 kJ Leistung und einer Energie von 2,83 GeV sowie 240 kJ Leistung und Energie 24 GeV (beide mit einer Pulslänge von 0,6 Hz) beschossen.

Die seitliche Abschirmung wurde auf einer Seite aus 5 m Normalbeton und auf der anderen Seite aus 3,3 m Stahl (beginnend in je 1 m Entfernung vom Target) aufgebaut. In der Proto-

nenvorwärtsrichtung wurde eine 3,7 m dicke Abschirmung beginnend in 3,5 m Entfernung vom Targetsende aufgestellt (Abb. 3.4-10). Der Querschnitt aller Abschirmungen betrug 2 m x 2 m (Breite x Höhe).

Innerhalb der Abschirmung wurden mehrere Proben (Folien) aus Bi, Al, In und Au positioniert, die durch den Neutronenstrahl aktiviert wurden. Die Schwellwertreaktionen an  $^{209}\text{Bi}(n, xn)$ ,  $^{27}\text{Al}(n, x)^{24}\text{Na}$ ,  $^{115}\text{In}(n, n)^{115m}\text{In}$  und  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  haben typische Energieschwellen, die durch Detektoren gemessen werden können. Dadurch konnten Informationen zur Energiespektrenverteilung der Neutronen in der Abschirmung gewonnen werden.

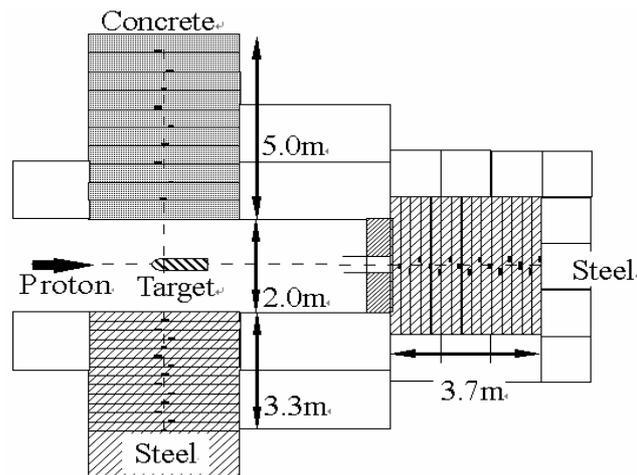


Abb. 3.4-10: Schematischer Aufbau des AGS-Abschirmungsexperiments /Nak 02/.

Die spektral gemittelten Neutronenreaktionsraten aus der Reaktion  $^{209}\text{Bi}(n, 6n)^{204}\text{Bi}$  (mit Energieschwelle von 38,0 MeV) in der Normalbeton- und Stahlabschirmung wurden mit kalkulierten mittels NMCT/JAM (Free) und (In-medium) /Nii 01/ sowie MCNPX Daten verglichen (Protonenergie 24 GeV)(Abb. 3.4-11). Im Rahmen der Messgenauigkeit ergab sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit den kalkulierten Daten. Die kalkulierten Werte für die Stahlabschirmung unterscheiden sich von den experimentellen Werten um den Faktor 2 und für die Normalbetonabschirmung um den Faktor 3.

In der Abschirmungstiefe von 25 cm wurden in beiden Fällen die größten Unterschiede festgestellt (Abb. 3.4-11). Diese Unterschiede zwischen den kalkulierten und experimentellen Reaktionsrate-Werten resultieren in erster Linie aus der Komplexität des Targetumgebungsreichs, die in den Simulationssmodellen nicht nachgebildet werden konnte.

Es wurden auch Neutronenreaktionsraten aus der Reaktion  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  in der Stahl- und Normalbetonabschirmung gemessen, die durch Beschuss mit Protonen der Energie 2,83 GeV und 24 GeV entstanden sind. Zusätzlich wurden die sich in der Normalbetonabschirmung befindlichen Au-Folien mit einem 1 mm Cd-Blech umhüllt, um das Verhalten der thermischen Neutronen im Normalbeton zu untersuchen. In der Abb. 3.4-12 sind die experimentell bestimmten Reaktionsraten in Form von konvexen Kurven für die Stahl- und konkaven Kurven für die Normalbetonabschirmung dargestellt. Weiterhin stellte sich heraus, dass die Reaktionsraten (Schwächung) von Niedrigenergieneutronen im Stahl und Normalbeton sich von den Reaktionsraten der Hochenergieneutronen unterscheiden.

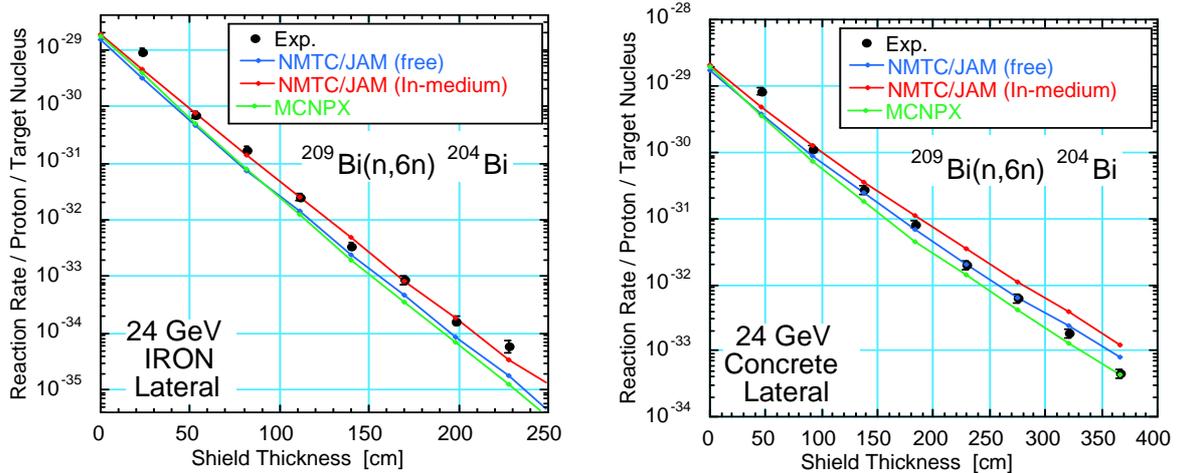


Abb. 3.4-11: Die kalkultierten Neutronenreaktionsraten in der Stahlabschirmung (links) und in der Normalbetonabschirmung (rechts) verglichen mit experimentellen Daten /Nak 02/.

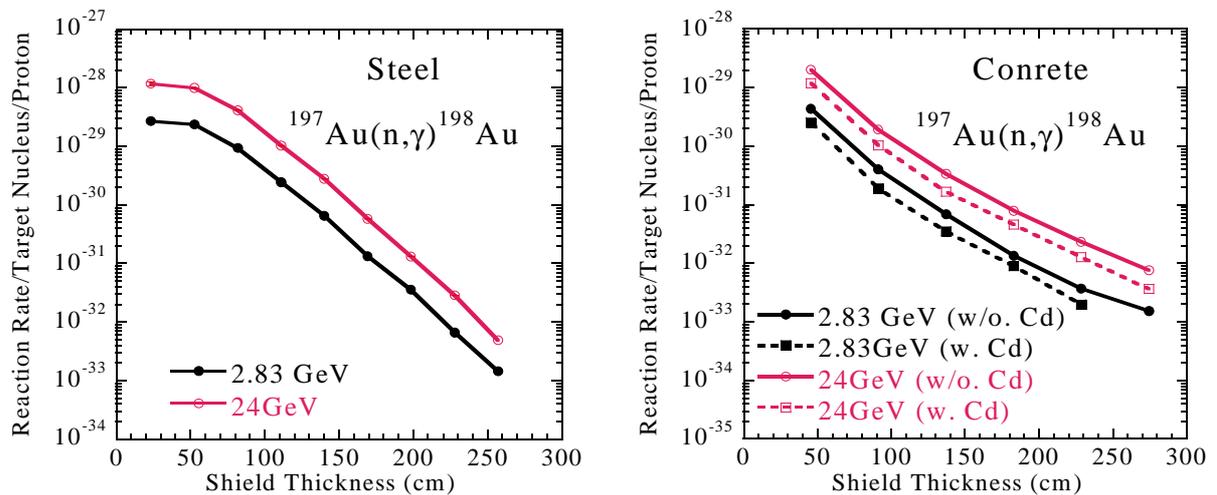


Abb. 3.4-12: Die gemessenen Neutronenreaktionsraten in der Stahlabschirmung (links) und in der Normalbetonabschirmung mit und ohne Cd-Umhüllung (rechts) /Nak 02/.

## **4 Eigenschaften der verwendeten Materialien für die Abschirmung**

### **4.1 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie**

Um die geeignete Abschirmung und geeignete Abschirmungsmaterialien für ein Spallations-system zu bestimmen und auszulegen müssen verschiedene Wechselwirkungen -vor allem die Teilchenart und die Teilchenstrahlintensität- in Betracht gezogen werden. In der Abschirmung finden Wechselwirkungen der Strahlungsteilchen mit dem Abschirmmaterial statt. Dabei können Energie und Bewegungsrichtung der Teilchen geändert werden, oder auch andere Strahlungsteilchen entstehen. Direkt ionisierende Strahlung ist wegen der vergleichsweise geringen Reichweiten verhältnismäßig leicht abzuschirmen. Die Abschirmung der indirekt ionisierenden Strahlungsarten (Gammastrahlung, Neutronen) ist viel schwieriger, da diese Strahlung ein völlig anderes Verhalten in Absorbern als die von geladenen Teilchen zeigt. Eine genauere Beschreibung der Wechselwirkungsprozesse ist u.a. in den Ref. /Kri 98, Koe 04, Vol 04/ zu finden.

### **4.2 Analyse der Materialeigenschaften für Abschirmungen**

Beim Bau moderner Spallationsanlagen spielen auch ökonomische Faktoren eine dominante Rolle. Vor allem in der Abschirmungsauslegung sind Forderungen nach einer preiswerten aber effektiven Abschirmung zu beachten. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Abschirmungsmaterialien mit ihren physikalischen und technischen Abschirmungseigenschaften diskutiert.

#### **4.2.1 Erdreich als Abschirmmaterial**

Erdreich gehört zu den preiswertesten in der Abschirmungs-Technologie benutzten Materialien. Da Erdreich Wasser enthält, spielt es in der Niedrigenergieneutronenabschirmung eine sehr wichtige Rolle. In elastischen Stößen übertragen die Neutronen fast ihre ganze kinetische Energie auf die Wasserstoffkerne in den Wassermolekülen. Zum Vergleich: Ein  $^{12}\text{C}$ - Atomkern kann nur 28 % der Reaktionsneutronenenergie absorbieren.

Erdreich besteht außerdem aus mittelschweren Elementen, die effektiv gut gegen Photonen abschirmen. Die typische Zusammensetzung von trockenem Erdreich ist in der Tab. 4.2.1.-1 dargestellt.

Tab. 4.2.1-1: Zusammensetzung von trockenem Erdreich /Chi 84/

Element	Gewicht in [%] der trockenen Masse
O	43,77
Si	28,1
Al	8,24
Fe	5,09
Mn	0,07±0,06
Ti	0,45±0,43
Ca	3,65
Mg	2,11
K	2,64
Na	2,84

Die Dichte von Erdreich variiert zwischen  $1,7 \text{ kg/dm}^{-3}$  bis zu  $2,25 \text{ kg/dm}^{-3}$  abhängig von Erdsorte und Wasserinhalt. Die Dichte von Erdreich mit großem Sandanteil ist viel kleiner als die von schwerer Tonerde. Andererseits weist vulkanische Erde eine sehr kleine Dichte auf. Aus dem Grunde müssen die exakte Zusammensetzung und die physikalischen Daten der Abschirmungserde bestimmt werden. Der Wasserinhalt des Erdreichs ist von großer Bedeutung für die Auslegung des Abschirmungsdesigns.

Erdreich wird in den heutigen Spallationsanlagen vor allem als die obere Schicht der Beschleunigerabschirmung angewendet (siehe Kap. 6)

#### 4.2.2 Beton als Abschirmmaterial

Beton ist als Abschirmungsmaterial vor allem in der Reaktorabschirmungstechnik das Material der Wahl. Beton ist preiswert, lässt sich leicht in komplizierten Abschirmungsstrukturen formen, hat gute Struktureigenschaften, und kann für die Abschirmung von Neutronen und Photonen verwendet werden. Beton wird als eine Mischung aus 13 Vol. % Zement, 7 Vol. % Wasser und 80 Vol. % Zusatzstoffen hergestellt. Die Verwendung der Zusatzstoffe bestimmt die Anwendung der jeweiligen Betonsorte in der Abschirmungstechnik. Typische Zusammensetzung einiger Betonsorten nach dem Aushärten sind in der Tab. 11.3 im Anhang zusammengestellt. Für die Verbesserung der Abschirmwirkung von schnellen Neutronen und Photonen wird zum Beispiel Schrotteisen oder Eisenerz in die Betonmischung zugegeben, während für die Verbesserung der Absorption der thermischen Neutronen Bor zugegeben wird.

Da der Wasserstoff im Beton eine sehr große Rolle für die Neutronenabschirmung spielt, bestimmt die Betriebstemperatur des Betons die Lebensdauer der Abschirmung. Um die Dehydrierung und Wärmebelastung des Normalbetons zu verringern, müssen folgende Kriterien erfüllt werden /Chi 84/:

##### Max. Umgebungstemperatur für:

- Gamma-Photon-Abschirmungen 149°C
- Neutronen-Abschirmung 71°C

##### Max. Innentemperatur für:

- Gamma-Photon-Abschirmungen 177°C
- Neutronen-Abschirmung 88°C
- Max. Temperaturgradient 1°C/cm

Beton hat eine sehr gute Druckfestigkeit, ist aber gleichzeitig wenig widerstandsfähig gegen Zugspannung. Deswegen müssen Betonstrukturen mit Stahl armiert werden.

Die Verminderung der Druckfestigkeit durch Strahlenschädigung oder durch Ausgasung durch Wasserhydrolyse stellt generell kein großes Problem dar. Einige thermische und mechanische Betoneigenschaften sind in der Tab. 4.2.2-1 dargestellt

Tab. 4.2.2-1: *Typische mechanische und thermische Eigenschaften einiger Betonsorten nach dem Aushärten /Chi 84/*

Eigenschaften	Betonsorten			
	Normalbeton	Barytbeton	Limonitbeton	Borbeton
Dichte (kg dm <sup>-3</sup> )	2.2-2.4	3.5	4.3-4.5	5.24-5.35
Spezifische Wärme (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.65	0.52	0.70	0.75
Wärmeleitfähigkeit (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.88	1.6	2.8-3.6	0.8
Längenausdehnungskoeffizient (20-100°C) (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	14	/	7	32
Zugfestigkeit (MPa)	2-3	2		
Druckfestigkeit (MPa)	38	25-29	38	13-16

Als Beispiel sind die angewandten Betonsorten für den äußeren Betonmantel der Targetstationen in der Tab. 4.2.2-2 aufgelistet.

Tab. 4.2.2-2: *Angewandten Betonsorten für den äußeren Betonmantel in verschiedenen Spallationsquellen*

Spallationsquelle	Land	Angewandte Betonsorte für den äußeren Mantel der Targetstation	Referenz
ESS (nicht realisiert)	Europa	Normalbeton	/Han 03/
SNQ (nicht realisiert)	Deutschland	Normalbeton	/Bau 81/
SNS	USA	Borbeton	/SNS 00/
ISIS	England	Borbeton	/Bro 79/
J-PARC	Japan	Magnetitbeton/Normalbeton	/Tak 02/
SINQ	Schweiz	Borbeton	/SIN 97/

### 4.2.3 Wasserstoffhaltige Materialien –Wasser, Paraffin, Polyethylen

**Wasser** hat auch einen großen Wasserstoffanteil. Die Einfangreaktionen der thermischen Neutronen verlaufen wie bei Polyethylen. Zusatz von Bor ist sehr erschwert, da Bor-Salze im Wasser nicht löslich sind. Wasser als Abschirmungsmaterial muss in dichten Behältern verschlossen werden, was den Abschirmungsaufbau wesentlich erschwert. Es verursacht auch

Korrosion in den Stahlbehältern, was für die Auslegung der Abschirmung berücksichtigt werden muss.

**Paraffin** wurde in der Vergangenheit sehr oft für die Neutronenabschirmung verwendet. Es ist jedoch sehr leicht brennbar, was der entscheidende Nachteil für die Nutzung im Abschirmungsaufbau ist. Um Paraffin für die Abschirmung zu verwenden, wird Paraffin mit feuerhemmenden Zusätzen in Metallcontainer gefüllt (Abb. 4.2.3-1).

**Polyethylen**  $(\text{CH}_2)_n$  ist wegen seines hohen Wasserstoffanteils (14 Vol. %) und seiner Dichte (ca.  $0,92 \text{ kg/dm}^3$ ) sehr effektiv als Neutronenabschirmung. Es kann schnelle Neutronen moderieren und abbremsen. Thermische Neutronen können in der Reaktion  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  eingefangen werden. Dabei beträgt der Einfangswirkungsquerschnitt von Wasserstoff für thermische Neutronen ( $E = 0,027 \text{ eV}$ )  $0,33 \text{ barn}$ . In dieser Reaktion entsteht  $\gamma$ -Strahlung mit der Energie von  $2,225 \text{ MeV}$ , was zur Strahlungsbelastung führen kann. Zusatz von Bor in das Polyethylen reduziert die Energie der entstehenden  $\gamma$ -Strahlung. Die thermischen Neutronen werden in der Reaktion  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  eingefangen. In 94 % dieser Reaktionen wird das emittierte  $\alpha$ -Teilchen durch  $\gamma$ -Strahlung von  $0,48 \text{ MeV}$  begleitet. Der Einfangswirkungsquerschnitt des Bors beträgt ca.  $4000 \text{ barn}$  /Kri 98/,/Chi 84/. In der Abschirmungspraxis wird Polyethylen mit Zusätzen von Bor (bis zu 32 %), Lithium (bis zu 10 %) und Blei (bis zu 80 %) verwendet. Reines Polyethylen ist leicht brennbar, jedoch lässt sich durch einige Zusätze feuerresistenter machen.



Abb. 4.2.3-1: Metallcontainer gefüllt mit Paraffin (grüne Platten) als Abschirmung bei Spallationsquelle ISIS Rutherford Laboratory (RAL, England)

#### 4.2.4 Eisen und Stahl als Abschirmmaterialien

Eisen hat eine hohe Dichte von  $7,85 \text{ kg/dm}^3$ , mit einem Schmelzpunkt von  $1536^\circ\text{C}$ . In Verbindung mit niedrigen Herstellungskosten stellt Eisen ein attraktives Abschirmungsmaterial dar. In der Industrie werden verschiedene Eisenlegierungen (Stahl) mit variablen Eigenschaften (Festigkeit, Beständigkeit) und Zusätzen hergestellt. Der wichtigste Legierungsstoff ist Kohlenstoff. Er bestimmt auch die Eigenschaften des Stahls.

Stahl ist ein relativ guter Absorber für thermische Neutronen und Gamma-Strahlen, gut geeignet für die Schwächung der hochenergetischen Neutronen durch inelastische Wechselwirkung. Stahl hat sehr gute strukturelle, thermische und chemische Eigenschaften.

Die Stähle sind nach den Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften und dem Gehalt an Legierungselementen (LE) grobeingeteilt in : Grundstähle (Massenstähle), Qualitätsstähle, Edelstähle (siehe auch /Bög 95/).

Die Tab. 11.1 im Anhang vergleicht die mechanischen und thermischen Eigenschaften der verschiedenen Stähle. Die Edelstähle sind wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit und nicht-magnetischen Eigenschaften für die Auswahl der Abschirmungsmaterialien von großer Bedeutung. Allerdings sind sie teurer als normale Stähle. Lediglich in Legierungen findet man Spuren von Kobalt, welches zum langlebigen radioaktiven Element  $^{60}\text{Co}$  durch Radiativstrahlung umgewandelt werden kann.

In der Industrie wird auch sog. Stahlguss hergestellt. Stahlguss ist jeder Stahl der in Formen gegossen und einer Glühung unterworfen wird. Stahlguss bietet mehrere Vorteile in Bezug auf die Herstellung und das Design von Abschirmungen. Die Verwendung des Recyclingschrotts (siehe Kap. 4.3) im Stahlguss ermöglicht kostengünstige Herstellung des Gussstahls, der wiederum direkt in Endform gegossen werden kann.

#### 4.2.5 Schwermetalle wie Blei, Uran als Abschirmmaterialien

**Blei** ist eines der wichtigsten Abschirmungsmaterialien vor allem gegen Gammastrahlung. Reines Blei (99,9% Blei) hat eine hohe Dichte ( $11,3 \text{ kg/dm}^3$  siehe auch Tab. 11.2 im Anhang) und ist Korrosionsresistent. Sein ziemlich niedriger Schmelzpunkt ( $327,4^\circ\text{C}$ ), niedrige Festigkeit und hohe Beschaffungskosten begrenzen die breite Anwendung von Blei in Abschirmungsfragen. Einige Legierungen (vor allem Antimon) verbessern die mechanischen Eigenschaften. Blei lässt sich leicht mechanisch verarbeiten. Die hohe chemische Toxizität des Bleis erfordert jedoch sehr große Sorgfalt bei der Bearbeitung und Handhabung. Blei wird dort eingesetzt, wo eine kleine Abschirmungsdicke erforderlich ist.

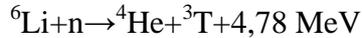
**Uran** ist wegen seiner hohen Dichte ( $19,05 \text{ kg/dm}^3$ ) und seines hohen Schmelzpunktes ( $1133^\circ\text{C}$  siehe Tab. 11.2 im Anhang) ein exzellentes Gammastrahlungsabschirmungsmaterial. Für die Abschirmung wird üblicherweise abgereichertes Uran verwendet, in dem der Anteil an  $^{235}\text{U}$  gegenüber natürlich vorkommendem Uran reduziert ist. Eine Abschirmung aus Uran sollte nicht in der Neutronenflussumgebung angewendet werden. In der abgereicherten Form ist Uran relativ sicher, jedoch kann es in der Kombination mit wasserstoffhaltigen Materialien und Neutronen unter bestimmten Bedingungen zu einer Kernspaltungsreaktion kommen. Die Materialeigenschaften vor allem (anisotroper Längenausdehnungskoeffizient) und Oxidationsneigung in feuchter Luftumgebung erschweren den Uraneinsatz als Abschirmungsmaterial. Auch ist die maschinelle Bearbeitung mit sehr großem Aufwand verbunden. Uranstäube sind selbstentzündend und toxisch.

#### 4.2.6 Andere Materialien wie Lithium, Beryllium, Bor, Graphit, Aluminium als Abschirmmaterialien

**Lithium** ist das leichteste alle Metalle. Es ist sehr reaktionsfreudig, deshalb kommt es in freier Form in der Natur nicht vor. In gebundener Form ist es in kleinen Mengen allerdings in fast allen Eruptivgesteinen vorhanden und lässt sich in manchen Mineralquellen nachweisen. Bei den handelsüblichen Lithiumerzen liegt der Massenanteil des Alkalimetalls zwischen ein bis drei Prozent. Lithium hat zwei stabile Isotope, von denen dasjenige mit der Massenzahl 7 mit

92,5 % am häufigsten vorkommt. Der Anteil von Lithium 6 liegt bei 7,5%. Daneben sind drei instabile Isotope bekannt, deren Halbwertszeiten im Millisekunden-Bereich liegen ( $^8\text{Li}$ : 842 ms;  $^9\text{Li}$ : 178 ms;  $^{11}\text{Li}$ : 8,7 ms).

Das Isotop  $^6\text{Li}$  zeichnet sich durch einen sehr hohen Absorptionsquerschnitt von 940 barn für thermische Neutronen aus. Dabei entsteht aus  $^6\text{Li}$  durch Neutronenbeschuss in einer exothermen Reaktion Tritium und Helium:



In dieser Reaktion soll Tritium für die zukünftigen Kernfusionsreaktoren erzeugt werden.

$^6\text{Li}$  wird auf Grund seiner Eigenschaften vor allem in den Kollimationsstrecken in Strahlrohren für Neutronen als Absorbermaterial (z. B. beim Blendenbau) verwendet.

**Beryllium** besitzt für ein Leichtmetall einen bemerkenswert hohen Schmelzpunkt (1278,5°C). Neben der sehr hohen Wärmekapazität (1825 J/kg\*K) besitzt es einen um 1/3 höheren Elastizitätsmodul als Stahl, die Schwingungsdämpfung ist ebenfalls sehr hoch. Zusätzlich besitzt es eine hohe Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen. Alphateilchen setzen aus Beryllium Neutronen frei. Bei Raumtemperatur ist Beryllium an trockener Luft beständig, es bildet sich eine passivierende Oxidhaut, die dem Angriff konzentrierter Salpetersäure widersteht. An feuchter Luft überzieht es sich mit einer Schicht aus Hydroxid. Beryllium wird aufgrund seiner hohen Härte, Elastizität und Ermüdungsfestigkeit sehr oft als Targetmaterial verwendet. Jedoch sind Beryllium und Berylliumsalze giftig und toxisch.

Das Element **Bor** ist ein Nichtmetall, das in mehreren Modifikationen auftritt und unter Normalbedingungen recht reaktionsträge ist. Je nach Art der Gewinnung liegt es als braunes, amorphes Pulver oder in Form metallisch glänzender, grauschwarzer, sehr harter Kristalle vor. Bor ist ein äußerst hitzebeständiger Feststoff mit geringer Dichte (2,64 g/cm<sup>3</sup>) und niedriger elektrischer Leitfähigkeit. Unter den Nichtmetallen hat nur Kohlenstoff einen höheren Schmelzpunkt als Bor (2300°C) /Uni 05/. Bor ist ein besonders geeigneter Stoff für den Einfang thermischer Neutronen. Die Neutronenabsorption erfolgt aufgrund der Kernreaktion  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ , deren Wirkungsquerschnitt für schnelle Neutronen (2MeV) 100 barn und thermische 4000 barn beträgt /Saut 83/. Die gute Wirksamkeit von Bor zum Einfang thermischer Neutronen führte zur Entwicklung verschiedener Bor enthaltender Abschirmmaterialien für Neutronen wie Boral und borierter Graphit.

- Boral besteht aus Aluminium, dem bis zu 50 Vol. % B<sub>4</sub>C (Borkarbid) in disperser Form zugesetzt wird. Dieses Material wird in Form von Blechen hergestellt, die beidseitig eine Aluminiumschicht tragen.
- Borierter Graphit eignet sich besonders gut zur Abschirmung schneller Neutronen. Eine 2,5 cm dicke Schicht dieses Materials mit 4 Gewichtsprozent natürlichem Bor reduziert die thermische Neutronenflussdichte auf 1/400 /Jae 60/.

**Graphit** ist die hexagonale Modifikation des reinen Kohlenstoffs. Graphit ist ein sehr gutes Abschirmungsmaterial durch Moderation schneller Neutronen, mit Borzusatz bildet er ein effektives Medium für den Neutroneneinfang. Graphit ist Hitze resistent und wird als Abschirmungsmaterial überall dort verwendet, wo hohe Temperaturen oder hohe Neutronenflüsse auftreten. Graphit kristallisiert in parallel verlaufenden Schichten, den Basalebene. Innerhalb dieser Ebenen beträgt die Bindungsenergie zwischen den Kohlenstoff-Atomen 4,3 eV, zwischen ihnen dagegen lediglich 0,07 eV. Aus dieser extremen Richtungsabhängigkeit der Bindungskräfte resultiert eine deutliche Anisotropie der mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften des Graphits. Einige mechanische und thermische Eigenschaften sind in der Tabelle 11.4 im Anhang aufgelistet.

Das Leichtmetall **Aluminium** hat aufgrund einer sich sehr schnell an der Luft bildenden dünnen Oxidschicht ein stumpfes, silbergraues Aussehen. Die Oxidschicht macht Aluminium sehr korrosionsbeständig. Es ist ein sehr weiches Metall, ist dehnbar und kann durch Auswalzen zu dünner Folie verarbeitet werden. Aluminium ist das dritthäufigste Element in der Erdkruste und tritt nur in chemisch-gebundenem Zustand auf. Es ist ein guter elektrischer Leiter. Aluminium wird wegen seiner nichtmagnetischen Eigenschaften und wegen guter Korrosionsbeständigkeit für einige Teile einer Spallationsanlage (Strahlfenster) verwendet. Für Neutronen ist Aluminium praktisch durchlässig. Somit ist Aluminium für die Abschirmung nicht geeignet.

### 4.3 Abschirmungsmaterialien von schwachradioaktiven Reststoffen

Anfang der 80-er Jahre wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem schwachradioaktive metallische Reststoffe durch Schmelzen behandelt werden und als Guss wieder verwendet werden. Der weitaus größte Anteil schwachradioaktiver metallischer Reststoffe ist oberflächennah kontaminiert. Herkömmliche Dekontaminationsverfahren erzeugen je nach Verfahren und Struktur der zu bearbeitenden Komponente einen hohen Anteil an sekundären Abfall insbesondere bei großen Oberflächen des Bauteils. Dagegen verbleibt beim Einschmelzen radioaktiv kontaminierter Bauteile nur ein geringer Teil der Aktivität im Schmelzbad. Ein Großteil der Radionuklide geht in die Schlacke über oder wird über die Absaugung in Filter transferiert. Das Volumen der Abfallstoffe Schlacke und Filterstaub beträgt jedoch nur noch einen Bruchteil (bis zu 5 %) des Ausgangsvolumens, ein wichtiger Kostenfaktor im Hinblick auf die Entsorgung. Zur Bestimmung der Aktivität der Schlüsselnuklide im Eisen wird der flüssigen Schmelze eine Probe entnommen, die gammaspektroskopisch ausgewertet wird. Damit kann die Gesamtaktivität im Eisen genau bestimmt werden. Die Aktivierung der Eisenschmelze ist hauptsächlich durch die Nuklide  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ , und  $^{63}\text{Ni}$  bestimmt, während die Spaltungsprodukte wie  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  nach dem Schmelzen in der Schlacke und im Filter zu finden sind. Als Zwischenprodukt entsteht ein bis zu 1000 kg schwerer Gussblock/Qua 95/. Im nächsten Schritt werden diese Blöcke mit frischem Eisenschrott in einer Schmelze vermischt. Die prozentuale Zusammenstellung der Schmelze richtet sich nach geforderten metallurgischen und radiologischen Eigenschaften. Die Recyclingquote variiert von 20% bis zu 50%.

Ein anderer relevanter Aspekt ist der Transport der Abschirmungsblöcke zur Baustelle. Die verbleibende Restaktivität ist zwar sehr niedrig, liegt jedoch oberhalb der Freigabegrenze. In solchen Fällen unterliegt der Transport der sog. Gefahrgutverordnung (ADR). Nach ADR-Kriterien gilt z.B. in Deutschland eine Obergrenze von 4 Bq/g für die  $^{60}\text{Co}$ -Aktivität und für die zulässige Dosisoberfläche der Transportverpackung die Obergrenze von 5  $\mu\text{Sv/h}$ . Damit ist das maximale Gewicht der zu transportierenden Abschirmblöcke auf 100 t begrenzt. Demzufolge müssen die Lagerung und die Handhabung der Abschirmblöcke auf der Baustelle unter Einhaltung der Strahlenschutzverordnung erfolgen, was weiterhin zu Errichtung eines temporären Kontrollbereiches während der Aufbauphase auf der Baustelle führt.

Die Betreiber und Errichter von Anlagen in denen mit Kernbrennstoffen umgegangen wird, müssen alle radioaktiven Reststoffe schadlos verwerten oder als radioaktive Abfälle beseitigen. Die Kosten für die Beseitigung in Form von Endlagerung belaufen sich heutzutage auf 6,00 bis 8,00 €/kg. Folgende Herstellungskosten der Abschirmblocks aus Recyclingmaterial fallen an:

▪ Schmelze	2,40 €/kg
▪ Abfallentsorgung	0,75 €/kg
▪ Herstellung von Abschirmblöcken	1,30 €/kg
Gesamt	4,45 €/kg

Die geschätzte Einsparung ist die Differenz zwischen 6,00-8,00 €/kg und 4,45 €/kg = 1,55-3,55 €/kg, wenn der Abschirmblock aus 100 % - Recyclingmaterial hergestellt ist /Qua 02/. Tab. 4.3-1 zeigt die Herstellungskosten für die Abschirmungsblöcke abhängig vom Anteil an recyclingmaterial.

Tab. 4.3-1: Herstellungskosten für die Abschirmungsblöcke abhängig vom Anteil an Recyclingmaterial /Han 03/

Recyclinganteil im Abschirmblock	Kosten des Abschirmblocks [€/kg]
0 %	0,95
20 %	0,65 bis 0,25
50 %	0,15 bis (-0,85*)
100 %	(-1,55*) bis (-3,55*)

\*) Negative Zahl stellt Rückvergütung bei der Nutzung von Recyclingschrott dar.

Für die Wiederverwertung der erschmolzenen Gussblöcke sind vielfältige Anwendungsmöglichkeiten gegeben. Aktuelle Schwerpunkte sind die Produktion von Abschirmelementen für Zwischen- und Endlager für radioaktive Abfälle oder Konditionierung für Abfälle /Qua 95/. Es wurde auch für zukünftige Spallationsquellen wie der Europäischen Neutronenquelle-ESS die Verwendung der Abschirmblöcke aus Recyclingmaterialien postuliert /Han03/.

Jedoch wird die mechanische Bearbeitung solcher Blöcke mit wachsendem Anteil des Recyclingschrotts in den Gussblöcken schwieriger. Ab 50 % Recyclinganteil ist die mechanische Bearbeitung mit technisch fast nicht vertretbarem Aufwand verbunden. Auch die Verfügbarkeit entsprechender Mengen an Recyclingschrott ist begrenzt.

#### 4.4 Anforderungen an die Abschirmungsmaterialien

In diesem Kapitel werden die wichtigsten physikalischen und technischen Abschirmungseigenschaften der verschiedenen Materialien zusammengestellt.

Die ausgewählten Materialien für die Abschirmung müssen über die ganze Betriebszeit folgende Anforderungen, erfüllen:

- gute Homogenität,
- hohe Dauerfestigkeit,
- feuerresistent,
- schwache Aktivierung während der Betriebsjahre,
- geringe Herstellungskosten,
- kostengünstiger Rückbau.

Im Allgemeinen werden Materialien mit niedrigen Massenzahlen für die Abschirmung der Targets, Kollimatoren an den Elektronenbeschleunigern oder für die Abschirmung der langsamen Neutronen verwendet. Materialien mit hohen Massenzahlen werden vorwiegend zur Abschirmung der Protonen- oder Schwerionenbeschleuniger sowie in der Abschirmung der Spallationsquellen bevorzugt. In der Tab. 4.4-1 werden einige Eigenschaften der Abschirmungsmaterialien verglichen.

Tab. 4.4-1: Vergleich der Eigenschaften von Abschirmungsmaterialien

Eigenschaften	Stahl	Rostfreier Stahl	Gussstahl	Blei	Wolfram	Normalbeton	Schwerbeton
Dichte kg/dm <sup>3</sup>	7,85	7,85	7,1	11,34	18,8	2,3	4,3
Homogenität	++	++	++	++	++	+	+
Festigkeit	++	++	++	-	++	+	+
Feuerbeständigkeit	++	++	++	-	++	-	-
Abschirmungs-Effizienz gegen schnelle Neutronen	+	+	+	++	++	-	+
Gammaabschirmungs-Effizienz	+	+	+	++	++	-	+
Aktivierungsanfälligkeit	mittel	hoch	mittel	mittel	mittel	niedrig	mittel
Beschaffungskosten	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	niedrig	niedrig

++ sehr gut  
+ gut  
- schlecht

Eine der wichtigsten Materialanforderungen neben der Abschirmungseffektivität sind auch die Kosten für den Abschirmungsbau. Die Materialauswahl für die Abschirmung für die Spallationsquelle muss unter Kostengesichtspunkten optimiert werden. Die Herstellung der Abschirmungsblöcke, Bearbeitung und Handhabung sind wichtige Faktoren, die die Kostenbilanz beeinflussen.

Die Abschirmung einer Spallationsanlage besteht aus verschiedenen Materialarten je nach abzuschirmendem Bereich (siehe Kap. 5.1). Daher ist es nicht möglich und auch nicht wirtschaftlich die Abschirmung nur aus einem Material auszuführen. Schon die Anforderungen an die verschiedenen Abschirmungsbereiche schließen die Verwendung einer Materialsorte aus. Ein Kostenvergleich unter bestimmten vereinfachenden Annahmen kann bei der Wahl des Abschirmungsmaterials sehr hilfreich sein. In der Tab. 4.4-2 wurde so ein vereinfachter Kostenvergleich dargestellt. Für den Vergleich wurden folgende Annahmen gemacht:

1. Die geforderte Abschwächung durch die Abschirmung einer Spallationspunktquelle wurde für alle Materialien auf  $10^{17}$  festgelegt.
2. Die Bestimmung der Abschirmungsdicke (Radius r) wurde auf Basis der Abschwächungslängen für die jeweiligen Materialien aus [Gl. 3.1-1 Kap.3.1] ermittelt. mit:

$$\varphi(E,r) / S = 10^{17} = B(E) \cdot \exp(-r \cdot \rho / \lambda_{att}) / r^2 \quad [\text{Gl. 4.4-1}]$$

3.  $B(E) = 1$  Der Aufbaufaktor B(E) wurde wegen großer Abschirmungsdicke bei der Berechnung der Abschirmungsdicke vernachlässigt.
4. Die Masse der jeweiligen Abschirmung wurde als Masse der Kugel mit dem für das jeweilige Material errechneten Radius bestimmt.

Die Preise der jeweiligen Materialien wurden bei Herstellern erfragt.

Tab. 4.4-2: Kostenvergleich der Abschirmungsmaterialien

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Abschwächungs- länge $\lambda_{att}$ [g/cm <sup>2</sup> ] /Arm 81//Pat 73/ /Fil 92/	Radius [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Masse [kg]*10 <sup>3</sup>	Preis	Preis für Abschirmung	Ref.
Stahl	7,85	160	5,10	555,65	4.361	1,70 €/kg	7.413 k€	/Kri 05/
Stahlguss	7,1	160	5,47	685,57	4.867	2,50 €/kg	12.168 k€	/Kri 05/
Edelstahl	7,85	160	5,10	555,65	4.361	8,00 €/kg	34.888 k€	/Kri 05/
Blei	11,3	210	4,57	399,87	4.518	1,78 €/kg	8.043 k€	/Kot 05/
Wolfram	18,5	194	2,89	101,1	1.870	72,0 €/kg	134.640k€	/Maa 05/
Normalbeton	2,3	115	12,00	7.238,23	16.647	80 €/m <sup>3</sup>	579 k€	/Ahl 05/
Schwerbeton	4,3	130	7,50	1.767,15	7.598	780 €/m <sup>3</sup>	1.378 k€	/Ahl 05/
Erdreich	1,8	108	14,50	12.770	22.986	13 €/m <sup>3</sup>	166 k€	/Sch 05/

## 4.5 Aktivierung von Abschirmmaterialien

Die hohen Flüsse und Energien von Primär- und Sekundärteilchen in einer Spallationsquelle können durch Kernreaktionen zur Erzeugung von radioaktiven Nukliden im nicht radioaktiven Ausgangsmaterial, also zur Aktivierung, führen. In einer Spallationsanlage werden sowohl Teile des Beschleunigers und der Targetstation als auch Luft, Kühlwasser, Aerosole und Baumaterialien aktiviert. Je nach Zusammensetzung des Ausgangsmaterials werden unterschiedliche Nuklide mit verschiedenen Halbwertszeiten erzeugt. Aktivierte Materialien müssen nach Sachlage und den geltenden Vorschriften als offene radioaktive Stoffe angesehen werden. Die Bearbeitung radioaktiver Materialien darf nur unter entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen erfolgen. Dabei spielen die Halbwertszeiten der Nuklide für die Handhabungsvorgänge eine entscheidende Rolle. Die Aktivität der kurzlebigen Nuklide ist schon nach wenigen Stunden abgeklungen. Deswegen sind sie für die Handhabungsbetrachtung zu vernachlässigen. In der Tab 11.5 im Anhang sind die wichtigsten Konstruktionsmaterialien und die entstandenen Radionuklide mit Halbwertszeiten zwischen 10 min. und mehreren Jahren nach /Pat 73/ aufgelistet. Die Endprodukte entstehen über Kernreaktionen wie z. B. ( $\gamma, xn$ ), ( $p, xn$ ), ( $n, xp$ ) oder ( $p, np$ ) oder in Spallationsreaktionen durch hochenergetische Teilchen. Zu den gefährlichsten langlebigen Isotopen in Stahlkomponenten gehören die Gammaemitter Mn-54 und Co-56 sowie Co-60. Damit ist die Reduzierung der Kobaltverunreinigungen die eine wirtschaftlich vertretbare Maßnahme zur Reduzierung der Aktivierung von Strukturmaterialien.

Zur Aktivierung von Luft, Erdboden und Wasser sei auf Kap. 5.3 verwiesen.

## 4.6 Strahlenschädigung von Abschirmmaterialien

Materialveränderungen durch Strahleneinwirkung spielen besonders beim Entwurf einer Spaltungsanlage und beim Einsatz von Geräten und Materialien eine Rolle. Auch für den Entwurf der Abschirmung sollten Strahlenschäden in Betracht gezogen werden. Die Teilchen der ionisierenden Strahlung haben im Allgemeinen Energien, die die Bindungsenergie der Elektronen in Atomen und Molekülen (um 1 eV) um ein Vielfaches übertreffen /Fre 76/. Im Wesentlichen wirken die Teilchen auf das Material durch folgende Mechanismen ein:

- Anregung und Ionisation von Atomen und Molekülen
- Verschiebung von Atomen oder Kernen im Festkörper
- Kernreaktionen und Kernanregung
- Inelastische Streuung, Emission von Sekundärstrahlung.

Die Auswirkungen von Strahlenschäden in Materialien sind stark von der Materialart abhängig. Die verschiedenen Materialien weisen sehr unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber Strahlung auf:

**Metalle** - Bei Metallen dominieren zwei Mechanismen der Strahlenschädigung /ESS 02/:

- Verschiebung der Atome im Gitterverband durch die Übertragung der Strahlungsteilchenenergie auf ein Atom der Materie. Dabei ist ein Mindestenergieaufwand von 10 eV erforderlich. Bei höheren Energien kommt es zu einer Kaskade von Verschiebungen innerhalb des betroffenen Bereichs. Als Maß für die Schädigung wird die Anzahl der Verschiebungen pro Atom verwendet – dpa (displacements per Atom)
- Bildung von Fremdatomen durch inelastische Kollisionen. In diesem Falle führt der Prozess zur Änderung der Mikrostruktur des Materials. Vor allem bilden sich durch (n, $\alpha$ )- und (p, $\alpha$ )- Reaktionen Heliumblasen, die sich bevorzugt an den Korngrenzen von Metallen ansammeln und damit zur Versprödung beitragen.

Im Allgemeinen können die Strahlenschäden in Strukturmaterialien Versprödung, strahleninduziertes Kriechen oder Volumenzunahme verursachen. In den meisten Fällen nimmt die Bruchfestigkeit der Metalle bei gleichzeitig verringerter Bruchdehnung zu. Unterhalb einer bestimmten Bruchdehnung kann jedoch ein Material nicht mehr als ausreichend duktil angesehen werden und ist somit nicht mehr einsetzbar. Diese Störungen heilen bei erhöhten Temperaturen aufgrund der Beweglichkeit der Atome im Gitterverband aus. Die Reaktion eines Materials auf eine Strahlendosis ist sehr komplex und schwer vorhersehbar. Das Verhalten des Materials im Strahlungsfeld ist daher eine Funktion der Art des Materials, der Art der Strahlung, der Strahlungsintensität, der Temperatur und zum Teil der Belastungshistorie. In der Abb. 4.6-1 ist die Abhängigkeit der Materialschädigung von der Strahlung dargestellt.

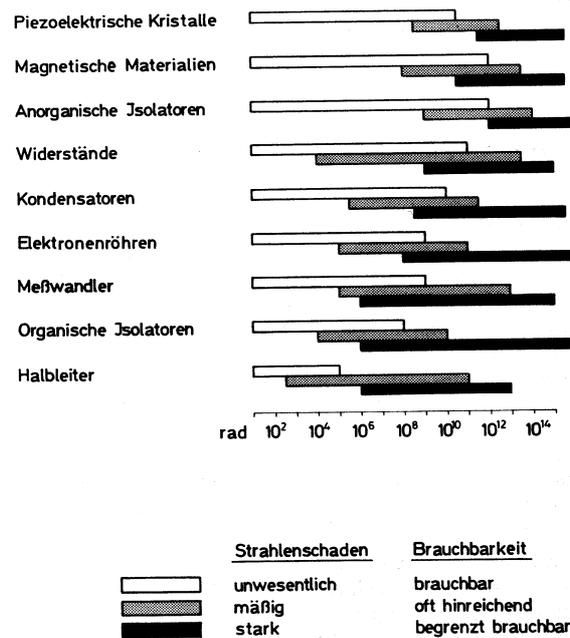


Abb. 4.6-1: Schematische Darstellung der Bereiche verschiedener starker Schädigung von Materialien durch Strahlung (1 rad=0,01 Sv)/Fre 76/.

Die zulässige Schädigung ist jedoch stark materialabhängig. Bei den handelsüblichen rostfreien Stählen sollte eine Schädigung im Bereich von 1 bis 5 dpa nicht überschritten werden. Dafür können speziell für den Einsatz im Strahlenfeld entwickelte Stähle durchaus eine Schädigung bis zu 20 dpa vertragen.

**Organische Verbindungen** – Da organische Moleküle nur geringe Bindungsenergien aufweisen, wirken sich Ionisation und Anregung sehr stark aus, bis zum Zerfall der Moleküle. Hier beobachtet man vor allem zwei Effekte /Voo 70/:

- Vernetzung. Dabei werden die Materialien spröde, hart und brüchig. Beispiele: Gummi, Polyäthylen.
- Kettenspaltung. Dabei tritt Zerfall des Materials auf, es entsteht Pulver oder Flüssigkeit. Beispiel: PVC, Plexiglas. Zusätzlich kann es zur Gasentwicklung kommen; z.B. aus PVC oder Teflon werden Chlor- oder HCl-Dämpfe freigesetzt, die weiter stark korrodierend wirken /Bre 68/.

**Anorganische Verbindungen** – In diesen Verbindungen äußern sich die Strahlenschäden vorwiegend in der Verschiebung von Atomen oder Ionen im Gitter. Veränderte Bindungen heilen meist bei Zimmertemperaturen wieder aus, so dass keine chemischen Veränderungen auftreten. Anorganische Verbindungen sind somit strahlenresistenter als organische. Dabei können sich die Dichte und andere mechanische Eigenschaften ändern. Bei amorphen Materialien (Glas, Quarz) wächst die Dichte durch Bestrahlung, während sie bei kristallinen Substanzen (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) abnimmt.

## 5 Abschirmungsaspekte und Anforderungen an Spallationssysteme

Im Wesentlichen werden heute drei Arten von Spallationssystemen mit unterschiedlichen Aufgaben konzipiert:

- Spallationsneutronenquellen – Neutronenproduktion für die Forschung
- Energy-Amplifier – Neutronenproduktion für die Energieerzeugung
- Transmutationsanlagen - Neutronenproduktion für die Vernichtung langlebiger Spaltfragmente.

Die zwei letzten Spallationssysteme gehören zu den sog. beschleunigergetriebenen Systemen -weiter als ADS-System (engl. Accelerator Driven System)- bezeichnet. Ein ADS-System besteht aus drei Hauptkomponenten: Einem Beschleuniger, einem Target und einem unterkritischen Blanket, in dem die Spaltungsreaktion unter Freisetzung von Spaltneutronen (interne Neutronenquelle) und von Wärme stattfindet. Im Gegensatz zu ADS befindet sich in einer Spallationsquelle kein Blanket, dafür zusätzlich noch weitere Anlagenkomponenten wie: Strahlrohre und Instrumente. Jede Komponente eines Spallationssystems muss entsprechend abgeschirmt werden.

Die Abschirmung ist eines der wichtigsten Bauteile des Spallationssystems. Sie schützt das Personal innerhalb der Anlage und die Öffentlichkeit und Umwelt außerhalb der Anlage vor dem Einfluss der verschiedenen Arten der radioaktiven Strahlung. Die Bestimmung des exakten Designs ist für die Beschleuniger-, Kompressorring-, Targetstation-, Blanket-, und Instrumentenabschirmung außerordentlich wichtig. Überdimensionierte Abschirmung verursacht immense zusätzliche Kosten; unterdimensionierte Abschirmung führt zu unzureichendem Schutz sowie einer Reduktion der Intensität der Quelle und letztendlich zu Leistungsminderung der Anlage.

Dementsprechend muss die Abschirmung exakt optimiert werden, was zur Folge hat, dass die genauen Anforderungen zur Bestimmung des Abschirmungsdesigns festgelegt werden müssen.

In einem Spallationssystem befinden sich verschiedene Anlagenkomponenten (wie z.B. Beschleuniger, Kompressorring, Targetstation, Blanket, Instrumente), die unterschiedliche Anforderungen an die jeweilige Abschirmung stellen. In den folgenden Kapiteln werden die Anforderungen gezeigt und ausführlich diskutiert.

In der Auslegung der Abschirmung eines Spallationssystems müssen aber zusätzlich die Charakteristiken der radioaktiven Quelle in Betracht gezogen werden. Für die Auslegung der Abschirmung sollen daher zuerst folgende allgemeine Abschirmungsaspekte in Betracht gezogen werden:

Tab. 5-1: *Allgemeine Abschirmungsaspekte*

Abschirmungsaspekte	Beschreibung
Standort des Spallationssystems	geographische Gegebenheiten und Eigenschaften (Bodeneigenschaften, Erdbebensicherheit etc.), Infrastruktur in der Anlagenumgebung, zivile Bauten in der Nähe etc.
Parameter (Typ, Strahlungsleistung, Intensität) des Spallationssystems	Identifizierung und Definition der möglichen Strahlungsquellen
Ziel der Abschirmung	Identifizierung der Zugangsbereiche mit Strahlenschutzgrenzwerten, Definition der Normalbetrieb- und Betriebsstörungsverluste
Stand der Abschirmungstechnik	Technische Möglichkeiten und Beschränkungen im Bau der Abschirmung
Späterer Rückbau	Festlegung des Rückbaugrades (z. B. „Grüne Wiese“ etc.), Festlegung der Lebensdauer der Anlage

Die Abschirmung in einem Spallationssystem ist ein Bestandteil der Beschleuniger-, Targetstations- und Instrumentenhallebauten. Die Planung und das endgültige Layout der Abschirmung muss daher mit allen anderen Bereichen der Anlage abgestimmt werden. Das endgültige Abschirmungslayout wird in mehreren Iterationen und Entwürfen durch die Ingenieure, Wissenschaftler und Betreiber der Anlage bestimmt. Die wichtigste Aufgabe bei der Planung der Abschirmung ist ein kostenoptimierter Entwurf, der alle Anforderungen an die Abschirmung des Spallationssystems erfüllt.

Die Tab. 5-2 zeigt den Einfluss der Anlagenparameter auf konzeptionelle Aspekte und die daraus resultierenden Abschirmungsanforderungen.

Tab. 5-2: Einfluss der Spallationsanlagenparameter auf die Abschirmungsanforderungen

Spallationsanlagen-Parameter	Konzeptionelle Aspekte	Abschirmungsanforderungen
Maximale Energie	Mit Energiezunahme ändern sich die in der Abschirmung dominierenden physikalischen Prozesse.	Je nach max. Energie; Auslegung der Abschirmung gegen: langsame oder schnelle Neutronen, Myonen etc. Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit der erzeugten Hochenergieteilchen etc.
Intensität	Die Abschwächungsanforderungen und Abschimmungsspezifikationen sind proportional zu Intensität der Quelle. Eventuelle zukünftige Steigerung der Intensität würde ferner zu zusätzlichen Kosten für die Vergrößerung der Abschirmung führen.	Auswahl der entsprechenden Abschirmungsmaterialien. Ausreichende rechnerische Auslegung der Abschirmung. Großräumiger Bau der Abschirmung für eventuelle zusätzliche Vergrößerung der Abschirmung. Ausreichende Auslegung der Strahlstopper
Leistung	Die Quellenleistung hat direkten Einfluss auf die Strahlenschädigung der Strukturmaterialien. Die Quellenleistung ist proportional zur Wärmereposition in der Abschirmung vor allem in der direkten Umgebung des Targets.	Auswahl der entsprechenden Materialien. Wenn erforderlich Behandlung der Abschirmungsmaterialoberflächen Redundante Auslegung der Kühlung Design der Abschirmungskühlstrukturen
Protonenstrahlverluste	Protonenstrahlverluste lassen sich nicht vermeiden. Sie können jedoch durch entsprechende Instrumentation und Monitoring minimiert werden. Die Strahlverluste (erwartete und unerwartete) müssen an verschiedenen Anlagenteilen bestimmt werden.	Abschätzung und rechnerische Auslegung der Abschirmung adäquat zu den Strahlverlusten. Entsprechende Ausführung und Anordnung der Abschirmung an verschiedenen Anlagenteilen (Target, Strahlstopper, Kollimatoren).
Protonenstrahleintritt	Protonenstrahl kann horizontal oder vertikal von oben oder unten auf das Target eintreffen.	Entsprechende Ausführung und Anordnung der Abschirmung. Berücksichtigung der Sky- und Groundshinproblematik.
Abschirmungsphilosophie	Es soll festgelegt werden, welche Abschirmungsbereiche für die Wartungsarbeiten und bis zu welchem Ausbaugrad geöffnet werden können. Handhabungsvorgänge und Handhabungskonzepte müssen für die Wartungs- und Reparaturarbeiten festgelegt werden. Festlegung des Rückbaugrades nach der Stilllegung der Anlage.	Ausführung der beweglichen Abschirmung in den erforderlichen Bereichen. Eventuelle Durchführung der Wartungsluken durch die Abschirmung. Planung der entsprechend abgeschirmten Wartungsbereiche, Abstellplätze. Planung mobiler Abschirmungen für Handhabungsvorgänge. Ausführung der Abschirmung geeignet für event. Rückbau (Größen der Abschirmblöcke, Füllung der Spalten zwischen Blöcken etc.)
Instrumentenabschirmung	Festlegung der Anzahl der Neutronenstrahlrohre rund um das Target. Wahl der Art der Strahlverschlüsse in den Neutronenstrahlrohren mit Positionierung der Neutronenleitereinschübe. Festlegung der Art der Instrumente und Zuordnung der jeweiligen Instrumente zu den Strahlrohren. Festlegung der Zuständigkeit für den Bau der Instrumentenabschirmung (Anlagenbetreiber, Instrumentator, Nutzer).	Abschirmungsdesign für die vorgegebene Zahl der Neutronenstrahlrohre. Ausführung der Strahlverschlüsse entsprechend den Dosisgrenzen am Probenort. Design der Strahlverschlüsse. Planung der Durchführungen für die Wartungsarbeiten. Ausführung der Schnitt- und Übergabestellen an die Instrumentenabschirmung.

In Anlehnung an Ref. /Fas 90/ wurde ein Leitfaden in Form einer Tabelle (Tab. 5-3) für die Erstellung der Abschirmungsspezifikationen der Spallationsanlage definiert: Dieser Leitfaden kann dem Sicherheitsingenieur oder dem Strahlenschutz als Hilfe bei der Erstellung der Abschirmungsspezifikation oder Abschirmungsanforderungen dienen.

Tab. 5-3: Leitfaden für die Erstellung der Abschirmungsspezifikation

<b>Reihenfolge</b>	<b>Spezifikation</b>
1.	Aufteilen der Anlage entsprechend den funktionellen und baulichen Anforderungen
2.	Entwerfen des groben Anlagenlayouts
3.	Identifizierung und Definition der möglichen Strahlenquellen
4.	Definition der Strahlung in verschiedenen Betriebsarten (Betrieb, Wartung, Reparatur und anomaler Betriebszustand),
5.	Definition der max. Dosisgrößen für alle Zugangs- und Betriebsbereiche
6.	Definition der max. Dosisgrößen für die Bereiche außerhalb der Anlagengrenze
7.	Abschätzung der Schwächungslängen für alle Strahlungsquellen und Bereiche
8.	Definierung und Abschätzung der Abschirmung und Abschirmungsmaterialien in Bezug auf die abzuschirmenden Strahlungsarten (Neutronen-, Elektronen-, Myonen-Strahlung, sowie Ground- und Skyshine)
9.	Exakte Berechnung der Abschirmung mittels angewandter Programme, Entwurf des vorläufigen Abschirmungslayouts
10.	Untersuchung und Prüfung der eventuellen Berührungspunkte mit anderen Bereichen vor dem endgültigen Design der Abschirmung
11.	Design der Abschirmung

## 5.1 Abschirmungsarten in einem Spallationssystem

Ein Spallationssystem kann funktions- und anordnungsbedingt in zwei sicherheitstechnisch fast unabhängige Bereiche aufgeteilt werden:

- Der Beschleunigerteil mit dem Speicherring oder auch Synchrotron– hier werden Protonen produziert und auf ihre Endenergie entlang des geraden Beschleunigers gebracht und je nach Anlagenauslegung danach im Speicherring kumuliert und weiter in kurzen Pulsen auf das Target geschossen.
- Die Targetstation, mit dem Target, Blanket, Experimentiereinrichtungen und der integrierten Wartungszelle.

Diese Anordnung bewirkt, dass die sicherheitsrelevanten Anlagenteile entkoppelt und damit separat betrachtet werden können. Lediglich der Protonenstrahl selbst bildet eine Verknüpfung, der über seine Betriebs- und Abschaltkriterien beide Bereiche funktional verbindet.

In den neusten Hochleistungsanlagen liegt die Strahlleistung hoch, im Bereich einiger Megawatt, was sich unmittelbar auf die Größe der induzierten Streustrahlung auswirkt und größere Abschirmdicken fordert.

Bei der Abschirmung einer Targetstation muss das Hauptaugenmerk auf die Auslegung der Abschirmung gegen den Anteil an hochenergetischen Neutronen, der während der intranuklearen Kaskade aus dem Target freigesetzt wird, gelenkt werden. In der Spallationsquelle wird diese Abschirmung in der horizontalen Ebene von den Strahlrohren für die Auskopplung der Neutronenstrahlen durchdrungen. Hier soll das Abschirmungskonzept sicheren Verschluss der Strahlrohre sowie die notwendigen Abschirmdicken an den Neutronenleiter, Probenorten und Instrumenten gewährleisten.

In der Abbildung 5.1-1 ist der Aufbau am Beispiel der ISIS Spallationsquelle (GB) dargestellt.

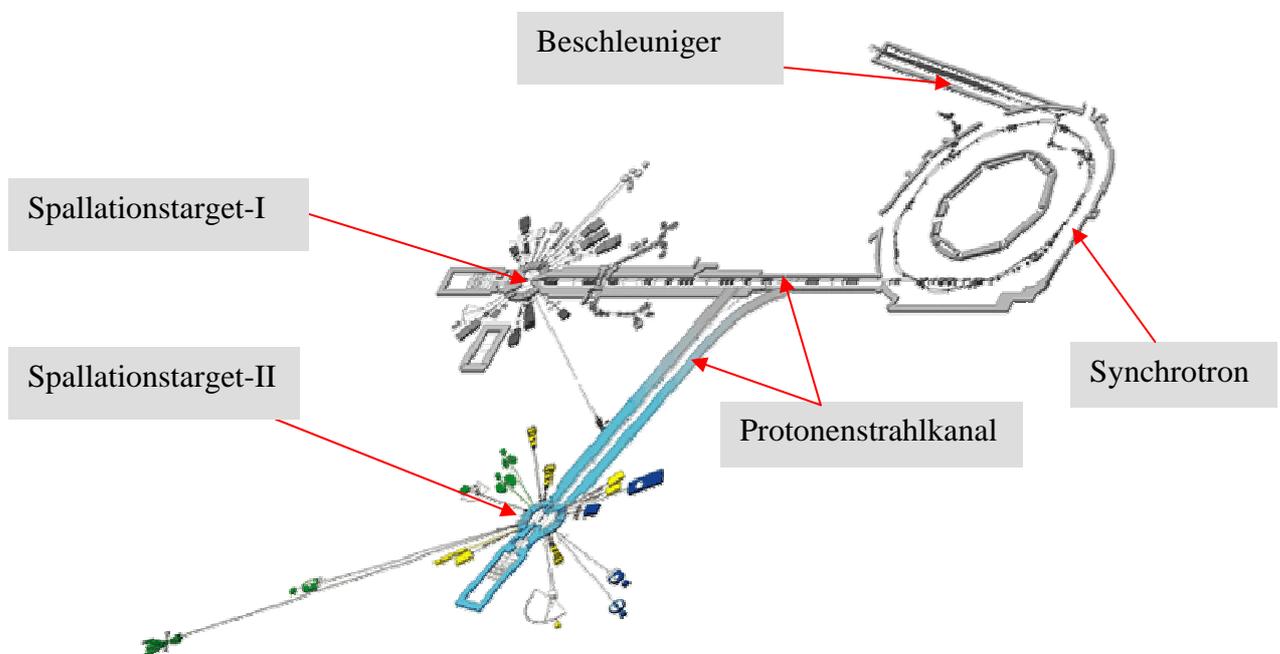


Abb. 5.1-1: ISIS Spallationsquelle (GB)

Aufgrund der aufgelisteten Sicherheitsanforderungen muss die Abschirmung praktisch für jede Komponente in dem Spallationssystem separat betrachtet werden. Bei der Abschir-

mungs-Auslegung für die verschiedenen Anlagenkomponenten ist es äußerst wichtig, die wesentlichen physikalischen und technischen Vorgaben exakt zu definieren.

Tabelle 5.1-1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Abschirmungsarten in einer Spallationsanlage und deren Eigenschaften. In den weiteren Kapiteln dieser Arbeit werden die entsprechenden Anforderungen und die jeweiligen konzeptionellen und sicherheitstechnischen Umsetzungen der Abschirmung der Anlagenkomponente diskutiert.

Tab. 5.1-1: Abschirmungsarten und deren Eigenschaften

Abschirmungs- Arten	Strahlungsursache	Realisierbarer Aufbau der Abschirmung	Schutzgut
Abschirmung in der Injektorhalle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protonenstrahlverlust (Energie bis 2 MeV)</li> <li>Elektronenstrahlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normalbeton umhüllt mit Erdreich (siehe Kap. 6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebspersonal</li> <li>Öffentlichkeit außerhalb der Anlage</li> </ul>
Beschleuniger und Speicherringabschirmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normale und anomale Protonenstrahlverluste (Energie bis zu einigen GeV)</li> <li>daraus resultierende Sekundärstrahlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beschleuniger- und Speicherringröhre unterirdisch</li> <li>Normalbeton umhüllt mit Erde (Siehe Kap. 6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebspersonal</li> <li>Öffentlichkeit außerhalb der Anlage</li> </ul>
Abschirmung des Protonen- und Neutronenstrahlfängers	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vernichtung des primären Beschleunigerstrahls</li> <li>Vernichtung des Neutronenstrahls</li> <li>Sekundärstrahlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gekühlter Eisenkern mit Betonmantel</li> <li>Modularer Aufbau des Strahlfängers</li> <li>Abschirmung integriert in Beschleunigerstrukturen (Siehe Kap. 6) und in den Targetstationstrukturen (siehe Kap. 7)</li> <li>Mehrschichtiger Aufbau für Neutronenstrahlfänger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten</li> <li>Nutzer in der Instrumentenhalle</li> <li>Neutronenstreuemessungen in der Instrumentenhalle</li> </ul>
Abschirmung der Protonenstrahlführung zum Target	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normale und anomale Protonenstrahlverluste (Energie bis zu einigen GeV)</li> <li>Protonenstrahlverluste und Streuung an den Kollimatoren und Protonenstrahlfenster</li> <li>Sekundärstrahlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Wände des inneren Strahlungsführungskanals-Normalbeton</li> <li>Untere und seitliche ortsfeste Stahlabschirmung</li> <li>Bewegliche obere Stahlabschirmung</li> <li>Bewegliche Betondecke aus Normalbeton (siehe Kap. 6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten</li> <li>Nutzer in der Instrumentenhalle</li> </ul>
Abschirmung des Target- und Blanketsstation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vollständiger Protonenstrahlverlust im Target mit max. Energie</li> <li>Hochenergetische Neutronen</li> <li><math>\gamma</math>- und Sekundärstrahlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Äußere Abschirmung – ortsfeste Stahl- oder Gusseisenabschirmung</li> <li>Innere Abschirmung – bewegliche Edelstahl- oder beschichtete Gusseisenabschirmung</li> <li>Bewegliche Betondecke aus Normal- bis zum Schwerstbeton</li> <li>Betonsockel sowie Betonhülle um die Targetstation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten</li> <li>Nutzer in der Instrumentenhalle</li> <li>Öffentlichkeit außerhalb der Anlage</li> </ul>

Abschirmungs- Arten	Strahlungsursache	Realisierbarer Aufbau der Abschirmung	Schutzgut
Abschirmung der Wartungszelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\gamma</math>- und Sekundärstrahlung von aktivierten Materialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicke Betonabschirmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wartungspersonal</li> </ul>
Abschirmung der Neutronenleiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langsame Neutronen</li> <li>• Streuung der Neutronen an den Chopper, Monochromatoren</li> <li>• Reflexionsverluste an den Neutronenleitern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stahl- und Bleiabschirmung um den Chopper</li> <li>• Bleiabschirmung rund um Neutronenleiter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzer in der Instrumentenhalle</li> <li>• Experimentatoren</li> <li>• Minimierung des Untergrundes der Experimente</li> </ul>
Abschirmung des Probenortes und der Instrumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neutronenstreuung am Probenort</li> <li>• Neutronen ohne Wechselwirkung mit der Probe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehrschichtige Abschirmung des Probenortes und Instrumentes bestehend je nach Ausführung aus Bor-<sup>10</sup>B, Cadmiumblechen, <sup>6</sup>Li-Plastik, Polyethylen, Blei und Betonschichten</li> <li>• Strahlfänger in der Verlängerung des Neutronenflugweges Materialzusammensetzung wie oben beschrieben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzer in der Instrumentenhalle</li> <li>• Experimentatoren</li> <li>• Minimierung des Untergrundes der Experimente</li> </ul>

## 5.2 Designanforderungen an die Abschirmung eines Spallationssystems

Im vorherigen Kapitel wurden verschiedene Abschirmungsarten in der Abschirmung von Spallationssystem aufgelistet. Daraus resultieren die Anforderungen an das Design einer Abschirmung im Spallationssystem. Die Abschirmung kann kaum als eine monolithische Struktur ausgeführt werden. Sie besteht in der Regel aus mehreren separaten Blöcken. Das Gewicht der einzelnen Blöcke soll möglichst 60 t nicht überschreiten. Die Handhabung (Herstellung, Transport, Aufbau und späterer Abbau) ist bei schwereren Blöcken kaum möglich. Selbstverständlich müssen entsprechende Toleranzen zwischen den einzelnen Abschirmungsblöcken eingehalten werden. Die entstehenden Spalte zwischen den Einzelblöcken sollen konstruktiv so versetzt werden, dass eine ausreichende Überdeckung der direkten Linie zwischen Quelle und zu schützendem Objekt gegeben ist. Die Minimierung der Spalte, sowie eventuelle Verfüllung mit verschiedenen Materialien muss bei der Auslegung der Abschirmung berücksichtigt werden (siehe Kap. 7).

Einige Teile der Protonenstrahlführungsabschirmung oder Targetabschirmung müssen demontierbar sein, so dass hier keine Verfüllung möglich ist. Hier sollten andere Lösungen verwendet werden (siehe Kap. 7).

Sehr oft müssen die Abschirmungsstrukturen aktiv gekühlt werden, z.B. die innere Targetblockabschirmung in der Targetstation oder auch Blanketumgebungstrukturen. Hier müssen die Rohrleitungen so verlegt werden, dass keine geradlinigen Durchbrüche entstehen. Andernfalls könnten an der Oberfläche der Abschirmung sog. Hot Spots (Stellen hoher Ortsdosisleistung) entstehen. Eine wichtige Anforderung an die Abschirmungsstrukturen ist das Vermeiden von Korrosion. Vor allem der Bereich der beweglichen Abschirmungsblöcke muss

frei von Korrosionsstäuben sein, die die Umgebung kontaminieren können. Solche Abschirmungsbereiche sollten entweder aus rostfreiem Material ausgeführt sein oder es sollten die Oberflächen der Blöcke beschichtet werden. Während des Betriebes der Anlage kommt es zu Temperaturschwankungen, was zur Bildung und Ansammlung von Kondenswasser führen könnte. Die Abschirmungsausführung an solchen Stellen muss die Ableitung des Kondenswassers gewährleisten. Das Abschirmungsdesign muss den Zugang zu den wichtigen Komponenten bei Wartungsarbeiten oder Reparaturen gewährleisten. Die Entfernung der Abschirmblöcke soll in solchen Fällen möglichst ohne großen Aufwand stattfinden können. Dabei müssen auch während der Wartungs- und Reparaturarbeiten an aktivierten Teilen Strahlenschutzmaßnahmen unbedingt eingehalten werden.

### 5.3 Sky- und Groundshine Phänomene

Einer der wichtigsten Aspekte in der Beschleuniger- und Targetabschirmungsauslegung ist der sog. Sky- und Groundshine-Effekt. Dieser Effekt wird durch indirekte Strahlung (Sekundärteilchenstrahlung) einer Strahlungsquelle verursacht, die nach Rückstreuung an den Atomen der Luft, des Erdbodens oder benachbarter Gebäude entsteht. Dies kann zur Kontamination der Umgebungsatmosphäre und des Grundwassers führen. Das Phänomen wurde schon an mehreren Beschleunigeranlagen (Cosmotron-BNL, Bevatron-LBL, Fermilab und andere) festgestellt. Dort wurden erhöhte Dosiswerte in der Luft sowie erhöhte Radioaktivität im Boden gemessen.

Im Allgemeinen spielt dieser Effekt nur bei nicht genügend abgeschirmten Neutronenquellen (Beschleuniger oder Targetstationen) eine Rolle. Das Interessante dabei ist, dass die erhöhten Dosiswerte in erheblich großen Entfernungen von der Quelle gemessen wurden. Die Abb. 5.3-1 veranschaulicht das Phänomen.

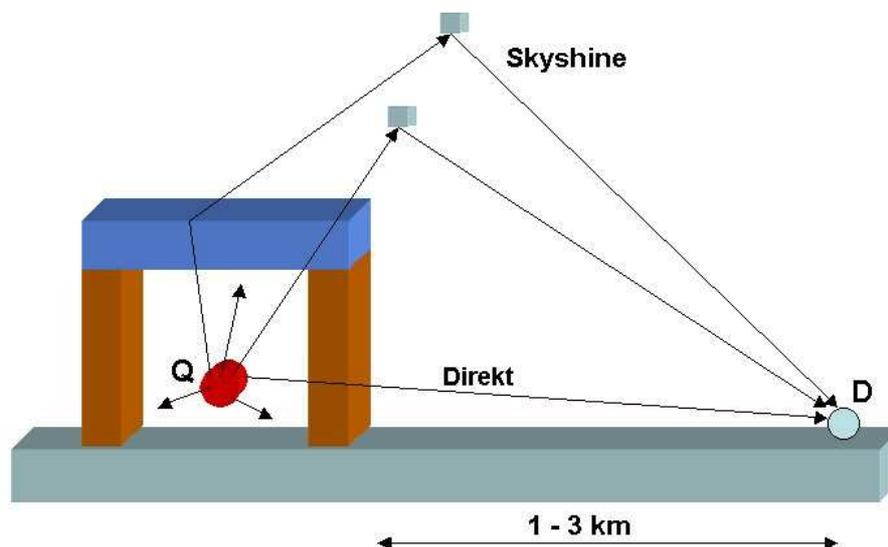


Abb. 5.3-1: Schematische Darstellung des Skyshine-Effektes

Den ersten Versuch das Skyshine - Phänomen rechnerisch zu erfassen, findet man schon in den 60-er Jahren bei Lindenbaum /Lin 61/. Patterson und Thomas /Pat 73/ verwenden zur Anpassung an ihre Messwerte folgende Formel:

$$\Phi(r) = \frac{aQ}{4\pi r^2} (1 - e^{-r/\mu}) e^{-r/\lambda} \quad [\text{GL. 5.3-1}]$$

mit:

$\Phi(r)$	=	Neutronenflussdichte [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
a	=	2,8 (empirischer buildup Faktor)
r	=	Abstand von der Quelle in [m] $r > 20\text{m}$
$\lambda$	=	Abschwächungslänge für hochenergetische Neutronen in [m]
$\mu$	=	Diffusionskoeffizient in [m] ca. 56 m
Q	=	Quellstärke, die in der Zahl der emittierten Neutronen in [ $\text{s}^{-1}$ ] in die Rechnung eingeht

Der wichtigste Parameter, die Abschwächungslänge  $\lambda$ , ist von der Energie der Neutronen abhängig. Die Werte von  $\lambda > 830\text{ m}$  (Luftabschwächungslänge  $= 100\text{g/cm}^2$ ) sind für hochenergetische Neutronen ( $E > 150\text{ MeV}$ ) gemessen worden. Cossairt und Coulson /Cos 85/ geben für  $\lambda$  anhand einer Untersuchung von anisotropischen Skyshinequellen mit extrem dünner Abschirmung den Wert bis zu 1200 m an.

Für die Bestimmung der Neutronenflussdichte mittels [GL. 5.3-1] sollte man wie folgt vorgehen:

- Abschätzung der Neutronemissionsrate aus der Quelle. Das kann anhand der Informationen über Neutronenspektrum, mittlere Energie und Intensität der Quelle geschehen.
- Abschätzung des  $\lambda$ -Wertes in Abhängigkeit von der Neutronenenergie

Stevenson und Thomas /Ste 84/ stellten eine alternative Gleichung für die Skyshine-Berechnung auf. Sie ist von der [GL. 5.3-1] unter folgenden Annahmen abgeleitet:

- Das Neutronenenergiespektrum hat bis zu Protonenenergie die Form  $1/E$ ,
- Die Neutronen werden in einem Raumwinkel von  $35\text{-}40^\circ$  emittiert.

Die abgeleitete Formel wird wie folgt aufgestellt:

$$\Phi(r) = \frac{Q'}{4\pi r^2} e^{-r/\lambda} \quad [\text{GL. 5.3-2}]$$

In dieser Formel ist der buildup Faktor nicht vorhanden, deswegen gilt sie nur für große Distanzen ( $r \gg 56\text{m}$ ). Die Quellstärke  $Q'$  ist schon mit dem Faktor 2,8 multipliziert.

Die Werte für den wichtigsten Parameter  $\lambda$  werden als Funktion der Neutronenenergie für  $1/E$  Neutronenspektren in der Abb. 5.3-2 dargestellt:

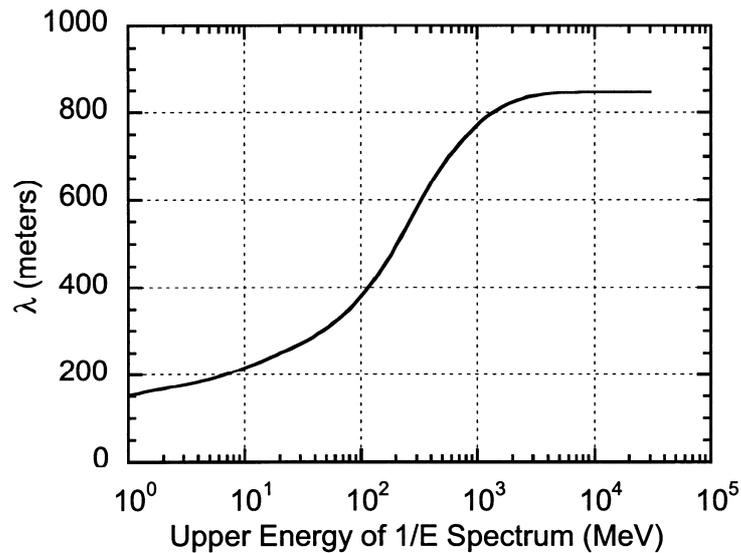


Abb. 5.3-2: Abschwächungslänge in der Luft in Abhängigkeit von der Neutronenenergie für 1/E Neutronenspektren (nach /Ste 84/)

Stevenson und Thomas berechneten auch die Äquivalentdosis in Abhängigkeit von 1/E Neutronenspektren und Abstand von der Quelle. Die Berechnungen sind nur für größere Distanzen ( $r \gg 40\text{m}$ ) gültig. Aus dem semi-logarithmischen Graphen (Abb. 5.3-3) wurde durch Extrapolation für  $r=0$  die Äquivalentdosis zwischen  $1,5 \times 10^{-15}$  und  $3 \times 10^{-15}$  Sv  $\text{m}^2/\text{Neutron}$  ( $1,5 \times 10^{-13}$  und  $3 \times 10^{-13}$  rem  $\text{m}^2/\text{Neutron}$ ) ermittelt. Stevenson und Thomas leiteten daraus folgende Formel für die Berechnung der Äquivalentdosis pro emittiertes Neutron ab:

$$H(r) = \frac{3 \times 10^{-15}}{r^2} e^{-r/\lambda} \quad [\text{GL. 5.3-3}]$$

mit

- |           |   |   |
|-----------|---|---|
| $H(r)$    | = | Äquivalentdosis in [(Sv / emittiertes Neutron)]                   |
| $r$       | = | Abstand von der Quelle in [m] $r > 100\text{m}$                   |
| $\lambda$ | = | Abschwächungslänge [m] für hochenergetische Neutronen in der Luft |

Um die totale Äquivalentdosis zu bestimmen, muss man nur die Zahl der emittierten Neutronen aus der Abschirmung berechnen. Diese wiederum kann aus den Messungen der Äquivalentdosis über dünne Abschirmungen abgeleitet werden. Der Quotient aus diesen Äquivalentdosiswerten und Konversionsfaktoren für Neutronen der bestimmten Energien liefert Näherungswerte für die Anzahl der emittierten Neutronen (vergl. /Cos 04/)

Die Empfehlung der International Commission on Radiological Protection (ICRP) (siehe Ref /ICRP 51/) enthält eine Reihe von Konversionsfaktoren für Neutronen, Protonen und geladenen Pionen bis 10 TeV (siehe auch Ref. /Ste 84/, /Sch 90/).

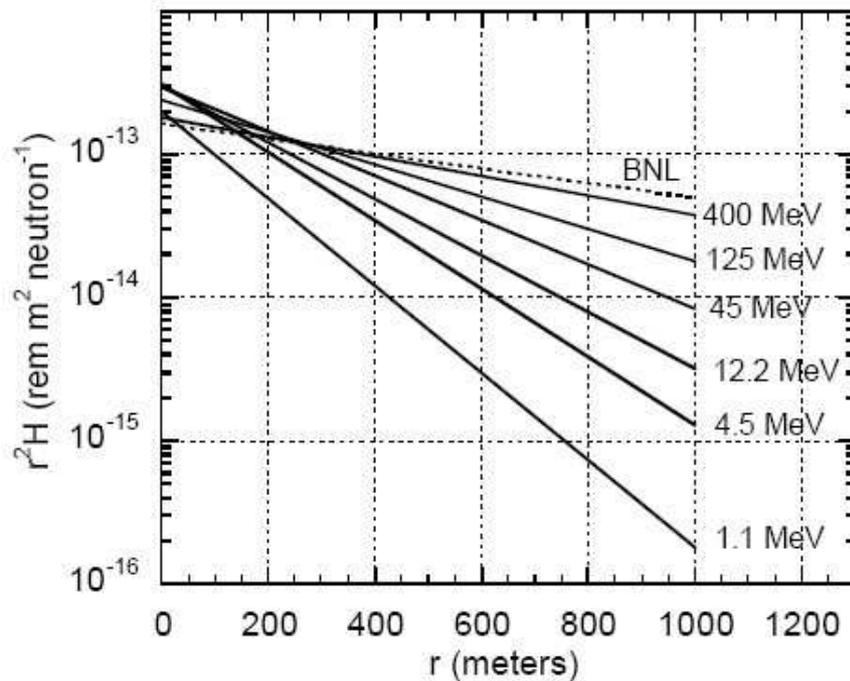


Abb. 5.3-3: Äquivalentdosis mit dem Abstand zur Quelle für  $1/E$  Neutronenspektrum in Abhängigkeit von verschiedenen Neutronenenergien (nach /Cos 04/). Die punktierte Kurve zeigt Messergebnisse von Messungen am BNL ( Brookhaven National Laboratory) (1 rem=0,01 Sv)

Die Extrapolation in der [GL. 5.3-3] ist jedoch erst ab 100 m gültig, weil der exponentielle buildup –Faktor in der Nähe der Strahlungsquelle nicht berücksichtigt ist.

Einige andere Autoren verwenden komplexe Rechenmethoden für die Berechnungen der Äquivalentdosis bei Skyshine-Problematik. Alsmiller, Barish, und Childs verwenden das Diskrete-Ordinaten Transportprogramm DOT /Als 81/, Nakamura und Kosako benutzen den Monte Carlo Code MORSE /Nak 81/.

Eine sehr interessante Analyse der Abschirmungsprobleme und des Einflusses der sekundären Leckagestrahlung durch das Abschirmsystem auf die Umgebung bis zu einem Bereich von ca. 1,5 km in der Atmosphäre wurde in Ref. /Zaz 87/ durchgeführt. Für die Simulation des Teilchentransports bis zu 1,5 km in der Atmosphäre wurde das 2-dimensionale  $S_N$ -Programm DOT IV mit dem HETC des HERMES-Systems gekoppelt. Dabei wurde als Referenz für die Simulation die Hochstromspallationsquelle (SNQ) und deren Targetsystem studiert.

In /Zaz 87/ wurden u.a. einige Unterschiede im Verhalten in großer Entfernung von der Targetstation zwischen Teilchenfluss, Äquivalentdosis, Energiedosis und induzierter Radioaktivität dargestellt.

Das Teilchenspektrum in Luft ist in der Nähe der Oberfläche der Abschirmung durch Neutronen  $<20$  MeV dominiert. Mit zunehmender Entfernung werden diese Neutronen absorbiert, was zu steigender Photonproduktion führt. Die hochenergetischen Neutronen haben Reichweiten in der Luft bis zu einigen 100 Metern. Deswegen tragen dieser Hochenergie-Neutronenanteil und die Photonkomponente erst in einer Entfernung von über 1000 m zur Dosisrate bei. Die Neutronenspektrumverhärtung ist als ein typischer Skyshine-Effekt zu betrachten. In Abb. 5.3-4 sind die relativen Anteile an der Äquivalentdosis der verschiedenen Teilchen dargestellt.

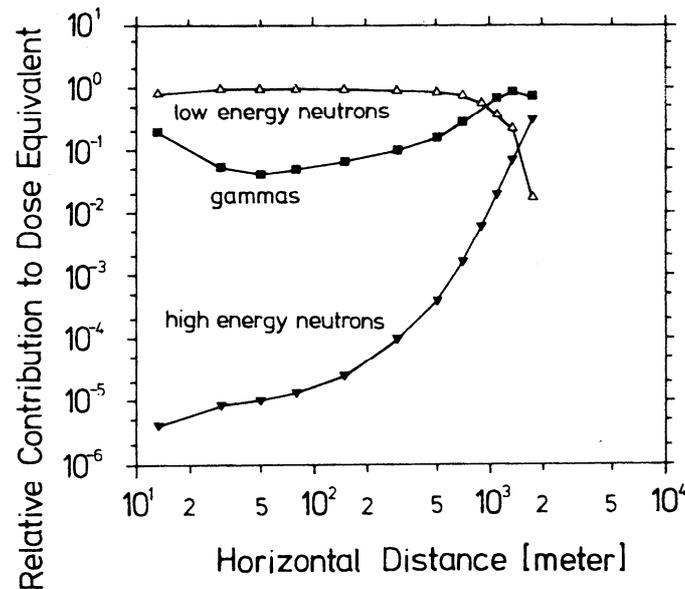


Abb. 5.3-4: Relative Anteile an der Äquivalentdosis in der Atmosphäre von Hochenergieneutronen (20 MeV – 1,1 GeV), Neutronen < 20 MeV und Photonen in horizontaler Entfernung von der Targetstation (für 1,1 GeV und 5,5 MW Protonenstrahlleistung) /Zaz 87/.

Aufgrund der Hochenergieteilchenreaktionen können in der Luft leichte Isotope wie  $^7\text{Be}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{N}$  entstehen. Die Ergebnisse der Transportrechnungen für SNQ durch Zazula und Filges zeigen, dass die induzierte Radioaktivität verglichen mit der erlaubten Konzentration in diesem Fall keine wichtige Rolle spielt (siehe Tab. 5.3-1). Auch bei solchen klaren Ergebnissen muss die Ortserhöhung der Kontamination durch Öffnungen oder Schwachstellen in der Abschirmung betrachtet werden.

Tab. 5.3-1: Maximale induzierte Radioaktivität in der Atmosphäre außerhalb der Targetstation (1,1 GeV Protonenstrahl, 5 mA Strahlstrom)/Fil 92/

Isotop	Maximale induzierte Radioaktivität in der Atmosphäre (Luft) [Becquerel]	Erlaubte Konzentration nach Ref. /Rin 75/ [Becquerel].
$^3\text{H}$	$3,2 \times 10^2$	$7,4 \times 10^7$
$^7\text{Be}$	$2,6 \times 10^0$	$2,2 \times 10^5$
$^{11}\text{C}$	$7,5 \times 10^1$	$3,0 \times 10^5$
$^{13}\text{N}$	$5,2 \times 10^2$	$1,9 \times 10^5$
$^{15}\text{O}$	$1,4 \times 10^2$	$1,1 \times 10^4$
$^{16}\text{N}$	$7,1 \times 10^1$	$3,7 \times 10^3$

Auch die Bestimmung der Erdbodenaktivierung aufgrund von Groundshine-Effekten muss für die Auslegung der Abschirmung in Betracht gezogen werden. Die Leckageneutronenflüsse in der Umgebung von Spallationsanlagen wechselwirken mit dem Erdreich und verursachen die Erdbodenaktivierung. In der Tab. 5.3-2 sind einige Leitnuclide aufgelistet, die durch Neutronenreaktionen im Erdboden entstehen.

Tab. 5.3-2: Leitnuklide mit Neutronen Schwellreaktionen zur Berechnung der Erdbodenaktivierung nach /Fil 92/

Co	→	$^{60}\text{Co}$ -(T1/2 = 5,3 a)
Mn	→	$^{56}\text{Mn}$ -(T1/2 = 2,6 h)
$^{24}\text{Mg}$	→	$^{22}\text{Na}$ -(T1/2 = 2,6 a), $^{24}\text{Na}$ -(T1/2 = 15 h)
$^{25}\text{Mg}$	→	$^{22}\text{Na}$ -(T1/2 = 2,6 a), $^{24}\text{Na}$ -(T1/2 = 15 h)
$^{26}\text{Mg}$	→	$^{22}\text{Na}$ -(T1/2 = 2,6 a), $^{24}\text{Na}$ -(T1/2 = 15 h)
$^{27}\text{Al}$	→	$^{22}\text{Na}$ -(T1/2 = 2,6 a), $^{24}\text{Na}$ -(T1/2 = 15 h)
151Eu	→	$^{152}\text{Eu}$ -(T1/2 = 13,33 a)

Die Aktivierungsrechnungen mit den Querschnitten der oben angegebenen Leitnuklide sowie mit einem detaillierten Nuklidinventar sind für eine spätere Bodenentsorgung sehr wichtig. Die durchgeführten Aktivierungsberechnungen für SNQ haben ergeben, dass die Werte für nur wenige Nuklide (wie  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ) an dem kritischen Punkt des Beschleunigers (Zone des höchsten Flusses) unwesentlich die Freigrenze von 10  $\mu\text{Sv/a}$  nach Strl.Sch.V. /SSV 01/ überschreiten.

Dabei sind die kurzlebigen Nuklide  $^{24}\text{Na}$  und  $^{56}\text{Mn}$  für den späteren Abbau unproblematisch. Die langlebigen Nuklide  $^{60}\text{Co}$  und vor allem  $^{152}\text{Eu}$  bestimmen die Freigabe für die Entsorgung der Bodenschichten. Weitere Rechnungen ergaben, dass ab einer Bodentiefe von 65 cm die Werte unterhalb der Freigrenze lagen.

Die Leckageneutronen können auch das Grundwasser aktivieren. Dies muss bei der Abschirmung der Quelle in Bodenrichtung berücksichtigt werden.

## 6 Konzeptionelle und technische Umsetzung der Beschleunigerabschirmung.

Voraussetzung für den Bau von hochintensiven Spallations-Neutronenquellen ist die Entwicklung immer leistungsstärkerer Protonbeschleuniger. Während praktisch alle bestehenden Spallations-Neutronenquellen an Beschleunigern aufgebaut wurden oder Komponenten von Beschleunigern nutzen, die ursprünglich für andere Zwecke gebaut wurden, werden für die jetzt im Bau befindlichen oder zur Realisierung vorgeschlagenen Spallationsquellen speziell für diesen Zweck ausgelegte Beschleuniger entwickelt. Mit Ausnahme der SINQ sind alle Spallations-Neutronenquellen vom gepulsten Typ, was auch bei geringeren mittleren Neutronenflüssen eine effektive Nutzung der Neutronen ermöglicht. Aus diesem Grund wird bei gepulsten Spallations-Neutronenquellen, im Gegensatz zu Reaktoren, allgemein nicht der mittlere Neutronenfluss, sondern die Leistung des treibenden Strahls als Maß für ihre Stärke angegeben. Die derzeit einzige gepulste Neutronenquelle, ISIS in Großbritannien nutzt einen Protonenstrahl von 160 kW, während die Quellen der neuen Generation SNS (USA-1,4 MW), JSNS (Japan- 2 MW) und ESS (Europa- 2 x 5 MW) Leistungen von 1-5 MW anstreben. Der Protonenstrahl der weltweit einzigen nicht gepulsten Spallations-Neutronenquelle, SINQ am PSI (Schweiz) bewegt sich im Leistungsbereich von 0,7 MW (Tab. 6-1).

Diese modernen Teilchenbeschleuniger bestehen aus einer großen Zahl von seriellen Einzelkomponenten. Jede dieser Komponente muss eine hohe Betriebszuverlässigkeit besitzen, um eine hohe Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu erreichen.

Tab. 6-1: Hochenergetische Beschleunigersysteme für Spallationsquellen

Beschleuniger	Teilchenart	Pulslänge [ms]	Pulsfrequenz [Hz]	max. Energie [GeV]	mittl. Strom [mA]	mittl. Strahlleistung [MW]
SNQ-Linac (Studie KFA Jülich)	Protonen	0,5	100	1,1	5,0	5,5
SINQ (PSI Schweiz)	Protonen	kontinuierlich	kontinuierlich	0,59	1,2	0,7
ISIS England	Protonen	0,1	50	0,8	22	0,16
SNS Oak Ridge USA	Protonen	1,0	60	1,0	1,4	1,4
J-PARC JAERI-KEK Japan	Protonen	0,5	25	3,0	0,3	0,9
ESS Kurzpuls Studie Europa	Protonen	$1,4 \cdot 10^{-3}$	50	1,334	3,75	5,0
ESS Langpuls Studie Europa	Protonen	2,0	16,67	1,334	3,75	5,0

## 6.1 Sicherheitstechnische Anforderungen an die Beschleunigerabschirmung

Maßgeblich für die Auslegung der Abschirmung an einem Beschleuniger sind die Strahlenschutzverordnungen, die im Beschleunigeraufstellungsland gelten. Einige Länder, wie z.B. Belgien, Frankreich, Italien klassifizieren eine Spallationsanlage mit dem Beschleuniger als eine Nuklearanlage. Andere Länder, wie z.B. Deutschland, Großbritannien Schweden klassifizieren als eine Nuklearanlage nur Anlagen, wo Spaltmaterial verwendet oder erzeugt wird. Unter diesen Voraussetzungen wird eine Spallationsanlage mit Beschleuniger in diesen Ländern nicht als Nuklearanlage bezeichnet.

Unabhängig von der Klassifikation ist die Hauptaufgabe der Beschleunigerabschirmung der Schutz des Personals und der Bevölkerung gegen ionisierende Strahlung. Für alle EU Länder gelten die Direktiven und Empfehlungen der Europäischen Kommission zum Schutz der beruflich exponierten Personen und der Bevölkerung gegen ionisierende Strahlung EURO-ATOM 96/29 /Euroatom 96/. Diese Direktiven basieren wiederum auf den Empfehlungen der Internationalen Kommission ICRP.

Für alle Sicherheitsbetrachtungen der Beschleunigerabschirmung sind die Teilchen- oder auch Strahlenverluste und ihre möglichen Konsequenzen das größte erkennbare Risiko. Zu große Teilchenverluste können bei niedrigen Energien durch die geringe Eindringtiefe der Protonen Schäden durch lokale Überhitzung verursachen. Bei höheren Energien produzieren im Beschleuniger verlorene Protonen eine Sekundärstrahlung (insbesondere sekundäre Hochenergieutronen), die umfangreiche Abschirmungen erfordern (Siehe Kap. 2.2). Über längere Zeit andauernde Strahlung verursacht eine Aktivierung der Maschinenkomponenten oder Abschirmungsstrukturen. Von diesen Effekten ist die Aktivierung die schlimmste Folge möglicher Strahlverluste. Während die Aktivitäten in Luft und Kühlwasser schnell abklingen, sind die in Stahl und Kupfer erzeugten Isotope langlebig (Tab. 11-8 im Anhang): eine Wartung und Reparatur kann erheblich erschwert werden.

Strahlenverluste sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Strahlenverluste können aufgrund der Geometrie, der Toleranzen bei der Fertigung und Montage der Komponenten und durch Wechselwirkung der Teilchen im Beschleuniger mit dem Restgas im Vakuumrohr entstehen.

Aus sicherheitstechnischen Aspekten des Strahlenschutzes wird zwischen zwei Verlustarten unterschieden: Strahlverluste im **Normalbetrieb** und Strahlverluste bei **Betriebsstörungen**:

**Strahlverluste im Normalbetrieb** entstehen meistens an den Strahlstoppfern (beam dumps), Kollimatoren, Blenden und Schlitzen. Zu diesen Strahlverlusten gehören auch die kontinuierlichen Verluste, die z.B. durch Wechselwirkungen der Teilchen im Beschleuniger mit dem Restgas im Vakuumrohr entstehen. Diese kontinuierlichen Strahlverluste sind vor Inbetriebnahme sehr schwer zu bestimmen. Deshalb müssen meistens konservative Annahmen für die Verluste in Bezug auf Strahlenschutz und die Abschirmungsauslegung gemacht werden. Diese Strahlverluste bestimmen die Größenordnung der zu treffenden Strahlenschutzvorkehrungen, also auch die Abschirmungsauslegung.

Bei **Strahlverlusten durch Betriebsstörungen (sog. spontane Strahlverluste)** können ein oder mehrere Pulse in der Beschleunigeranlage verloren gehen, d.h. die ganze Energie der Pulse wird durch die Struktur des Beschleunigers aufgenommen. In solchen Fällen wirkt die Struktur wie ein Teilchenproduktionstarget für Sekundärteilchen. Erst eine genaue Analyse dieser Strahlverluste und ihren Wirkung führt zu einer sicherheitstechnischen Gesamtbeurteilung der Beschleunigeranlage bei Betriebsstörung.

In einem praktikablen Strahlenschutzkonzept eines Hochleistungsbeschleunigers sollen folgende Hauptgesichtspunkte bei der Festlegung der Strahlverluste in den verschiedenen Bereichen in Betracht gezogen werden:

- Realistische Annahme der Strahlverluste – Der projektierte Beschleuniger muss unter Berücksichtigung eines nicht zu hohen Restrisikos technisch in der Lage sein, die ausgelegte Endleistung unter Einhaltung aller Strahlenschutzauflagen tatsächlich zu erbringen.
- Genehmigungsfähige Anlage – Die Emission der luftgetragenen Radionuklide, die Boden- und Grundwasseraktivierung sowie die Dosisgrenze innerhalb und außerhalb der Bauten müssen in einem akzeptablem Rahmen entsprechend den Grenzwerten der jeweiligen internationalen- und nationalen Strahlenschutzverordnungen bleiben.
- Betriebbarkeit der Anlage – Die Wartungs- und Reparaturarbeiten müssen einen geordneten und zügigen Betrieb zulassen. Dies fordert hohe Standzeiten und niedrige Aktivierung der Beschleunigerkomponenten.
- Kostenoptimierung der Anlage – Der Aufwand für Abschirmung, Lüftungstechnik und Handhabungsgeräte sowie die Entsorgungs- und Betriebskosten müssen in einer vertretbaren Relation zur Nutzung der Anlage stehen.

Vor allem die genaue Analyse der Strahlverluste und ihrer Wirkung führt zu einer sicherheitstechnischen Auslegung der Beschleunigeranlage. Dies betrifft die Auslegungsberechnungen für die Abschirmungsdimensionen, die Luft- und Kühlwasseraktivierung sowie die Aktivierung der Beschleunigerkomponenten /Ehr 86/.

Die EUROATOM – Direktive 96/29 /Euroatom 96/ für alle EU-Länder limitiert die radioaktive Strahlenbelastung einer Anlage für die Bevölkerung (außerhalb des Betriebsgeländes) auf eine effektive Dosis von weniger als 1 mSv (inklusive Dosen von Skyshine, Inhalation etc.) (Abb. 6.1-1) im Zeitraum von 8760 h pro Kalenderjahr (siehe auch /SSV 01/). Für die beruflich strahlenexponierte Personen gilt derselbe Grenzwert von weniger als 1mSv allerdings in der Zeit von 2000 h pro Kalenderjahr. Daraus resultiert die max. zulässige Dosisleistung von 0,5  $\mu$ Sv/h. Zusätzlich fordert die EUROATOM Direktive 96/29 die Erfüllung des ALARA-Prinzips (abgekürzt aus dem Englischen As Low As Reasonably Achievable). Nach diesem Prinzip soll auch das Strahlenrisiko von Einzelpersonen unter Berücksichtigung sinnvoller und vernünftiger Maßnahmen so gering wie möglich gehalten werden. Das ALARA-Prinzip fordert also, wenn wirtschaftlich vertretbar, die Reduzierung der Dosen auf Werte unter den aufgestellten Grenzwerten.

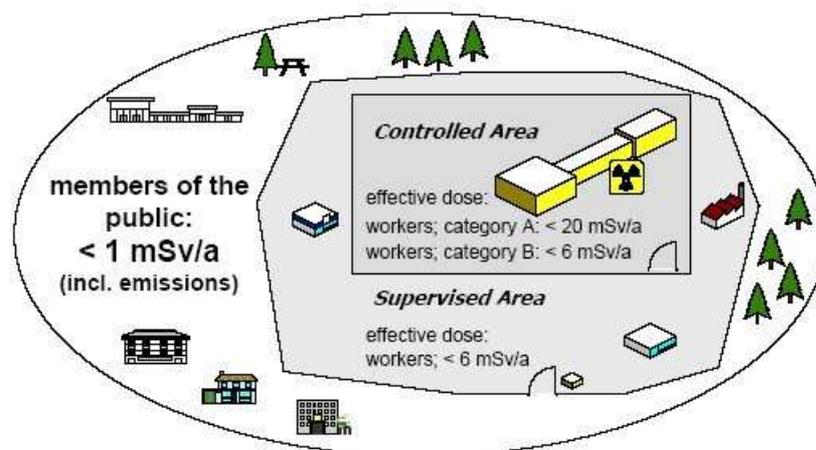


Abb. 6.1-1: Dosisleistung nach EURATOM Direktive 96/29 /Moo 04/

## 6.2 Abschirmungsanforderungen für einen Spallationsquellenbeschleuniger

Bei der Planung der Sicherheitsmaßnahmen - also auch der Abschirmung- muss berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zu einer kerntechnischen Anlage keine Aktivitäten in Form von Radionukliden vorliegen, deren Gefahrenpotenzial wie Emission, Kontamination, Inkorporation ständig akut ist. Bei einer Beschleunigeranlage beschränkt sich die Gefährdung von Personen und Umwelt auf die Strahl- bzw. Betriebszeit der Anlage, abgesehen von Aktivierung gewisser Anlagenbauteile. Bei Stromausfall wird der Anlage das Gefahrenpotenzial entzogen, da ohne Spannungsversorgung weder die Injektion von Teilchen noch die Beschleunigung funktionieren können.

Die Abschirmungen nehmen als bautechnische Maßnahmen bei der Planung der Anlagen eine Sonderstellung gegenüber anderen Sicherheitseinrichtungen (z.B. Überwachungs-Monitore oder -Kameras, Strahlrohrverschlüssen, Notschaltern etc.) ein. Die Auslegung der Abschirmung muss so früh wie möglich festgelegt werden, damit sie schon bei der Planung der Anlage berücksichtigt werden kann. Eine nachträgliche Änderung der bautechnischen Maßnahmen ist sehr schwierig. Umso wichtiger ist eine gute und detaillierte Planung, wo die entsprechenden Abschirmungsdicken berechnet und ausgelegt werden.

Maßgebend bei der Abschirmungsberechnung sind die im Aufstellungsland geltenden Dosisgrenzwerte der jeweiligen Strahlenschutzverordnung (z.B. in Europa-Euroatom Direktive 96/29).

Für die Abschirmungsberechnung müssen zweierlei Strahlungsverluste in Betracht gezogen werden: Strahlverluste im Normalbetrieb und durch Betriebsstörungen. Für das Abschirmungsdesign soll die mehr konservative Anforderung zu Grunde gelegt werden.

### Strahlverluste im Normalbetrieb

Die Strahlverluste in Hochenergieprotonenbeschleunigern werden heutzutage auf der Basis von Erfahrungen mit bestehenden und betriebenen Beschleunigeranlagen angesetzt. Hierbei wird angenommen, dass diese Verluste mehr oder weniger durch eine gleichförmige Linienquelle repräsentiert werden. Bei allen anderen Verlusten geht man von einem mehr punktuellen Strahlverlust an bestimmten Komponenten des Systems aus. Die Strahlverluste werden dann entweder durch Teilchenverlustrate oder in W/m angegeben.

Als Basis für die Auslegung der Abschirmung für verschiedene Beschleuniger (Los Alamos /Bow 83/, /Mac 88/, J-PARC /Nak 04/, SNS /San 00/, und ESS /ESS 03/, /Ber 01/) wurde ein kontinuierlicher Strahlverlust von 1 W/m zu Grunde gelegt. Die Abschirmung eines solchen Strahlenverlustes muss gewährleisten (nach /Euroatom 96/), dass die Dosisleistung den Wert 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  nicht überschreitet. Eventuelle größere Strahlenverluste führen zu dickeren Abschirmungen. In dem Projekt CONCERT /Ber 01/ wurden verschiedene Kombinationen der Abschirmungsdicke für den ESS-Beschleuniger berechnet. In den folgenden Abbildungen 6.2-1 und 6.2-2 wurden die Abschirmdicken für den hochenergetischen ESS-Beschleuniger (1,334 GeV Protonenenergie, 5 MW Strahlleistung, mittlerer Neutronenfluss  $3,1 \times 10^{14} \text{ n / (cm}^2\text{s)}$ ) für drei Dosisleistungen 0,1  $\mu\text{Sv/h}$ , 0,5  $\mu\text{Sv/h}$ , 10  $\mu\text{Sv/h}$  mit jeweils Strahlverluste von 1 W/m und 5 W/m dargestellt. Die Erhöhung der angenommenen Strahlenverluste auf 5 W/m führt zur Vergrößerung der Erdabschirmdicke um ca. 1 m.

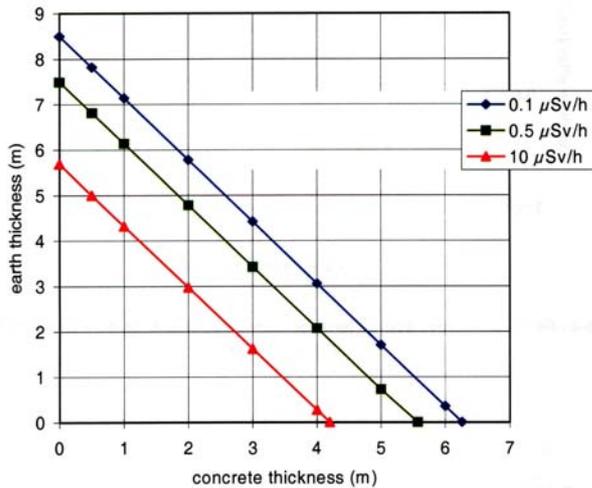


Abb. 6.2-1: Erforderliche Abschirmungsstärke für 1,334 GeV und Strahlverlust von 1 W/m /Ber 01/

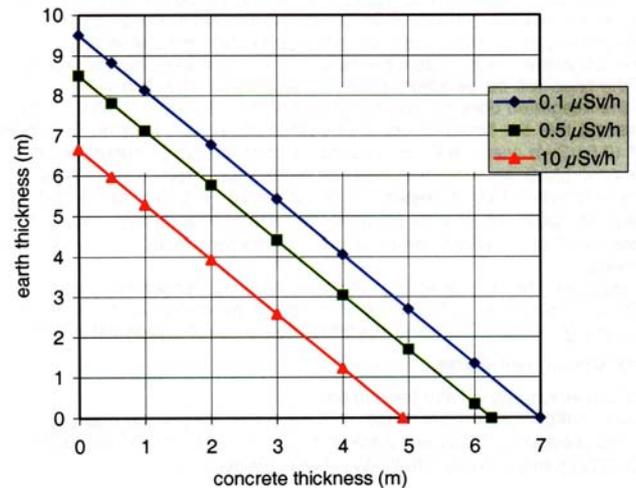


Abb. 6.2-2: Erforderliche Abschirmungsstärke für 1,334 GeV und Strahlverlust von 5 W/m /Ber 01/

Der Beschleuniger für eine Spallationsquelle besteht aus vielen einzelnen Elementen (Magnete, Kavitäten, Speicherring, Kollimatoren etc.). In bestimmten Zonen des Beschleunigers können größere Strahlverluste als 1 W/m auftreten. Die direkt durch den Protonenstrahl induzierten Quellen wie Target, Kollimatoren, Protonenstrahlfenster und Strahlführung werden ohne Berücksichtigung der Pulsstruktur des Protonenstrahls als zeitlich gemittelte, kontinuierliche Quellen angesehen.

In der Abb. 6.2-3 ist der Strahlungsverlustverlauf entlang des im Bau befindlichen SNS-Beschleunigers (Oak Ridge National Laboratory USA) simuliert. Die gelb markierten Zonen zeigen Bereiche höherer Strahlung. Vor allem die Übergänge zwischen DTL (Drift-Tube-Linac) und CCL (Coupled-Cavity-Linac) und Übergang in supraleitender Beschleunigerteil sowie an den Kollimatoren und Chopper in HEBT (High-Energy-Beam-Transport), Ring und RTBT (Ring to Target-Beam-Transport-Beamline). In diesen allen Bereichen ist eine zusätzliche Abschirmung gefordert.

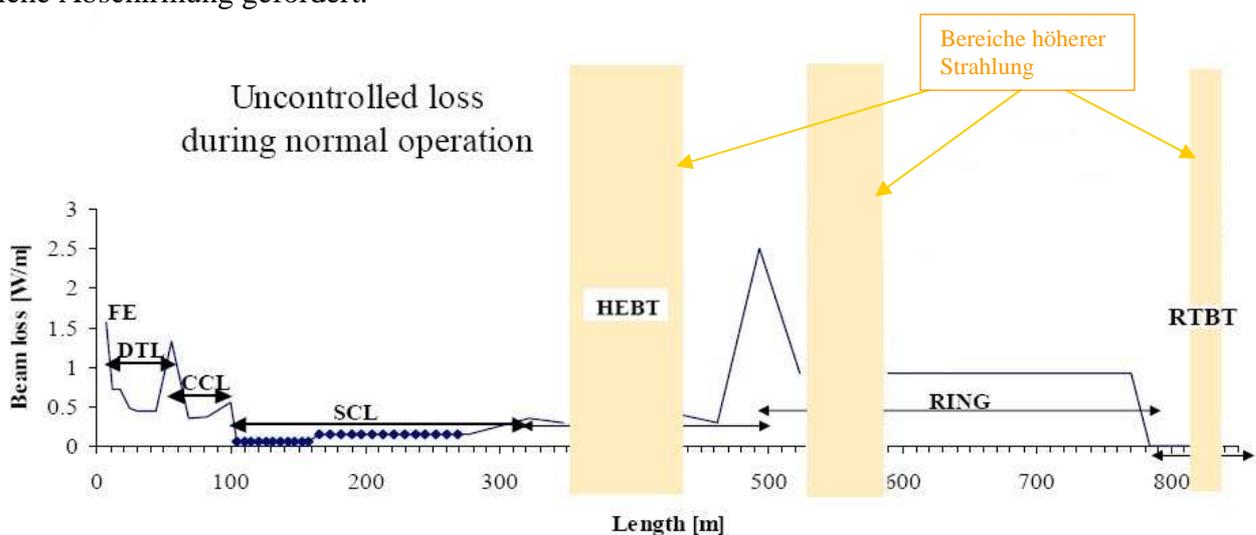


Abb. 6.2-3: Unkontrollierte Strahlverluste im Normalbetrieb entlang des SNS Beschleunigers nach /Cat 02/

**Stahlverluste durch Betriebsstörungen** oder auch spontane Strahlverluste wurden schon in mehreren Beschleunigern beobachtet. Bei der Spallationsquelle ISIS (160 kW Strahlleistung) weisen die Betriebserfahrungen den Verlust von einem Volleistungspuls innerhalb von 15 Betriebsjahren aus. Jedoch gibt es nicht genügend statistische Daten, um das Problem zu betrachten. Deswegen muss bei der Abschirmungsauslegung eine ausreichend konservative Annahme getroffen werden.

Als Basis für die Auslegung der ESS-Beschleunigerabschirmung wurden Annahmen vom Verlust von 5 aufeinander folgenden Volleistungspulsen (10 MW, 5 Einzelpulse) getroffen. Aus heutiger Sicht und nach Betriebserfahrungen mit anderen Beschleunigeranlagen ist eine Detektion und Strahlabschaltung nach dieser Zeit mit Sicherheit möglich. Zusätzlich können folgende Annahmen getroffen /Ber 02/:

- Die Beschleuniger- Ring-, und Protonenstrahlführungsabschirmung ist für den kontinuierlichen Strahlverlust von 1 W/m auszulegen um die Grenze von 1 mSv/a nicht zu überschreiten (nach /Euroatom 96/).
- Der spontane Strahlverlust kann in einem beliebigen Punkt des Beschleunigers stattfinden (stochastische Verteilung)
- Die event. zusätzliche Abschirmung wird zu der für einen kontinuierlichen Verlust von 1 W/m ausgelegten Abschirmung addiert.

Aus den Berechnungen ergibt sich eine Erhöhung der Dosisleistung um 0,11 mSv/a bei einer Wahrscheinlichkeit von  $10^{-2}/a$ . Das wiederum erfordert eine zusätzliche Dicke der Erdabschirmung von 100 cm, was bei der unter konservativen Annahmen berechneten Erdabschirmungsdicke von 6-8 m eine vernachlässigbare Größe darstellt /Moo 04/.

**Die Start- und Justierphase des Beschleunigers und Speicherrings** muss separat betrachtet werden. In dieser Phase ist eine Wahrscheinlichkeit für Strahlverluste groß. Die vorgegebenen Dosisgrenzen gelten auch in dieser Phase, deswegen wird die Leistung des Beschleunigers während dieser Phase deutlich reduziert. Für ESS-Beschleuniger wurde in dieser Phase die Frequenz im Beschleuniger und Speicherring von 50 Hz auf 1 Hz, die Strahlleistung im Linac auf 1 kW und im Speicherring auf 10 kW reduziert. Entsprechende Berechnungen müssen für den kontinuierlichen vollen Strahlverlust gemacht werden. Anschließend müssen eventuelle Maßnahmen zur Verstärkung der Abschirmung getroffen werden.

Berechnungen zeigen, dass keine zusätzliche Abschirmung notwendig ist. Lediglich auf der Oberfläche im Punkt A in den Abb. 6.2-4 und Abb. 6.2-5 ist eine größere Dosisleistung zu erwarten. Das kann aber aus dem sicherheitstechnischer Sicht gut kontrolliert werden. Außerdem kann der Beschleunigerbereich während der Start- und Justierphase zu einem temporären Kontrollbereich definiert /Ber 02//Moo04/(siehe auch SNS-Beschleuniger /Joh 00a/).

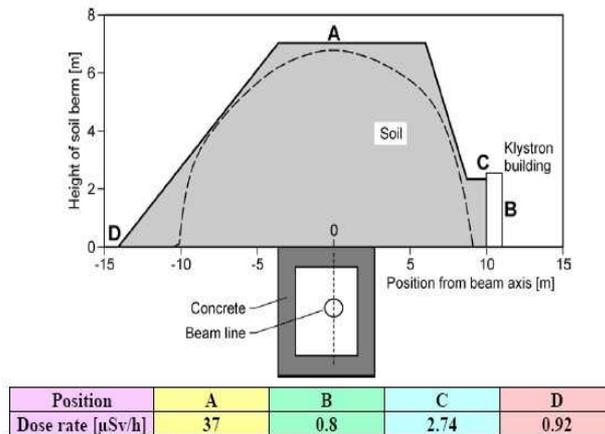


Abb. 6.2-4: Abschirmung für Linac ESS; in der Tab. max. Dosisleistung während der Startphase mit 1 kW kontinuierlichen Strahlverlusten /ESS 03/

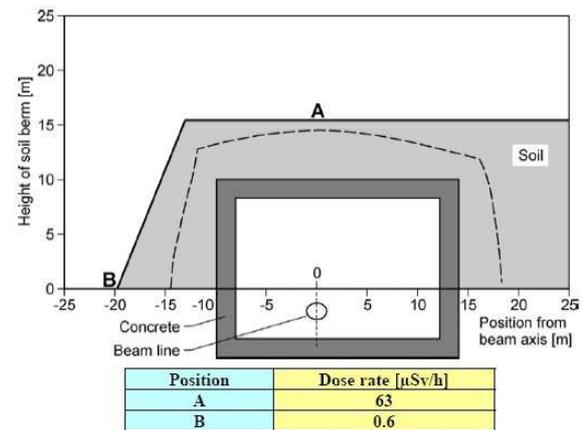


Abb. 6.2-5: Abschirmung für Speicherring ESS; in der Tab. max. Dosisleistung während der Startphase mit 10 kW kontinuierlichen Strahlverlusten /ESS 03/

Für die Justierung und Ausrichtung des Strahls werden in allen Beschleunigertypen spezielle sog. Strahlstopper gebaut. Diese Strahlstopper müssen den primären (reduzierten) Beschleunigerstrahl vernichten, wobei die Auslegung nicht nur im Sinne des Strahlenschutzes durchgeführt werden muss, sondern in Bezug auf die Nutzung der Experimentieranlagen ein möglichst geringer Teilchenuntergrund entstehen soll (Strahlstopper in der Protonenstrahlführung). Bei den Berechnungen von solchen Strahlstopperelementen müssen winkelabhängige Simulationen in Abhängigkeit von der Position des Strahlstoppers in der Anlage durchgeführt werden, um die Abschirmqualität der Anlage zu verifizieren. Nach wie vor gilt: Die Abschirmung der Strahlstopper muss die geforderte Dosisleistungen der Anlage gewährleisten. Beim SNS-Beschleuniger wurden die Strahlstopper im Linac auf 33 kW, im Speicherring auf 200 kW und in der Protonenstrahlführung zum Target auf 33 kW ausgelegt.

Diese Strahlstopper können in speziellen Gebäuden oder auch in der Protonenstrahlführung integriert werden. Das Strahlstopperdesign muss neben der Abschirmung auch Kühlung, Diagnostikelemente sowie die komplette Medienversorgung (Strom, Wasser, Lüftungsanlage etc.) berücksichtigen. Die Strahlstopper sind meistens in Form eines Abschirmungsmoduls gebaut (Abb. 6.2-6). Durch die Baulänge von ca. 4 m – 5 m, von denen 3 m - 4 m oberhalb der Strahlachse eine Stahlabschirmung ist, wird zusätzliche Abschirmung oberhalb dieser Module nicht nötig.

In den folgenden Abbildungen sind das Design eines 200 kW Strahlstoppers sowie die Position im Speicherring in der SNS- Anlage dargestellt (Abb. 6.2-6 und 6.2-7).

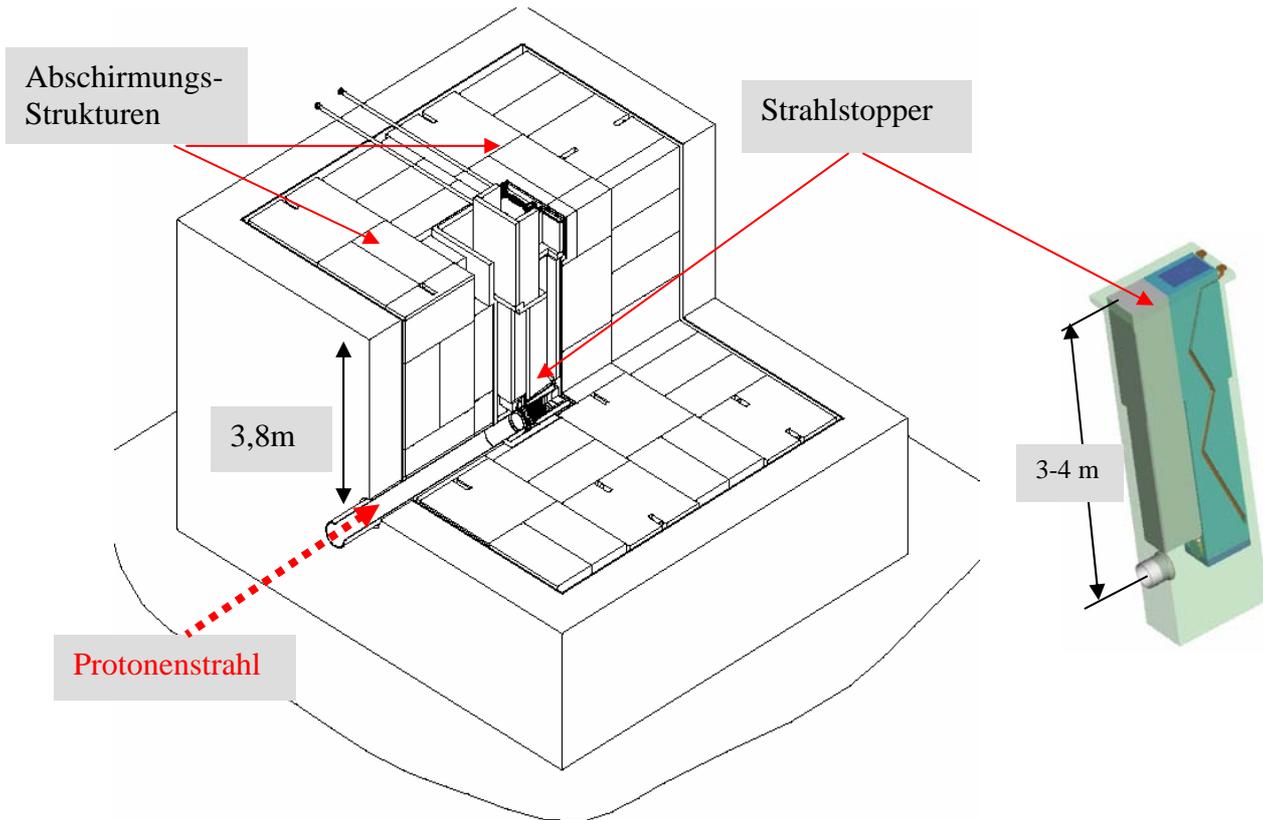


Abb. 6.2-6: SNS- Strahlstopper 200 kW /McN 01/, /Chi 00/

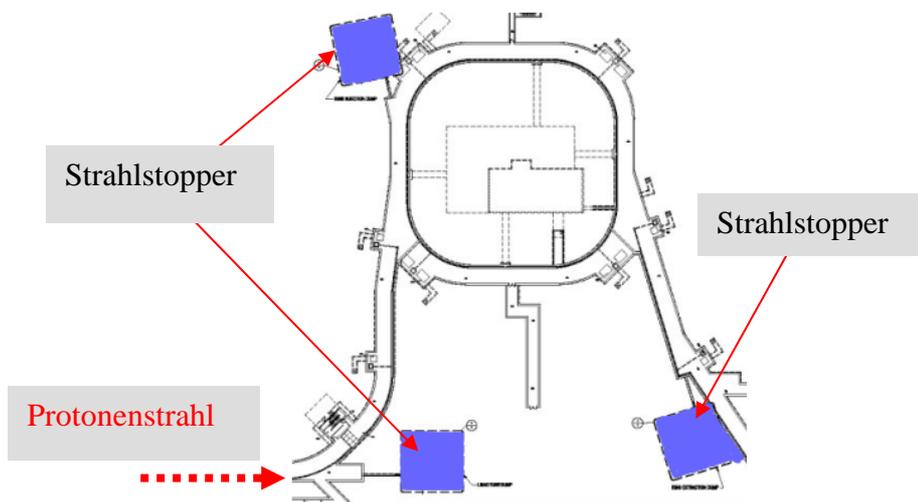


Abb. 6.2-7: Position der SNS- Strahlstopper im Speicherring /Chi 00/

Eine der wichtigsten Beschleunigerabschirmungsanforderungen ist die Gewährleistung des Zugangs zu den Beschleunigerbauten im Tunnel zum Zweck von Wartungs- und Reparaturarbeiten an den Magneten, Kavitäten oder Elektroinstallationen. Der typische Zugang hat einen Querschnitt von 1 m x 2 m (Türquerschnitt), wobei die Leitungskanäle mit Rohrleitungen und Kabeln viel kleiner gebaut werden können (0,2 m x 0,2 m).

Für den Personalzugang zum Beschleuniger müssen zwei generelle Regeln eingehalten werden:

- Die Ausführung des Zugangs soll konstruktiv so ausgeführt werden, dass eine ausreichende Abschirmung der direkten Linie zwischen Quelle und zu schützendem Objekt gegeben ist. In den meisten Fällen werden die Zugänge in Form von Labyrinthgängen ausgeführt.
- Für alle Labyrinthgänge muss die Summe der Wanddicken zwischen Quelle und zu schützendem Objekt adäquat zu der berechneten Wanddicke in der Ausführung ohne Labyrinth sein.

In der Abb. 6.2-8 ist die Ausführung eines Zugangslabyrinths zum Beschleunigertunnel an der J-PARC- Spallationsquelle und die berechnete für die Ausführung Dosisleistung gezeigt.

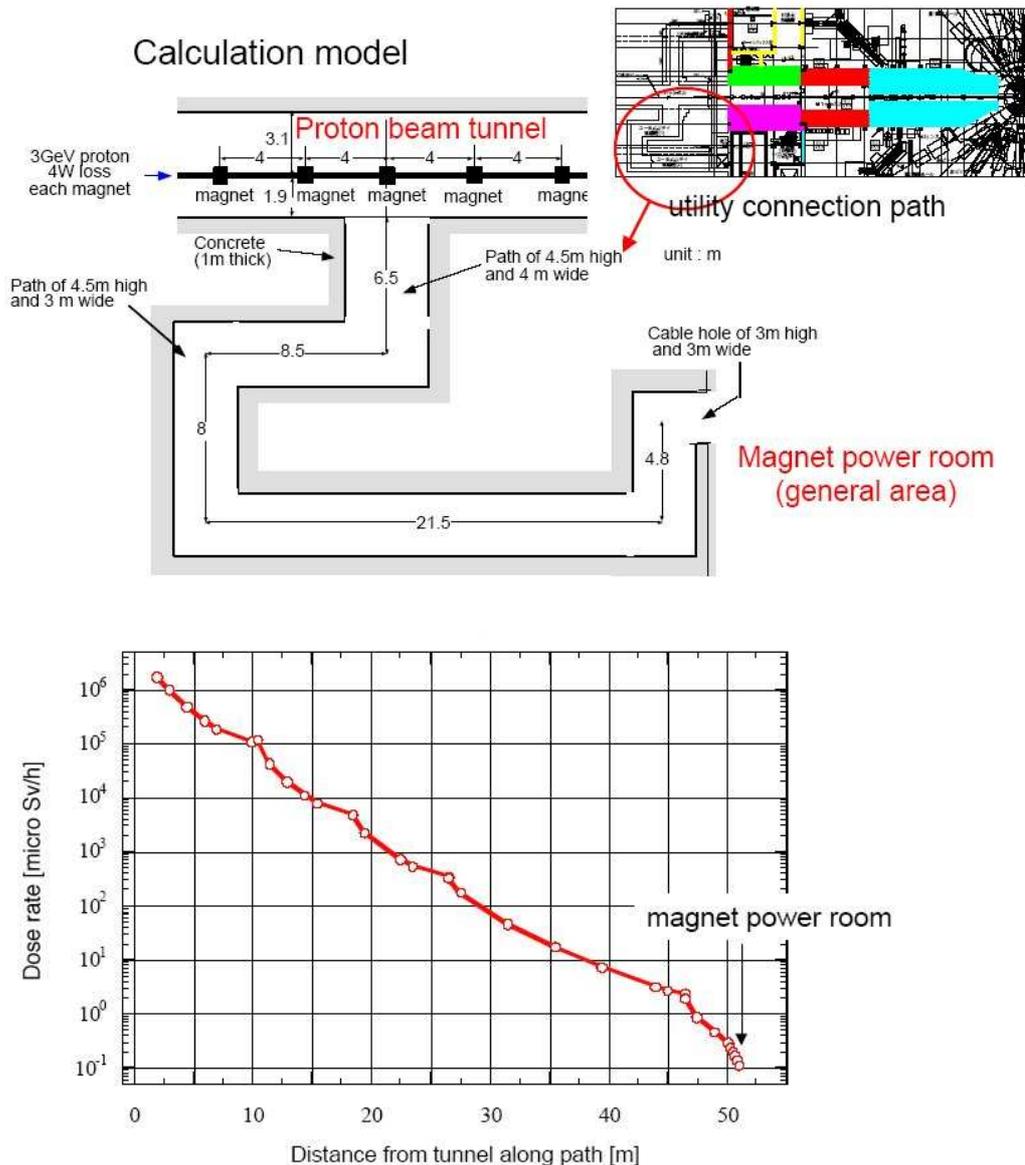


Abb. 6.2-8: Ausführung des Zugangslabyrinths zum Beschleunigertunnel (Bild oben). Die berechnete Dosisleistung ist im Diagramm unten gezeigt /Kon 02/.

### **Abschirmungsauslegung für den Schutz der Bevölkerung außerhalb des Betriebsbereiches**

Für die Auslegung der Abschirmung bei Beschleuniger ist es außerordentlich wichtig die Dosisleistung außerhalb des Anlagenzauns unter den vorgegebenen Grenzwerten zu halten. Der sog. Sky- und Groundshineeffekt wurde schon im Kap. 5.3 ausführlich beschrieben. Maßgebend für die beschriebenen Berechnungsmethoden ist die Entfernung der Person von der Strahlungsquelle. Bei ESS in Europa wurde die kürzeste Entfernung von der Strahlungsquelle zum Grenzzaun der Anlage auf 300 m, für SNS auf 1.375 m festgelegt. Auch hier müssen vernünftige Annahmen entsprechend den Aufstellungsortverhältnissen getroffen werden. Vor allem die Start- und Justierphase darf nicht die angesetzten Grenzwerte überschreiten. Die berechnete Skyshine-Dosisleistung in /Ber 02/ für Start- und Justierphase des ESS-Beschleunigers beträgt 90 nSv/h für den Speicherring. Bei einer Startphase von 6 Monaten und 3 Monaten Normalbetrieb beträgt die gesamte Dosisleistung 0,4 mSv/a, was weit unter der Grenze von 1 mSv/a liegt.

**Die Grundwasseraktivierung** ist abhängig von den Verhältnissen am Aufstellungsort der Anlage. Grundwasserpegel, Grundwassergeschwindigkeit sowie Erdreichzusammensetzung haben sehr großen Einfluss auf eventuelle Aktivierung. Deswegen müssen genaue Abschirmungsrechnungen bezogen auf die Grundwasseraktivierung durchgeführt werden.

### **Die Bodenaktivierung**

In den meisten Anlagen wurden die gesamten Beschleunigerbauten des Strahl- und Versorgungstunnels (siehe Kap. 6.3), sofern sie direkt an die Außenumgebung grenzen, aus Kostengründen nach einer entsprechenden Betonwand mit Erdreich als Abschirmmaterial versehen. Die noch erheblichen Neutronenflüsse nach der dicken Betonwand aktivieren das gebäudenahe Erdreich. Dabei sind zwei Fragestellungen zu betrachten /Ehr 86/:

1. Kann es zu einer radiologisch relevanten Kontamination der Umgebung kommen und sind bauliche Vorkehrungen diesbezüglich zu treffen?
2. Welche Erdmassen sind nach Stilllegung als radioaktiver Abfall zu behandeln?

Zu 1.: Die Transportgeschwindigkeiten im Boden sind sehr gering (z. B. Cs-Transport ca. 4 m/a). Deswegen ist es für die erste Fragestellung ausreichend, sich nur auf das langlebige Nuklidspektrum zu beschränken. Die Messungen aus dem Kernkraftwerksbereich für Beton /Eick 84/ und aus dem Beschleunigerbereich /Sul 84/ wiesen als dominierende Nuklide im Beton des Reaktors  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  und  $^{134}\text{Cs}$  nach. In der Erde der Beschleunigerabschirmung wurden neben den obigen Radionukliden auch die Nuklide  $^{22}\text{Na}$ , und  $^3\text{H}$  nachgewiesen. Die Bestimmung der spezifischen Aktivitäten wurde durch 3-D Rechnungen für den ungünstigsten Querschnitt des Beschleunigertunnels durchgeführt. Ein Analysebeispiel der Bodenaktivierung wurde im Kap. 5.3 diskutiert.

Zu 2: Der zweite Punkt ist die Abschätzung der Menge an radioaktivem Erdreich nach der Stilllegung der Anlage. Die Boden- und Wasseraktivierung determiniert praktisch die Dicke des Abschirmungsbetons. Einerseits wird Beton weniger stark aktiviert als Erde, deshalb ist der aktivierte Beton leichter zu handhaben als aktivierte Erde. Andererseits haben die höheren Kosten der Betonabschirmung großen Einfluss auf die Bestimmung der Betondicke. An dieser Stelle ist die genaue Abwägung der allen signifikanten Parameter erforderlich.

In der Abb. 6.2-9 ist eine maximale spezifische Erdreichaktivität errechnet und für den ESS-Beschleuniger hinter einer 60 cm Betonwand in Abhängigkeit von der Abklingzeit gezeigt.

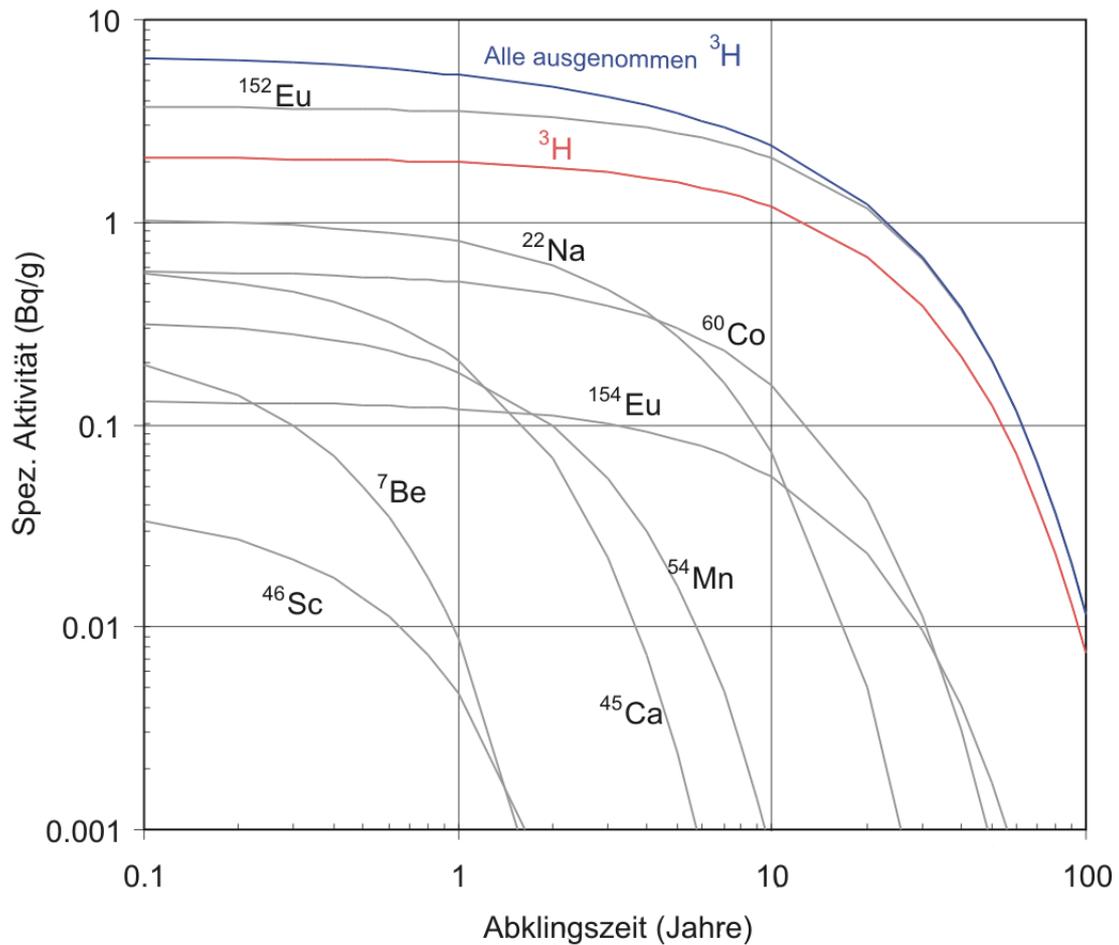


Abb. 6.2-9: Max. spezifische Erreichaktivität hinter einer 60 cm Betonwand für Beschleuniger ESS /Ber 02/

Beim Vergleich der Grenzwerte für radioaktiven Abfall in Deutschland und die errechneten ESS-Werte stellte man fest, dass Tritium kein Problem darstellt (ESS- Abschirmungserde nach 10 Jahren Abklingzeit: 1,5 Bq/g (Grenzwert 60 Bq/g)). Um die Erdabschirmungsmenge unter der Freigrenze zu halten, muss die Betonwanddicke auf 1,7 m erhöht werden, was zur Erhöhung der Abschirmungskosten um 15 Mio.€ führen würde. Eine genaue Analyse des Problems für den ESS-Beschleuniger wurde in /ESS 03/ und /Moo 02/ vorgestellt.

## 6.3 Ausführungsbeispiele der Beschleunigerabschirmung

### Hochenergieprotonenbeschleuniger J-PARC in Japan

Der Hochenergiebeschleuniger J-PARC (Abb. 6.3-1) besteht aus:

- Ionenquelle für  $H^+$  Ionen
- einem normalleitenden Linearbeschleuniger (weiter Linac N.L.) für  $H^+$  Ionen Beschleunigung bis zu einer Energie von 0,4 GeV mit max. Strom von 50 mA und einer Pulsfrequenz von 50 Hz (Supraleitende Linac S.L. wird in der zweiten Bauphase realisiert). Dieser Protonenstrahl wird für die Spallationsquelle benutzt.
- einem Synchrotronbeschleuniger mit einer Energie von 3 GeV und einer Pulsfrequenz von 25 Hz, Strahlleistung 1 MW
- einem Synchrotronbeschleuniger mit einer Energie von 50 GeV und einer Pulsfrequenz von 0,3 Hz, Strahlleistung von 0,75 MW

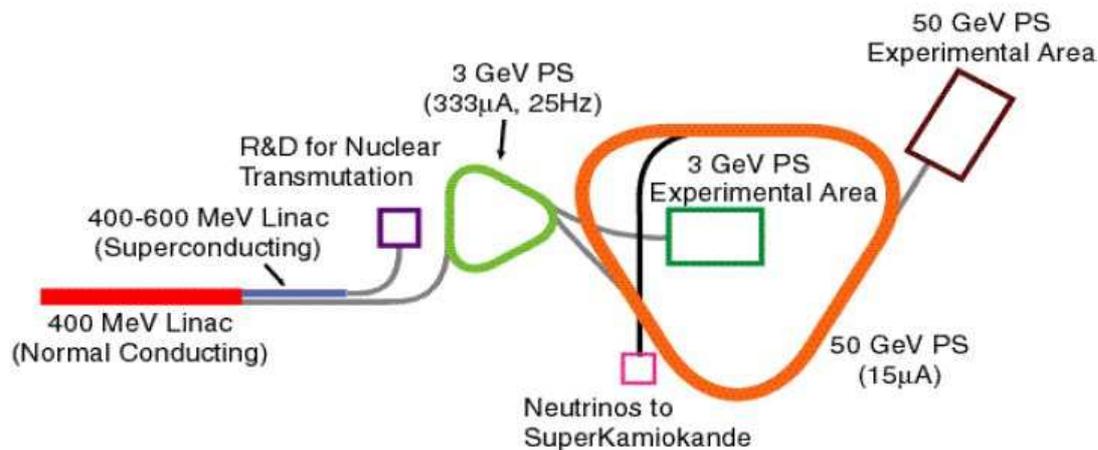


Abb. 6.3-1: Prinzipieller Aufbau der Beschleuniger J-PARC in Japan /Nak 04/

Alle Protonenstrahlentunnel sind unterirdisch gebaut. Folgende Werte der Dosisleistung sind dem Abschirmungsdesign zu Grunde gelegt – Tab. 6.3-1

Tab. 6.3-1: Grenzwerte der Dosisleistung für das Abschirmungsdesign des J-PARC /Kek 05/

Bereich	Grenzwerte für Abschirmungsdesign	Japanische Grenzwerte
Außerhalb des Betriebsgeländes	< 50 $\mu\text{Sv/a}$	< 25 $\mu\text{Sv/3 Monate}$
Betriebsgelände	< 0,25 $\mu\text{Sv/h}$	< 20 $\mu\text{Sv/Woche}$
Kontrollbereich I	< 12,5 $\mu\text{Sv/h}$	< 1 $\text{mSv/Woche}$
Kontrollbereich II	< 100 $\text{mSv/h}$	
Kontrollbereich III	> 50 $\text{mSv/h}$	
Grundwasseraktivierung	< 5 $\text{mSv/h}$	
Strahlverlust im Normalbetrieb	1 $\text{W/m}$	

Folgende Methoden wurden für die Berechnung der Abschirmdicke des J-PARC – Beschleunigers angewandt:

- Linacabschirmung                   Tesch – Methode /Tes 85/, Moyer-Methode
- 3 GeV-Synchrotron               Monte Carlo Methode MARS14
- Skyshine                            Stapleton – Formel, Skyshine-III /Lam 88/
- Aktivierung                        Monte Carlo Kopplungsmethode NMTC-MCPN

Anhand der Berechnungen wurden folgende Abschirmdicken berechnet (Mittelwerte) (Tab. 6.3-2):

Tab. 6.3-2: Abschirmdicken des J-PARC-Beschleunigers /Kek 05/

Position	Abschirmungsdicke [cm] <sup>1)</sup>				
	Oben		Unten	Links	Rechts
	Beton	Erde	Beton	Beton	Beton
60 MeV (Ionen-Quelle)	0	780	0	0	0
400 MeV Linac (N.L.)	10	770	40	20	10
600 MeV Linac (S.L.)	10	770	50	20	10
3 GeV-Synchrotron (Haupttunnel)	270	590	220	220	220

<sup>1)</sup>Nur Abschirmung ohne Baustrukturen.

Bei den Abschirmauslegungen wurden speziell für die Skyshine- Berechnungen genaue Simulationen durchgeführt. Die Skyshine- Berechnung wurden mittels Stapletonformel durchgeführt.

Stapleton, o`Brien und Thomas stellten eine Formel zur Äquivalentdosisberechnung in Abhängigkeit von Neutronenspektrum in Form von  $1/E+1/E^2+1/E^3$  und dem Abstand von der Quelle auf [GL. 6.3-1]. Die Berechnungen sind für Neutronenenergien >400 MeV und nur für größere Distanzen ( $r \gg 40m$ ) gültig /Hay 99/.

$$H(r) = \frac{a}{(b+r)^2} e^{-r/\lambda} \quad [\text{GL. 6.3-1}]$$

mit:

- H(r)       =    Äquivalentdosis in [(Sv / emittiertes Neutron)]  
r           =    Abstand von der Quelle in [m]  
λ          =    Abschwächungslänge [m] für hochenergetische Neutronen in der Luft  
a          =     $2 \times 10^{15}$  [m<sup>2</sup>Sv/n]  
b          =    40 m

Um die totale Äquivalentdosis zu bestimmen, muss man nur die Zahl der emittierten Neutronen aus der Abschirmung berechnen. Der Quotient aus diesen Äquivalentdosiswerten und Konversionsfaktoren für Neutronen der bestimmten Energien gibt die Näherungswerte für die Anzahl der emittierten Neutronen. Diese Berechnungen wurden mit guter Übereinstimmung bis zum Faktor 2 mit anderen Methoden SHINE-III, MC-Methode verglichen (siehe Abb. 6.3-2).

Die Abschwächungslängen und Konversionsfaktoren für diese Simulationen sind in der Tab. 6.3-3 dargestellt.

Tab. 6.3-3: Abschwächungslängen und Konversionsfaktoren nach /Nak 04/

Energie [MeV]	Effektive Abschwächungslänge [m]	Konversionsfaktor [fSv*m <sup>2</sup> ]
200	438	12,1
200	543	13,6
1000	622	14,4
15000	670	14,7
50000	670	14,7

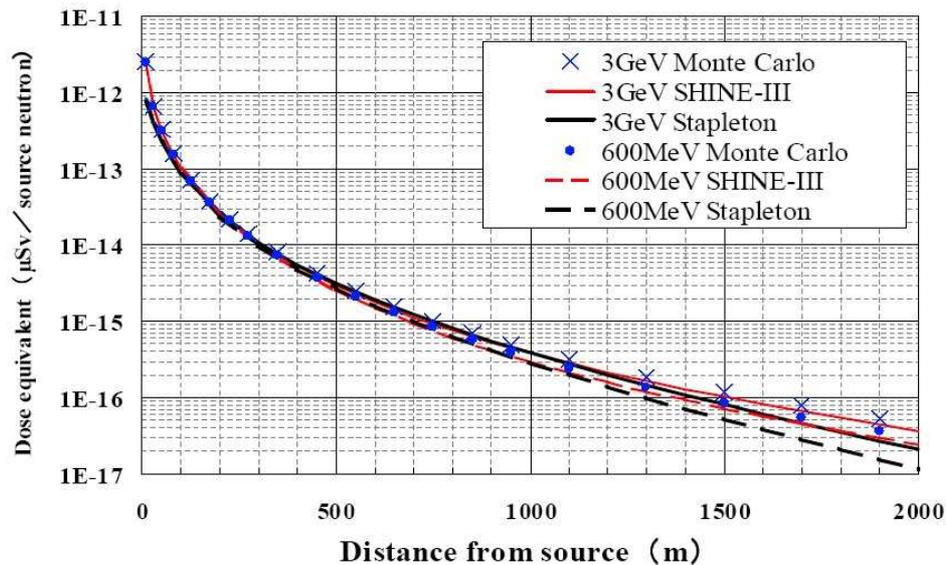


Abb. 6.3-2: Vergleich der Neutronenskyshine-Äquivalentdosis in Abhängigkeit von der Entfernung zur Quelle /Nak 04/

In der Abb. 6.3-3 sind die berechneten Äquivalentdosisgrenzen an der J-PARC-Anlage-Zaungrenze dargestellt. Die Abschirmungsauslegung ist so ausgewählt, dass der Grenzwert von 50  $\mu\text{Sv/a}$  an der Zaungrenze nicht überschritten wird.

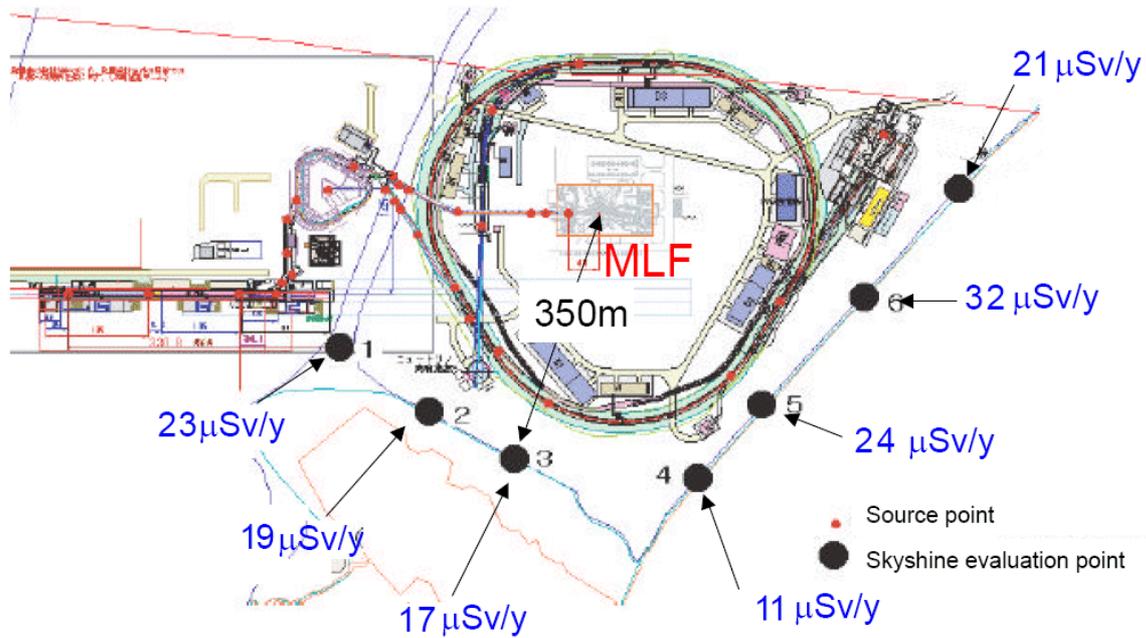


Abb. 6.3-3: Berechnete Äquivalentdosis an der Zaungrenze der Anlage J-PARC. Die totale Dosis von  $50 \mu\text{Sv/a}$  ist nirgendwo überschritten. /Nak 04/

Die folgenden Abbildungen zeigen Linacabschirmungs- und Synchrotronquerschnitt sowie Abbildungen von der Baustelle (Stand der Arbeit: Mai 2004)

### Typical Cross Sectional View

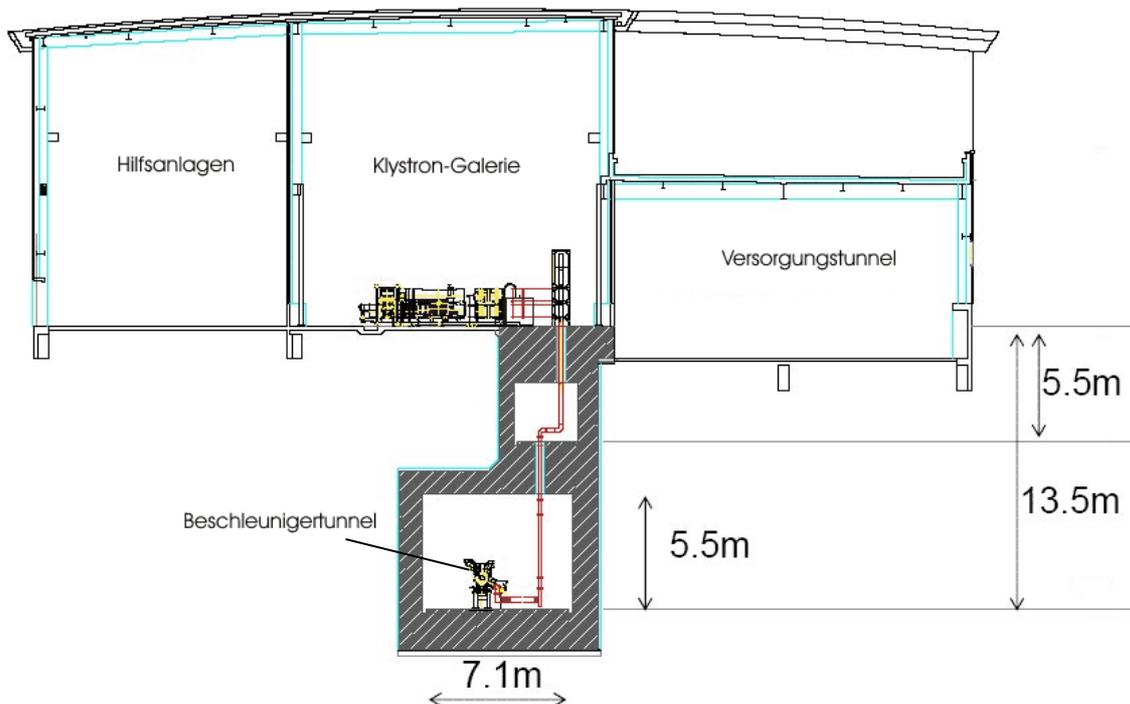


Abb. 6.3-4: Querschnitt des J-PARC Linactunnels /Ouc 04/



Abb. 6.3-5: Linactunnel im Bau (J-PARC Stand: Mai 2004) /Tan 04/

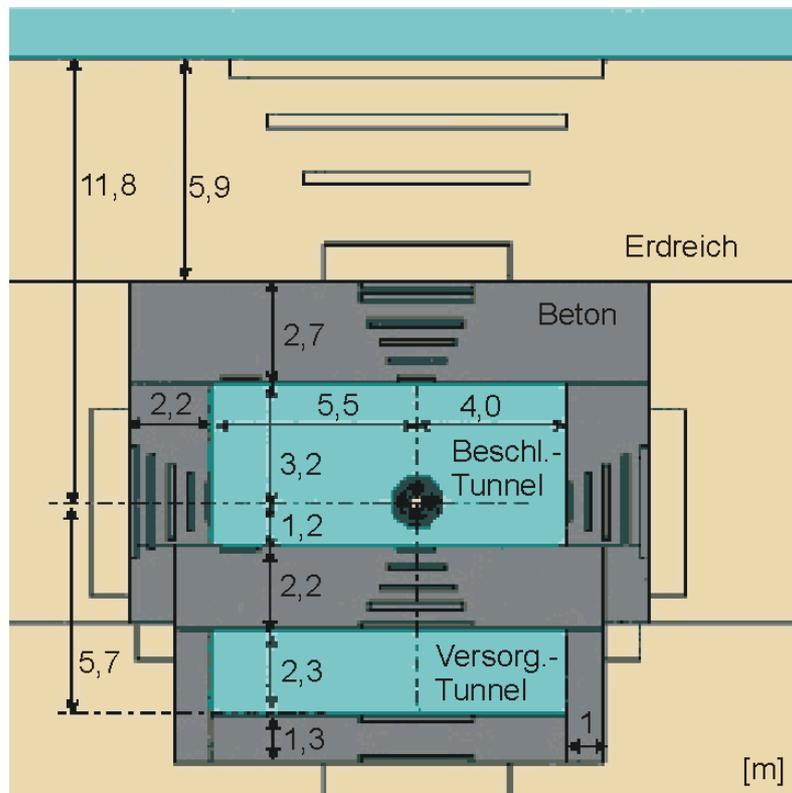


Abb. 6.3-6 : Querschnitt des 3 GeV-Synchrotrontunnels J-PARC /Nak 03/



Abb. 6.3-7: 3 GeV Tunnel J-PARC (Stand: Mai 2004) /Tan 04/

### Hochenergieprotonenbeschleuniger SNS in USA

Der Hochenergiebeschleuniger SNS (Abb. 6.3-8) besteht aus:

- Ionenquelle für H<sup>+</sup> Ionen (Ion source)
- einem Linearbeschleuniger, der aus einem normalleitenden und einem supraleitenden Teil besteht (Linac) für H<sup>+</sup> Ion Beschleunigung bis zu einer Energie von 1,0 GeV mit einem max. Strom von 1,4 mA und einer Pulsfrequenz von 60 Hz
- einem Speicherring (Accumulator ring)
- einer Protonenstrahlführung zum Target (RTBT)

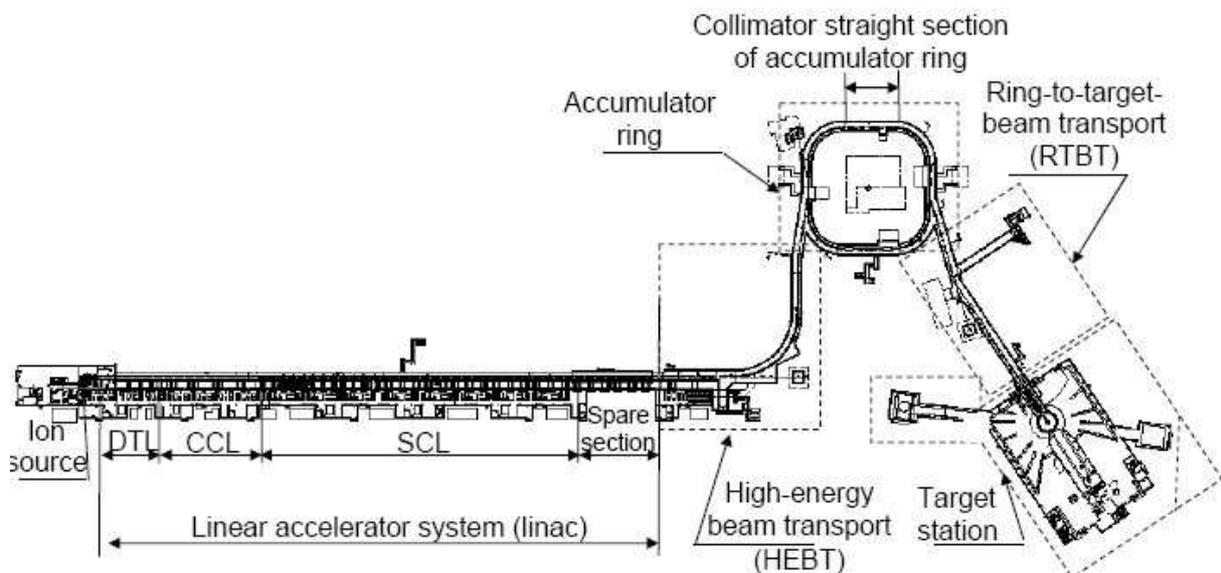


Abb. 6.3-8: Prinzipieller Aufbau der Beschleuniger SNS in USA /Pop 04/

Folgende Werte der Dosisleistung in USA sind für das Abschirmungsdesign zu Grunde gelegt Tab. 6.3-4

Tab. 6.3.4: Grenzwerte der Dosisleistung für das Abschirmungsdesign SNS in USA /Joh 00/

Bereich	Grenzwerte für Abschirmungsdesign
Freizugängliche Oberfläche der Abschirmung außerhalb des Kontrollbereichs	< 500 $\mu$ Sv/h
Kontrollbereich	< 2,5 mSv/h
Freizugängliche Oberfläche der Abschirmung außerhalb des Kontrollbereichs beim Strahlverlust durch Betriebsstörung	< 0,01 Sv/h
Kontrollbereich beim Strahlverlust durch Betriebsstörung	< 0,25 Sv/h

Für die Auslegung der SNS-Beschleunigerabschirmung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Strahlungsverluste im Normalbetrieb sind auf 1 W/m begrenzt
- Die Dosisleistung in 5 m über Erdabschirmung der Beschleuniger (in der Umgebungsluft) im Normalbetrieb ist kleiner als 2,5  $\mu$ Sv/h, und im spontanen vollen Strahlverlust beträgt weniger als 250 mSv/h
- Die unkontrollierten Strahlungsverluste im Normalbetrieb werden mit besonders großer Aufmerksamkeit verfolgt /Gal 04/

Folgende Methoden wurden für die Berechnung der Abschirmdicke des SNS –Beschleunigers verwendet /San 00/:

- Linacabschirmung Speicherring                      Monte Carlo Methode MCNPX, Diskrete Ordinate Methode ANISN, DORT
- Skyshine    Stapleton – Formel
- Radionuklidproduktion und Aktivierung        HETC, ORIHET95,

Anhand der Berechnungen wurden folgende Abschirmdicke berechnet (Mittelwerte):

Tab. 6.3.5: Abschirmungsdicken für SNS-Beschleuniger/San 00/, /Oda 98/

Position	Abschirmungsdicke[cm]				
	Oben		Unten	Links	Rechts
	Beton	Erde	Beton	Beton	Beton
Linac)	46	747	46	46	46
Speicherring	46	792	46	46	46
Protonführung zum Target außerhalb der Targetstation	60	540	60	60	60

Die folgende Abbildung zeigt den Abschirmungsquerschnitt des SNS-Linac:

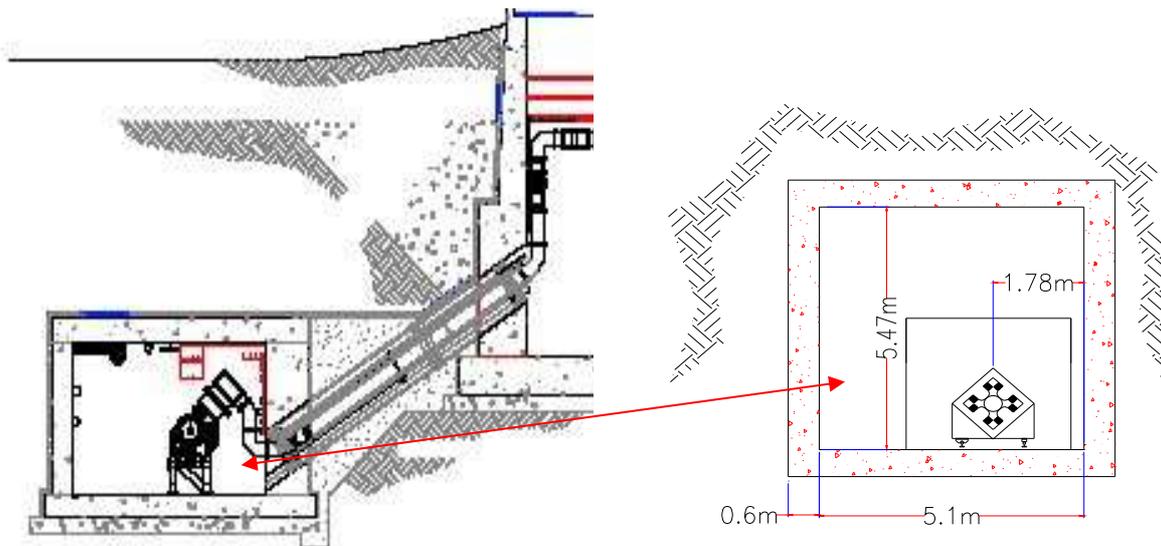


Abb. 6.3-9: Querschnitt der SNS – Abschirmung des Beschleunigers SNS /Tal 01/



Abb. 6.3-10: SNS-Linactunnel SNS (Stand Feb. 2004) /SNS 05/

## 6.4 Fazit

Man kann nun ein generelles Ablaufschema für die Erstellung einer Beschleunigerabschirmung wie in der Abbildung 6.4-1 dargestellt aufstellen.

Der Anwendungszweck des Beschleunigers und somit die Beschleunigerparameter werden charakterisiert und vorgegeben. Daraus resultieren gleichzeitig drei Hauptanforderungen an die Abschirmung eines Beschleunigers:

1. Die Abschirmungsphilosophie im Beschleunigeraufstellungsland, die die Rückbaufragen bestimmt.
  - a. Im Falle des Rückbauprinzips „Grüne Wiese“ muss die ganze Anlage mit allen Anlagenbauten nach dem Stilllegen rückgebaut werden. In der Abschirmungsphilosophie wird auch festgelegt, inwiefern die Abschirmung aus Recyclingmaterialien gebaut werden kann.
  - b. Die Abschirmungsausführung nach dem Rückbauprinzip „vor Ort Konservierung“ wird dagegen nach der Stilllegung nicht rückgebaut, sondern entsprechend präpariert stehen lassen.
2. Die Dosisgrenzwerte.

Sie sind die wichtigsten Parameter, die für die Abschirmungsauslegung in den Strahlungsschutzverordnungen im Beschleunigeraufstellungsland vorgegeben sind. Die Einhaltung dieser Dosisgrenzwerte ist das Ziel der Abschirmungsberechnungen und der Abschirmung selbst.
3. Boden und Grundwasseruntersuchung.

Die Boden- und Grundwasseraktivierung ist abhängig von den Verhältnissen am Aufstellungsort der Anlage. Grundwasserpegel, Grundwassergeschwindigkeit sowie Erdreichzusammensetzung haben sehr großen Einfluss auf die eventuelle Aktivierung.

Durch die Aktivierungsrechnungen von Erdreich, Wasser und Luft sowie durch die Skyshine-Berechnungen werden eine bestimmte Dicke und Materialienzusammensetzung der notwendigen Abschirmung ermittelt.

In jeder Beschleunigeranlage treten Strahlverluste auf. Diese sind im Kap. 6 dieser Arbeit umfassend dargestellt. Sowohl die Strahlungsverluste im Normalbetrieb als auch bei Betriebsstörung oder in der Start- und Justierphase des Beschleunigers sind oft sehr schwer vor Inbetriebnahme des Beschleunigers abzuschätzen. Deshalb müssen unter Umständen zuerst konservative Annahmen für diese Verluste in Bezug auf den Strahlenschutz und die Abschirmungsauslegung gemacht werden. Eine genaue Analyse der Strahlenverluste und ihrer Wirkung durch die Simulationenrechnungen führt dann zu einer sicherheitstechnischen Auslegung der Abschirmung. Eine Abschirmung muss so ausgelegt werden, dass alle relevanten Anforderungen erfüllt werden. Deshalb wird für die weitere Betrachtung das, aus allen ermittelten Abschirmungswerten, konservativste Abschirmungsdesign gewählt. Im letzten Schritt wird die Kostenoptimierung der Abschirmung unter Berücksichtigung der Aspekte der Abschirmphilosophie durchgeführt (Abb. 6.4-1).

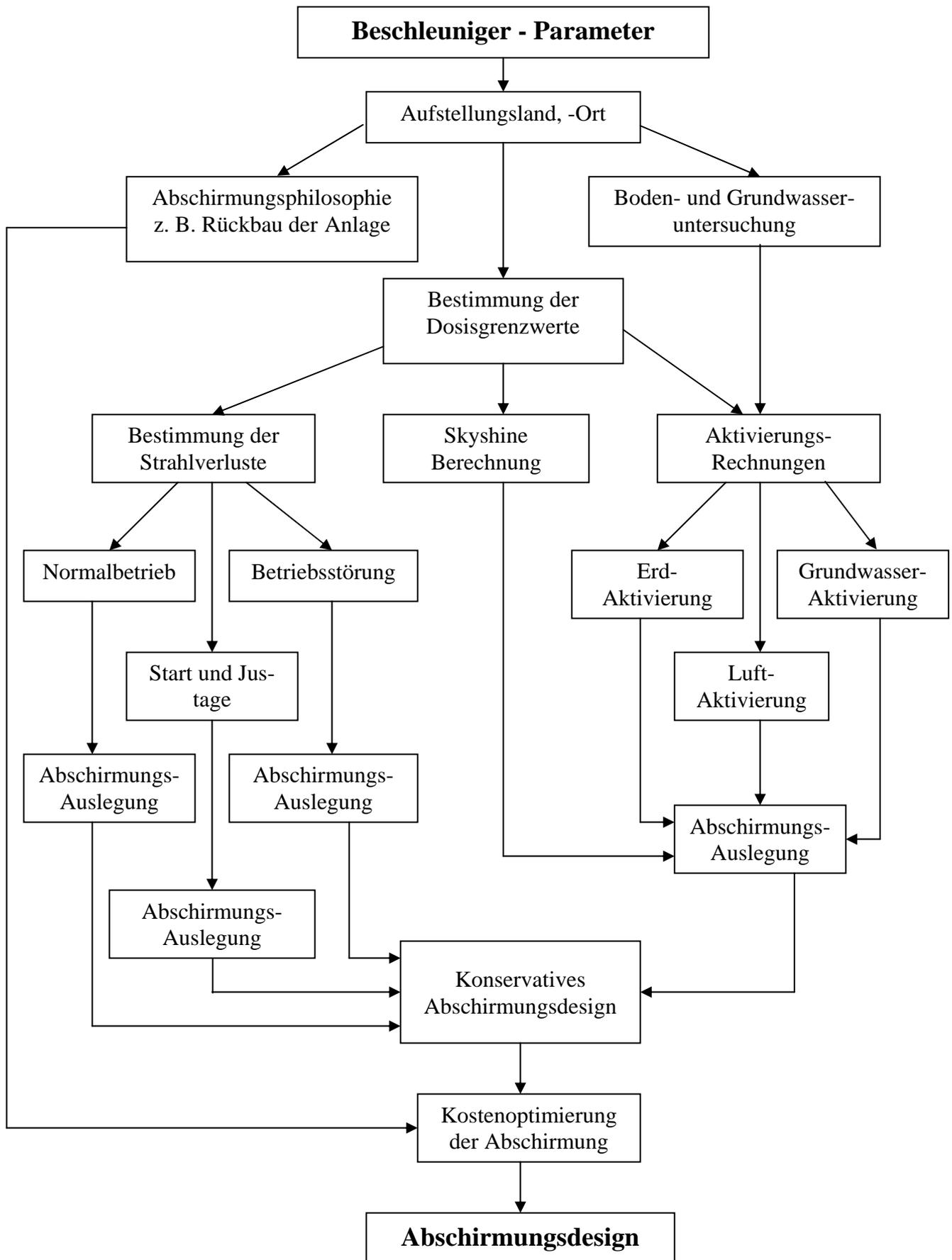


Abb. 6.4-1: Ablaufschema für die sicherheitstechnische Auslegung einer Beschleunigerabschirmung für Protonen im Energiebereich bis 3 GeV

## **7 Konzeptionelle und technische Umsetzung der Targetstationsabschirmung in einer Spallationsneutronenquelle**

In der Targetstation findet der Beschuss eines Schwermetall-Targets mit im Beschleuniger beschleunigten Protonen mit GeV Energie und Strahlleistung im MW Bereich statt. Die gesamte Energie und Leistung des Protonenstrahls wird hier zur Neutronenproduktion vernichtet. Bei genügend hohem Protonenstrahlstrom wird dieses Target somit zu einer intensiven Neutronenquelle (siehe Kap. 2.2). In einem Moderationssystem werden die Neutronen auf thermische Energien abgebremst. Dadurch entsteht ein Energiespektrum der Neutronen, wie es für die Experimente benötigt wird. Diese Neutronen driften entweder durch Strahlkanäle oder durch Neutronenleiter aus dem Moderationssystem zu den Instrumenten. Hochenergetische Neutronen mit stark anisotropischer Verteilung zur Richtung des primären Protonenstrahls sind der entscheidende Faktor für die Konzeption der Targetabschirmung. Diese Hochenergieneutronen können effektiv nur durch inelastische Stoßvorgänge mit schweren Atomkernen gebremst werden. Bei solchen Vorgängen entstehen jedoch in der Abschirmung niederenergetische Sekundärneutronen und Gammaquanten niedriger Energie. Die resultierende Oberflächendosis wird im Unterschied zur Reaktorabschirmung nicht nur durch die Hochenergieneutronen sondern auch durch deren Sekundärneutronen- und Gammaquantenproduktion bestimmt.

Die Targetstation ist die zentrale Baueinheit einer Spallationsanlage. Sie besteht aus den folgenden Anlageteilen (Abb. 7-1):

- Protonstrahlführung zum Target mit einem integrierten Protonenstrahlfenster zur Trennung der Beschleuniger- und Targetkavernenatmosphäre, umhüllt mit einer Stahlabschirmung.
- Targetblock mit einer Abschirmung, in der das Target, die Moderatoren, event. eine kalte Quelle sowie Strahlverschlüsse in Neutronenstrahlrohren untergebracht sind. Die Targetblockbauten sind an verschiedene Hilfssysteme angeschlossen.
- Wartungszelle (sog. Hot-Cell)
- Experimentiereinrichtungen, Targethalle, Neutronenleiterhalle

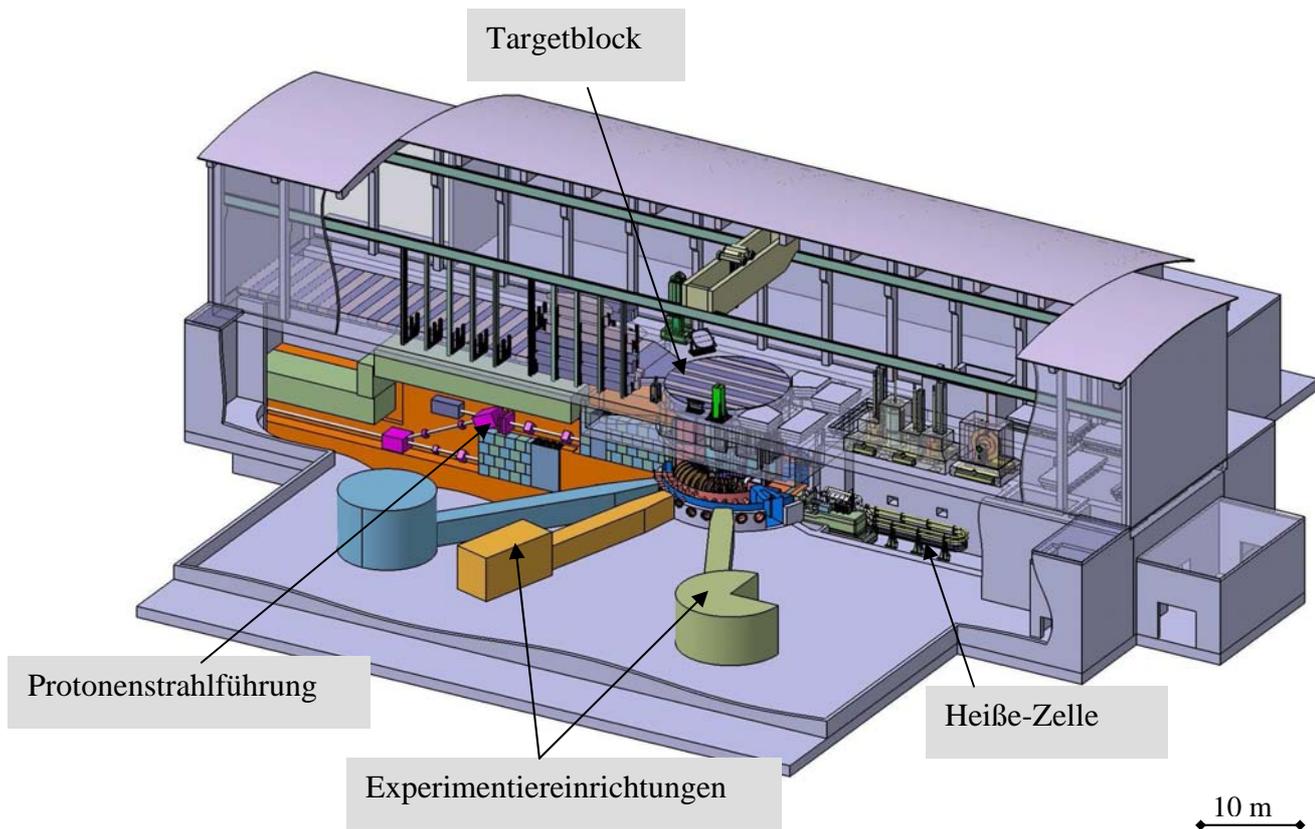


Abb. 7-1: ESS- Targetstation als Beispiel für eine MW Neutronenquelle

## 7.1 Auslegung der Targetabschirmung

Für die Auslegung der Targetabschirmung sind, genau so wie beim Beschleuniger, die Dosiswerte der Strahlenschutzverordnungen, die im jeweiligen Aufstellungsland gelten maßgebend.

Die Targetabschirmung muss in jedem Fall folgende Anforderungen erfüllen:

- Schutz gegen:
  - Neutronen aus den Spallationsreaktionen,
  - sekundäre Neutronen und Gammastrahlung aus den Reaktionen  $(n, xn)$ ,  $(n, \gamma)$
  - Gammastrahlung von durch Neutronen aktivierten Materialien
- Sicherheitstechnischer Strahlenschutz in allen möglichen Betriebsweisen der Anlage.
- Unterdrückung des Detektoruntergrundes der Experimente durch Neutronenleckage.
- Reduktion der Dosisleistung außerhalb der Kontroll- und Überwachungsbereiche auf die gemäß Strahlenschutzverordnung zulässigen Werte.

Grundsätzlich werden folgende Abschirmungsarten in der Targetstation unterschieden (siehe auch Tab. 5.1-1):

- Abschirmung der Protonenstrahlführung zum Target
- Abschirmung des Targetsystems (Target-Reflektor-Moderator)
- Abschirmung der Neutronenleiter und der Experimente

In den folgenden Kapiteln werden die Abschirmungsarten ausführlich diskutiert und beschrieben.

### 7.1.1 Abschirmung der Protonenstrahlführung zum Target

Ein Teil der Protonenstrahlführung verläuft im Bereich der Targetstation (siehe Abb. 7.1). In der Targetstation wird die Erdreichabschirmung aus Platz- und Handhabungsgründen durch eine äquivalente Stahl-Abschirmung ersetzt.

Die Auslegung der Abschirmung der Protonenstrahlführung zum Target wird nach denselben Prinzipien wie die Abschirmung für den Hochenergieteil des Beschleunigers durchgeführt, wobei auf eine entsprechende Eisen- oder Stahlabschirmung umgerechnet wird.

In der Tab. 7.1.1-1 sind die ermittelten Werte für die ESS-Protonenstrahlführungs-Abschirmung dargestellt. Zusätzlich wird zwischen Dosisgrenzen für den Betriebspersonal ( $3 \mu\text{Sv/h}$ ) und für den Nutzer in der Instrumentenhalle ( $0,5 \mu\text{Sv/h}$ ) unterschieden.

Tab. 7.1.1-1: Werte für die ESS-Protonenstrahlführungs-Abschirmung /Han 03/

	<b>Abschirmungs- Anforderung</b>	<b>Abschirmungs- dicke in Eisen- äquivalent</b>	<b>Abschirmungsdicke in Eisen- und Betonäqui- valent</b>
Betrieblicher Strahlverlust (1W/m)	0,5 $\mu\text{Sv/h}$	241 cm	200 cm Stahl + 150 cm Beton
Betrieblicher Strahlverlust (1W/m)	3,0 $\mu\text{Sv/h}$	209 cm	187 cm Stahl + 100 cm Beton
Kollimator und Protonenstrahl- fenster	0,5 $\mu\text{Sv/h}$	365 cm	275 cm Stahl + 100 cm Beton
Kollimator und Protonenstrahl- fenster	3,0 $\mu\text{Sv/h}$	333 cm	275 cm Stahl + 100 cm Beton
Strahlverluste durch Betriebsstö- rungen	0,5 $\mu\text{Sv/h}$	200 cm	200 cm Stahl + 150 cm Beton
Strahlverluste durch Betriebsstö- rungen	3,0 $\mu\text{Sv/h}$	152 cm	250 cm Stahl + 100 cm Beton

Die Abschirmung der Protonenstrahlführung enthält die größte Menge der Abschirmungsmaterialien innerhalb der Targetstation (bei ESS bis zu 19000 t Eisen). Deswegen ist es außerordentlich wichtig die Abschirmung kostenoptimiert zu gestalten. Für die ESS-Protonenstrahlabschirmung wurde diese aus gleich verzahnten Blöcken aus Recyclingschrott (bis 50% Recyclingquote) (siehe auch Kap. 4.4) vorgesehen /Han 03/. Die Protonenstrahlführungsabschirmung bei der Spallationsquelle SNS wurde aus mehreren gleichen Gussblöcken mit niedrigen Toleranzanforderungen konzipiert und hergestellt. Am Beispiel der angesprochenen Quellen sind deutlich die Unterschiede in der Rückbauphilosophie zu sehen. Da die Maße der Abschirmungsblöcke nur grob toleriert sind, werden diese mit Spalten bis zu 1 cm verbaut. Daher muss bei der Auslegung der Abschirmung auf Versatz, Minimierung und auf Verfüllung der entstehenden Spalte geachtet werden. Die Spallationsquelle ist nach dem Rückbauprinzip „vor Ort Konservierung“ gebaut. Deswegen wird sie nach der Stilllegung nicht rückgebaut, sondern entsprechend präpariert stehen lassen. Hier werden die Spalte zwischen den einzelnen Blöcken mittels Beton verfüllt.

Im Gegensatz zu SNS-Rückbauphilosophie wurde die ESS-Spallationsquelle nach dem Rückbauprinzip „grüne Wiese“ konzipiert, das bedeutet den kompletten Rückbau der Anlage nach der Stilllegung. Durch die spezielle Verzahnung der Abschirmungsblöcke wurde hier auf Verfüllung den Spalten verzichtet, so dass die Rückbaubarkeit der Anlage wesentlich einfacher erfolgt. Die Verzahnung der Blöcke wurde so ausgeführt, dass eine Materialüberdeckung von mehr als 85 % garantiert ist. Die rechnerisch ermittelte Materialdichte im Verhältnis zu einem spaltfreien Stahlblock beträgt für Beton 30-50 % und für Stahlgranulat oder Bleiwolle 50-70 % (siehe dazu /Han 03/).

Die Ausführung und das Design der Protonenstrahlabschirmung sowie des Targetblocks richtet sich stark nach der Art der Protonenstrahlführung.

Der Protonenstrahl wird auf drei verschiedene Arten zum Target geführt:

- horizontal – SNS, J-PARC, ESS
- vertikal von unten – SINQ
- vertikal von oben – die meisten ADS Systeme.

Dabei ist die horizontale Protonenstrahlführung vorteilhaft. In dieser Form entfallen die letzten schweren Umlenkungsmagnete, die in den anderen Protonenstrahlführungsarten notwendig sind. Auch der Zugang zu den untergebrachten Komponenten sowie die Ausführung der Abschirmung sind bei der horizontalen Protonenstrahlführung wesentlich einfacher.

Grundsätzlich werden zwei unterschiedliche Bereiche der Strahlführungsabschirmung unterschieden:

- Bereich mit niedrigem betrieblichem Strahlverlust
- Bereich mit hohen betrieblichen Strahlenverlusten.

Im ersten Bereich sind die Strahlführungskomponenten und das Vakuumsystem in einem betretbaren Kanal eingebaut. Die notwendige obere Abschirmung kann hier in Form von selbsttragenden Riegeln oder Platten, die bei Bedarf entfernbar sind, ausgeführt werden (Abb. 7.1.1-1, Schnitt A-A, B-B). Die untere und seitliche Abschirmung besteht aus ortsfesten Abschirmblöcken aus Stahl niedriger Qualität. Die Wände des inneren Strahlungsführungskanals bestehen aus Normalbeton.

Im zweiten Bereich sind die Strahlführungskomponente in Form von herausnehmbaren Modulen aufgebaut. Durch die Baulänge der Module von ca. 4 m, von denen 3 m in Form von Abschirmungsblöcken oberhalb der Strahlachse angeordnet sind, ist eine zusätzliche Abschirmung unnötig. Zu Wartungsarbeiten werden die Komponente mit den kompletten Modulen herausgezogen. Jedoch sind die Versorgungsanschlüsse (elektrische Energie, Kühlung etc.) selbst bei abgeschalteter Anlage nur bedingt zugänglich. Die Abbildungen 7.1.1-2 bis 7.1.1-4 zeigen Anordnung und Aufbau der Module bei der Spallationsquelle SINQ (Schweiz). Es ist wichtig bei dieser Ausführung eine sehr genaue Referenz-Auflagefläche bzw. eine hochgenaue Führung für die Positionierung der Strahlführungselemente zu erhalten.

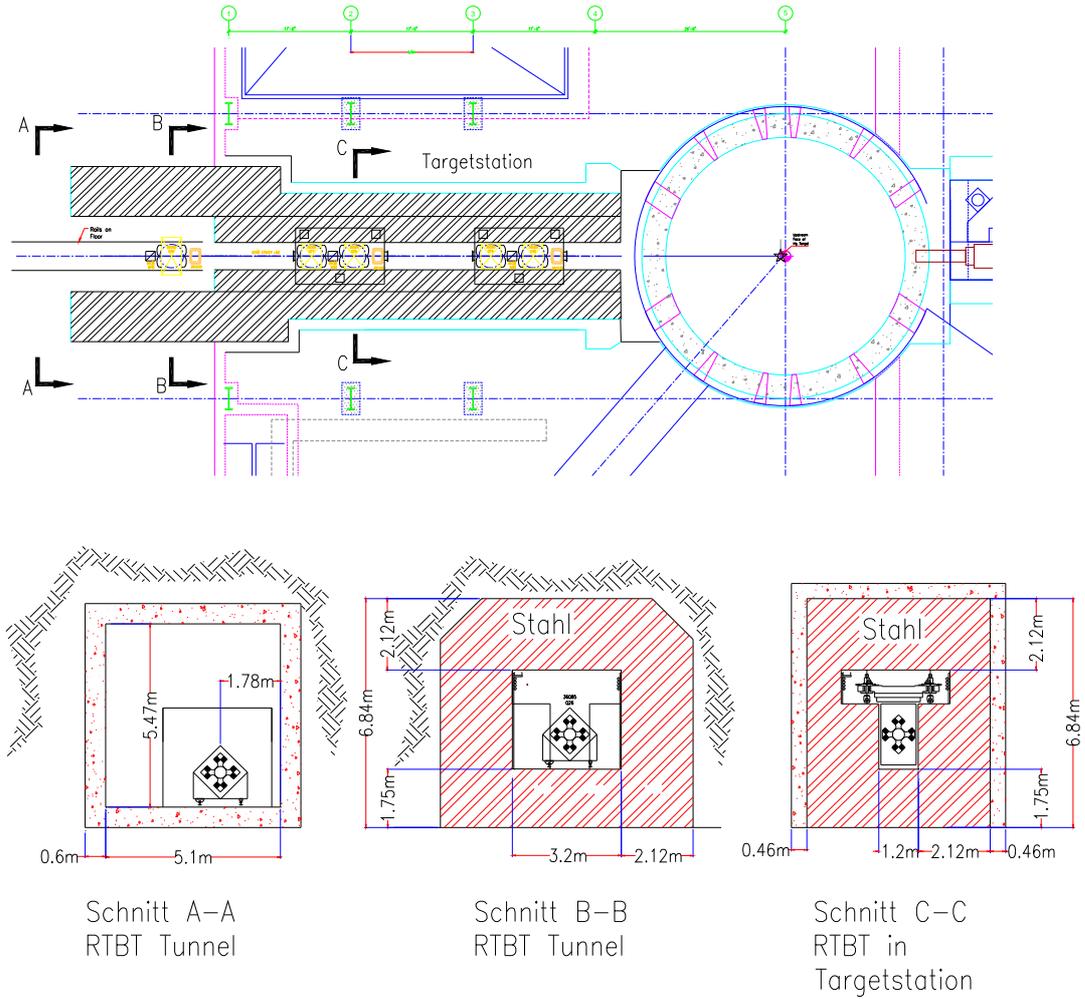


Abb. 7.1.1-1: Schnitte durch die Protonenstrahlführung SNS

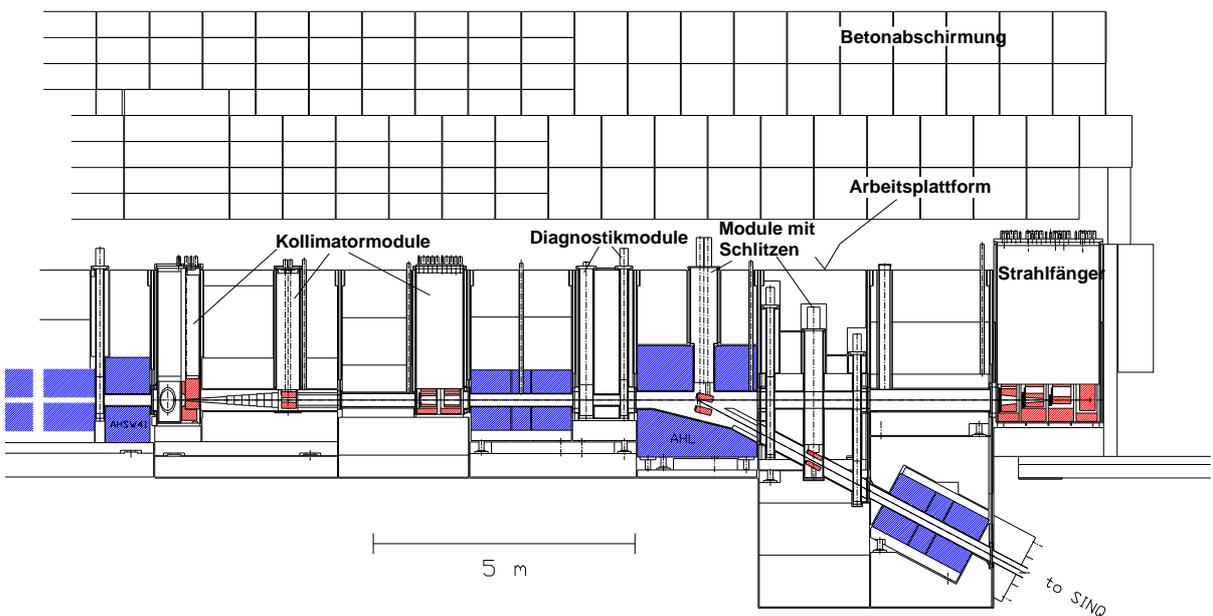


Abb. 7.1.1-2: SINQ Protonenstrahlführung Querschnitt /Hei 03/



Abb. 7.1.1-3: Modul der Protonenstrahlführung



Abb. 7.1.1-4: Arbeitsplattform oberhalb der Protonenstrahlführung

## 7.1.2 Abschirmung des Targetsystems

Eine der schwierigsten Aufgaben der Abschirmungsauslegung ist das Abschirmungsdesign des Targetsystems. Aus den im Kap. 2.2 angesprochenen Gründen ist die Abschirmung viel komplexer und aufwändiger als die eines Spaltreaktors. Dementsprechend werden auch die Abschirmungsberechnungen viel komplexer und aufwendiger. Es werden viele unterschiedliche Simulationen und Abschirmungsberechnungen benötigt, die auch in Experimenten validiert werden müssen, um die endgültige Detailauslegung der Abschirmung ausführen zu können.

Als ein Beispiel für die Komplexität der Abschirmungsrechnungen dient die folgende tabellarische Auflistung von Berechnungsmodellen und Systemen für Teilchentransport, die für die Auslegung der SNS-Abschirmung (Tab. 7.1.2-1) verwendet werden.

Tab. 7.1.2-1: Auflistung der Berechnungsmodellen und Anwendungen für die SNS- Abschirmungsanalyse nach /Joh 00a/

Berechnungsmodell	Analysenart	Prinzipielle Anwendung
CALOR	Kompletter Strahlungstransport – Code (alle Energienbereiche)	Neutronentransport, Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung
HETC	Hochenergie (E>20 MeV) Hadronentransport	Neutronentransport, Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung
SPECT	Analyse des Hochenergiehadronentransports	Neutronentransport, Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung
MCNP	Niedrigenergie (E<20 MeV) Neutronen-, Gamma-, und Elektronentransport	Neutronentransport, Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung
MCNPX	Kompletter Strahlungstransport – Code (alle Energienbereiche)	Neutronentransport, Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung
LAHET	Hochenergie (E>20 MeV) Hadronentransport und Analyse	Neutronentransport, Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung
MORSE	Niedrigenergie (E<20 MeV) Neutronen- und Gammatransport	Neutronentransport, Energiedeposition, Abschirmung
MICAP	Niedrigenergie (E<20 MeV) Neutronen- und Gammatransport	Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung
EGS4	Elektronen-, Positronen- und Gammatransport	Energiedeposition, Abschirmung
ORIHET95	Isotopenproduktion und Zerfallswärmeleistungsanalyse	Aktivierung, Zerfallswärmeleistung, Radioisotopenproduktion
ANISN	1-D Niedrigenergieneutronen und -Gammatransport	Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung
DORT	2-D Niedrigenergieneutronen und -Gammatransport	Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung
TORT	3-D Niedrigenergieneutronen und -Gammatransport	Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung
CASL	3-D Semi-Empirische Abschirmungsanalyse	Abschirmung
HILO	Vielgruppenwirkungsquerschnitt-Bibliothek für Energiebereich bis zu 2 GeV	Energiedeposition, Materialschädigung und Aktivierung, Abschirmung

Für die Abschirmungsauslegung eines Neutronenhochstromtargets müssen zuerst folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Auswahl der Abschirmungs- und Spaltfüllmaterialien, Zusammensetzung der Abschirmung (laminierte oder nicht laminierte Abschirmung), um eine minimale Äquivalenzdosis an der Außenseite der Abschirmung zu erzielen.
- Unterschied in der Dicke der Abschirmung für verschiedene Protonenstrahlenergien.
- Unterschied der Abschirmdicke in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung in Bezug auf den Protonenstrahl.
- Wärmedeposition und Kühlung der Abschirmungsstrukturen rund um das Target.
- Endgültige Ausführung der Abschirmung für die vorgegebene Äquivalenzdosis an der Abschirmoberfläche.

Die Tabelle 4.5-2 (Seite 49) zeigte einen Kostenvergleich für Abschirmungsmaterialien. Daraus ist klar zu sehen, dass Normalbeton und Stahl (abgesehen von Erdreich) die preiswertesten Abschirmungsmaterialien sind. Allerdings wird bei Verwendung von Normalbeton die Abschirmdicke im Vergleich zu Eisen um den Faktor 3,8 größer. Nicht immer kann eine so dicke Abschirmung gebaut werden. Die Anforderung einiger Experimentieranlagen, sie so nah wie möglich an den Moderatoren zu bauen, erfordert eine Abschirmung mit möglichst kleinem Radius vom Targetzentrum. Das ist ein Grund dafür, dass die Abschirmdicke nicht

beliebig groß werden darf. Auch die aufgrund dickerer Abschirmung entstehenden, zusätzlichen Kosten haben einen immensen Einfluss auf die Abschirmmaterialienwahl und das Abschirmungsdesign.

Die Targetsystemabschirmungen in allen bisher gebauten und geplanten Spallationsquellen bestehen aus einer Kombination aus Stahl oder Gussstahl und Beton. Auch Blei ist ein gutes Abschirmmaterial, jedoch bewirken die schlechte Festigkeit und der niedrige Schmelzpunkt, dass Blei nur in Stahlkanistern und für einige zusätzliche mobile Abschirmungen angewendet werden kann. Wolfram ist wegen seiner hohen Dichte und guter Hitzebeständigkeit für die Abschirmung sehr gut geeignet. Doch die hohen Beschaffungskosten des Wolframs begrenzen seine Anwendung. Zudem wird Wolfram bei der Wechselwirkung mit Hochenergiepartikeln gleichzeitig zu einer starken Neutronenquelle.

In der Praxis wird man Abschirmungen aus einer Kombination Fe-basierter Werkstoffe ausführen. Die gesamte Abschirmung in den gebauten und geplanten Anlagen besteht aus einzelnen Blöcken, die entsprechend vorgefertigt und auf der Baustelle zusammengesetzt werden. Aus Transport- und Handhabungsgründen sollten die Stückgewichte der Blöcke 60 t nicht überschreiten. Je nach Abschirmungsanforderung bestehen sie aus Stahl, Edelstahl, beschichtetem Stahl etc. Dabei sollte auf hohe Toleranzanforderungen der Blöcke weitgehend verzichtet werden. Bei der Zusammensetzung der Blöcke ergeben sich zwangsläufig Spalte von mehreren Millimetern. Deshalb sollten die Blöcke versetzt mit einer ausreichenden Überdeckung aufgebaut werden, so dass es keine direkte „Sichtlinie“ bis zu Quelle entsteht. Die Spalten zwischen den Blöcken schwächen jedoch die Abschirmwirkung. Deswegen sollten sie minimiert und verfüllt werden. Die Spaltverfüllung hängt von den an die Abschirmblöcke gestellten Anforderungen ab. Demontierbare Abschirmteile sollten nicht mit Mörtel, Sand oder Blei gefüllt werden. Zudem erschwert die Verfüllung der Spalten mit Mörtel oder Zement auch den späteren Rückbau der Anlage. In der ESS- Anlage wurde eine Abschirmung ohne Verfüllung der Spalte zwischen den Blöcken postuliert. /ESS 03/, /Han 03/, /But 03/. Die Oberfläche der Blöcke wurde, wo immer möglich, mit einer Verzahnung versehen, die bei einer Zahnhöhe von ca. 100 mm eine Materialüberdeckung von mehr als 85 % garantiert. Mit dieser Methode können die Blöcke ohne Probleme bewegt und die Abschirmung demontiert werden. Die Tab. 7.1.2-2 stellt eine Auflistung der verwendeten Spaltfüllmaterialien in verschiedenen Spallationsanlagen dar.

Tab. 7.1.2-2: Spaltfüllmaterialien in verschiedenen Targetblockabschirmungen

Targetblockabschirmung	Status	Spaltfüllmaterialien
SINQ Schweiz	Im Betrieb	Spezieller Sand hoher Dichte importiert aus Australien (hoher Fe-Gehalt)
SNS Oak Ridge USA	Im Bau	Mörtel hoher Dichte
J-PARC Japan	Im Bau	Mörtel hoher Dichte
ESS Deutschland	Nicht realisiert	Ohne Spaltfüllung, verzahnte Blöcke
SNQ Deutschland	Nicht realisiert	Hochreines Blei 99,9%

Im weiteren Kapitelverlauf werden die Abschirmungsanforderungen und Abschirmungsmaterialvorschläge beschrieben.

In der Literatur wurden auch Simulationen zur laminierten Abschirmung vorgestellt. In /Fil 02/ wurden für eine Platte aus 5 m Eisen und eine Platte aus 3 m Beton die radialen Dosisraten mit ANISN simuliert. Die intensive Neutronenquelle in dieser Simulation hatte die

Quellenenergie 700-800 MeV. Die Abb. 7.1.2-1 zeigt das Ergebnis der Simulation. Man erkennt, dass die Äquivalenzdosis im Bereich von 3-4,5 m im Beton kleiner als in Eisen ist. Dies resultiert aus der besseren Moderation und Absorption der Neutronen durch Beton im Energiebereich von 1 MeV bis 1 keV. Das im Eisen entstandene Spektrum enthält ca. 70 % der Neutronen in diesem Energiebereich. Dafür ist in einer Tiefe  $\geq 4,5$  m in der Abschirmung die Äquivalenzdosis im Beton größer als die im Eisen, da Beton die Hochenergieneutronen schlechter als Eisen abschirmt. Bei näherer Analyse findet man, dass der totale Neutronenfluss in einer Tiefe von 4 m in der Abschirmung im Beton um einen Faktor von ca. 10 niedriger liegt als im Eisen, der schnelle Neutronenfluss aber um ca. den gleichen Betrag an dieser Stelle höher ist. Die Schlussfolgerung aus dieser Simulation ist: Der innere Teil der Abschirmung sollte aus Eisen bestehen, um die Hochenergieneutronen abzuschirmen. Der äußere Teil von ca. 1 m sollte aus Beton bestehen, um die Äquivalenzdosis bis zu den vorgegebenen Grenzen zu reduzieren. Auch die Reineisenresonanz im Bereich von ca. 26 keV, das sog. Eisen-Fenster führt nicht unbedingt zur Anwendung einer laminaren Abschirmung, um das Fenster zu schließen. Dieses Phänomen beschränkt sich auf einen sehr schmalen Energiebereich, was zur Folge hat, dass schon kleine Verunreinigungen anderer Elemente im Stahl, z. B. Legierungsbestandteile, für die Unterdrückung dieses Effektes ausreichend sind.

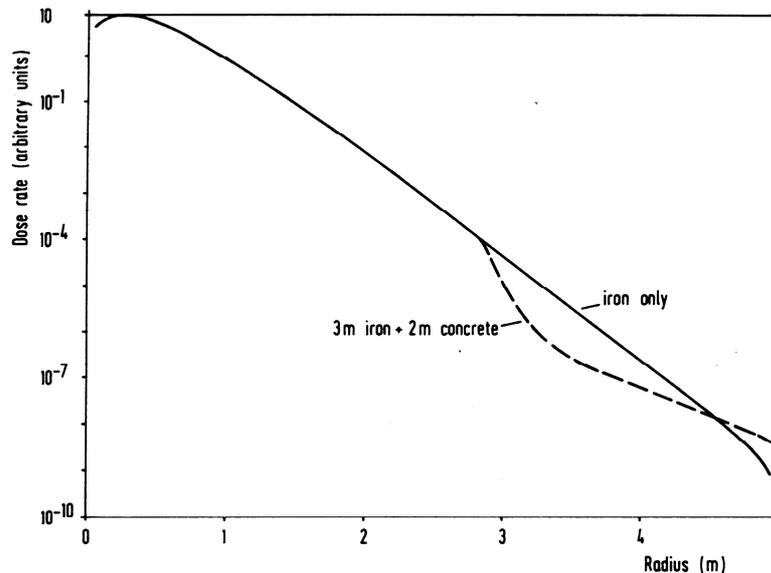


Abb. 7.1.2-1: Radiale Abhängigkeit der Äquivalenzdosis für Neutronen in Eisen/Beton-Abschirmungen /Fil 92/.

Auch Koprivnikar in /Kop 02/ führt mittels MCNPX-Codes eine Dosisberechnung durch. In dieser Simulation wurde ein Quecksilbertarget mit einem Protonenstrahl mit folgenden Parametern: 5 MW, mittlerer Strom 3,75 mA und 1,334 GeV, beschossen. Es wurden drei Abschirmungsmodelle untersucht:

- Modell 1 -besteht aus 475 cm Stahl und äußerem Betonmantel von 50 cm in Protonenstrahlrichtung
- Modell 2 –besteht aus 425 cm Stahl und äußerem Betonmantel von 100 cm in Protonenstrahlrichtung
- Modell 3 –besteht aus 325 cm Stahlschicht, gefolgt von 50 cm Betonschicht, dann wieder 100 cm Stahlschicht und zuletzt 50 cm Betonschicht.

Die Ergebnisse sind in der Abb. 7.1.2-2 und in der Tab. 7.1.2-3 zusammengestellt. Auch hier ist die Äquivalenzdosis im Betonbereich kleiner, was sich jedoch in der totalen Äquivalenzdosis für Neutronen an der Abschirmungsoberfläche aus oben angesprochenen Gründen aus-

gleicht. Auch diese Simulation zeigt keine Vorteile von laminierten Abschirmungen gegenüber einfachen Zweischicht-Modellen bestehend aus innerem Abschirmungsteil aus Eisen und äußeren aus Betonmantel.

In der Spallationsquelle J-PARC wurde eine 200 mm dicke Normalbetonschicht zwischen den Eisenschichten eingesetzt (siehe Abb. 7.1.4-10, Kap. 7.1.4). Diese Betonzwischenschicht scheint aus den o. g. Gründen überflüssig zu sein. Die genaueren Äquivalenzdosismessungen nach der Inbetriebnahme der Anlage wären für weitere Abschirmungsuntersuchungen bezogen auf das Design sehr hilfreich. Sie können die jetzige Abschirmauslegung verifizieren.

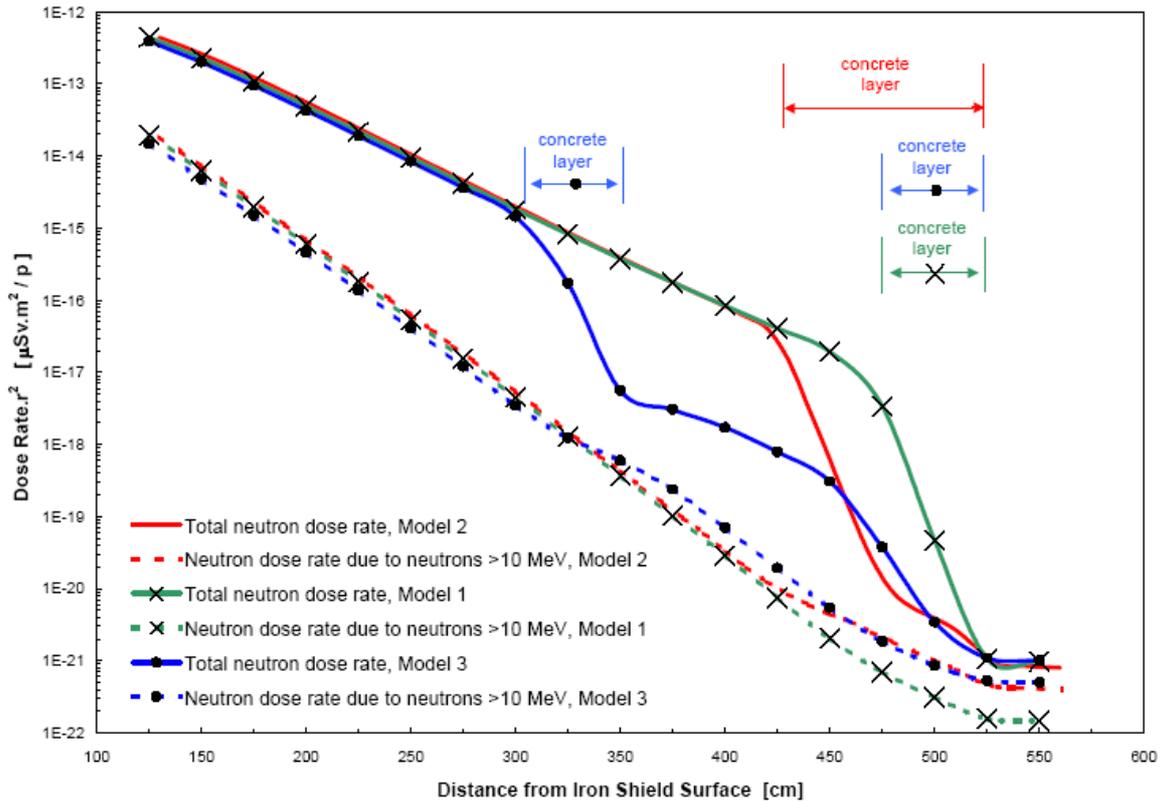


Abb. 7.1.2-2: Abhängigkeit der Äquivalenzdosis für Neutronen für verschiedene Eisen/Beton-Abschirmungskonfigurationen in Richtung des Protonenstrahls /Kop 02/

Tab. 7.1.2-3: Vergleich der Äquivalenzdosis für verschiedene Abschirmungsmodelle nach /Kop 02/

Richtung bezogen auf Protonen- strahl	Abschirmungsdicke		Totale Neutronen- Äquivalenzdosis	Hochenergie- neutronen Ä- quivalenzdosis	Anteil der Hoch- energieneutronen an der totalen Äquivalenzdosis
	[cm]				
	Eisen	Beton			
<b>Modell I</b>					
0°	475	50	0,8	0,2	25
<b>Modell II</b>					
0°	425	100	0,75	0,6	80
<b>Modell III</b>					
0°	325+50+100+50		0,8	0,6	75

Eine interessante Fragestellung für den Abschirmungsdesigner ist die Untersuchung der unterschiedlichen Abschirmdicken für verschiedene Protonenenergien. In /Clo 83/ wurden solche Berechnungen in gekoppelten Verfahren mit Monte-Carlo-Code HETC/KFA und eindimensionalem Transportcode ANISN analysiert. In der Abb. 7.1.2-3 ist die berechnete Äquivalenzdosis jeweils für die Protonenenergie von 0,35 GeV und 1,1 GeV gezeigt. Die Dosiskurve von 1,1 GeV wurde, um dieselbe Äquivalenzdosis mit der 0,35 GeV -Kurve zu erhalten, extrapoliert. Daraus resultiert eine unterschiedliche Abschirmdicke von nur 80 cm Eisen.

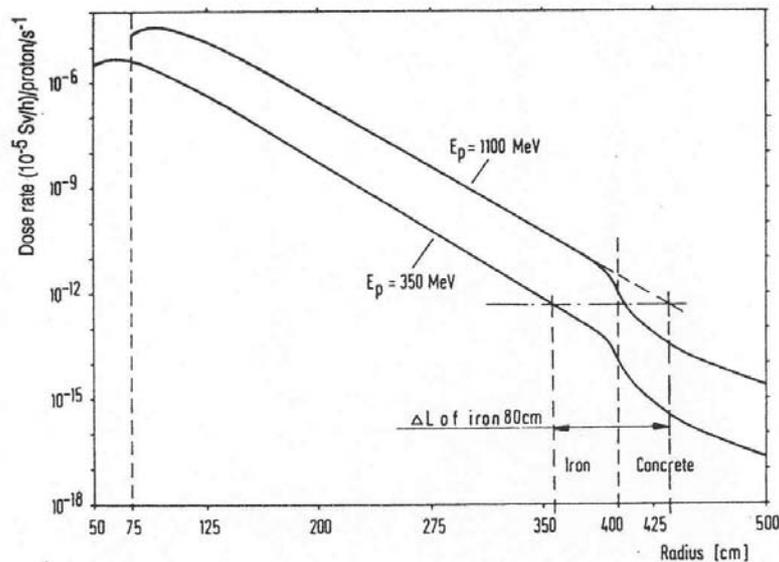


Abb. 7.1.2-3: Äquivalenzdosisraten -Simulation (HETC-ANISN) in Protonenstrahlrichtung mit Bestimmung der zusätzlichen Abschirmdicke durch Vergleich von 0,35 GeV und 1,1 GeV Protonen auf ein Urantarget /Clo 83/

Durch den Targetbeschuss mit Protonen ergibt sich eine stark anisotrope Verteilung der schnellen Neutronen. In der Vorwärtsrichtung ( $0^\circ$  zum Protonenstrahl) reicht die höchste Neutronenenergie bis zur Energie des wechselwirkenden Primärteilchens (siehe auch Kap. 2.2.1). Dies belegen auch die durchgeführten Simulationen bei /Clo 83/ und /Kop 02/. In der Abb. 7.1.2-4 ist ein Teilchenspektrum in verschiedenen Winkeln zum Protonenstrahl (5 MW, 1,334 GeV) dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass vor allem das Neutronenspektrum in Vorwärtsrichtung wesentlich härter als in Rückwärtsrichtung ist (Spektren: rot Neutronen  $0^\circ$ , blau Neutronen  $90^\circ$ , grün Neutronen  $150^\circ$ ). Außerdem ist die Winkelverteilung sehr stark nach vorwärts gerichtet. Dies hat zur Folge, dass sich die maximale Abschirmdicke in Vorwärtsrichtung und die minimale in Rückwärtsrichtung zum Protonenstrahl ergibt.

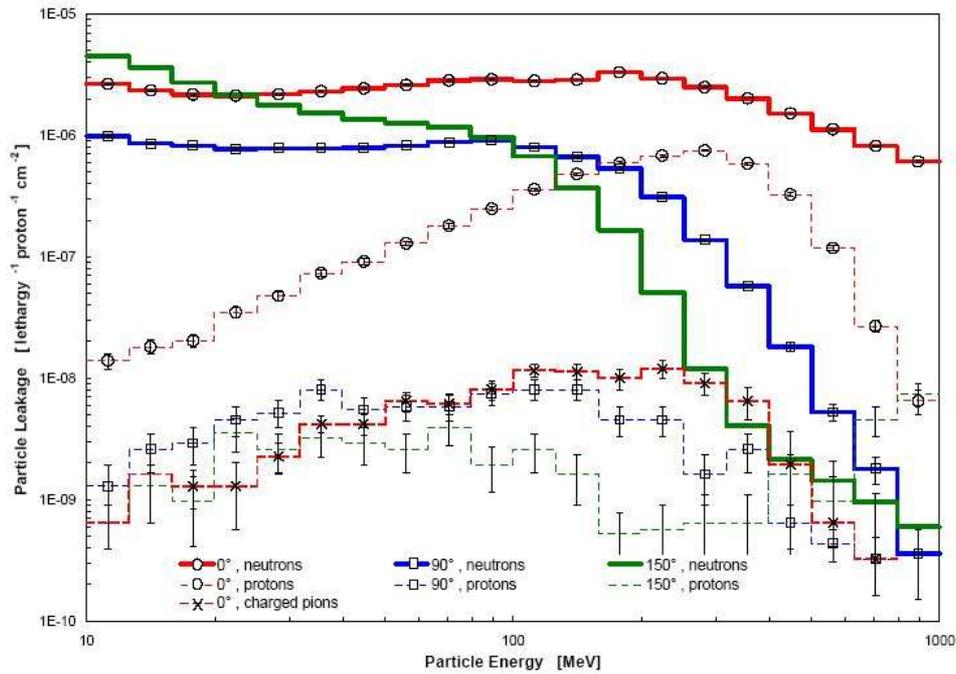


Abb. 7.1.2-4: Teilchenspektren in verschiedenen Winkeln zum Protonenstrahl /Kop 02/

Abschirmungssimulationen von /Mae 02a/ (Abb. 7.1.2-5) zeigen, dass die Hochenergieneutronen die totale Äquivalenzdosis in der Vorwärtsrichtung und die sekundäre Gammastrahlung (Photonen) die totale Äquivalenzdosis in der Rückwärtsrichtung dominieren. Dies bestätigt auch die asymmetrische Ausführung der Abschirmung (bezogen auf Targetzentrum) in den Spallationsquellen.

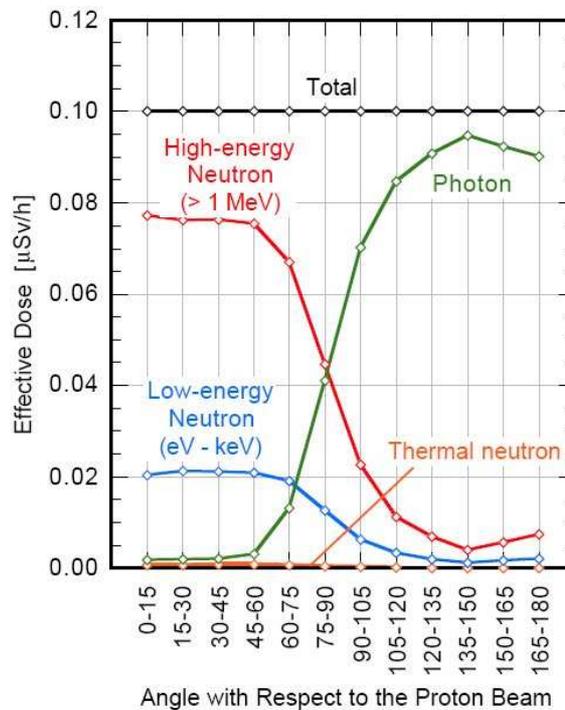


Abb. 7.1.2-5: Verteilung der Neutronen- und Photonenspektren bezogen auf verschiedene Winkel zum Protonenstrahl /Mae 02a/

Tab. 7.1.2-3 zeigt Abschirmdicken in verschiedenen gebauten und geplanten Spallationsquellen. Aus der Tabelle erkennt man, dass nur die Abschirmung der Anlage SNS-USA in der

Vorwärts und Rückwärtsrichtung des eintreffenden Protonenstrahls gleich stark ist. In der ESS- und SNQ-Anlage wurde diese Asymmetrie durch Verschiebung des Targets in Richtung des eintreffenden Protonenstrahls bei zylinderförmiger Außengeometrie der Abschirmung erreicht. In der J-PARC-Anlage wurde der äußere Betonmagnetitmantel um 1,6 m vergrößert (siehe Abb. 7.1.2-6 und 7.1.2-7).

Tab. 7.1.2-4: Vergleich der verschiedenen Abschirmdicken für verschiedene Spallationsanlagen /Han 03/

Spallationsquelle	Protonenstrahlenergie	Strahlleistung	Abschirmdicken bezogen auf die Richtung des Protonenstrahls			
			Vorwärts	Rückwärts	Nach Oben	Nach Unten
ESS Europa	1,334 GeV 3,75 mA	2x5,0 MW	7,75 m Stahl +0,5 m Normalbeton	5,0 m Stahl +0,5 m Normalbeton	4,8 m Stahl +1,7 m Normalbeton	3,3 m Stahl +4,0 m Normalbeton
SNQ – KFA Jülich	1,1 GeV 5,0 mA	5,5 MW	5,5 m Stahl +1,0 m Normalbeton	4,9 m Stahl +1,0 m Normalbeton	4,9 m Stahl +1,0 m Normalbeton	6,0 m Stahl +1,0 m Normalbeton
SNS Oak Ridge USA	1,0 GeV 1,4 mA	1,4 MW	5,0 m Stahl +1,25 m Borbeton	5,0 m Stahl +1,25 m Borbeton	4,9 m Stahl +1,25 m Borbeton	3,2 m Stahl +1,25 m Borbeton
J-PARC Jaeri Japan	3,0 GeV 0,33 mA	0,9 MW	4,8 m Stahl +3,2 m Magnetitbeton	4,8 m Stahl +1,6 m Magnetitbeton	6,9 m Stahl +3,2 m Normalbeton	3,2 m Stahl +3,2 m Normalbeton

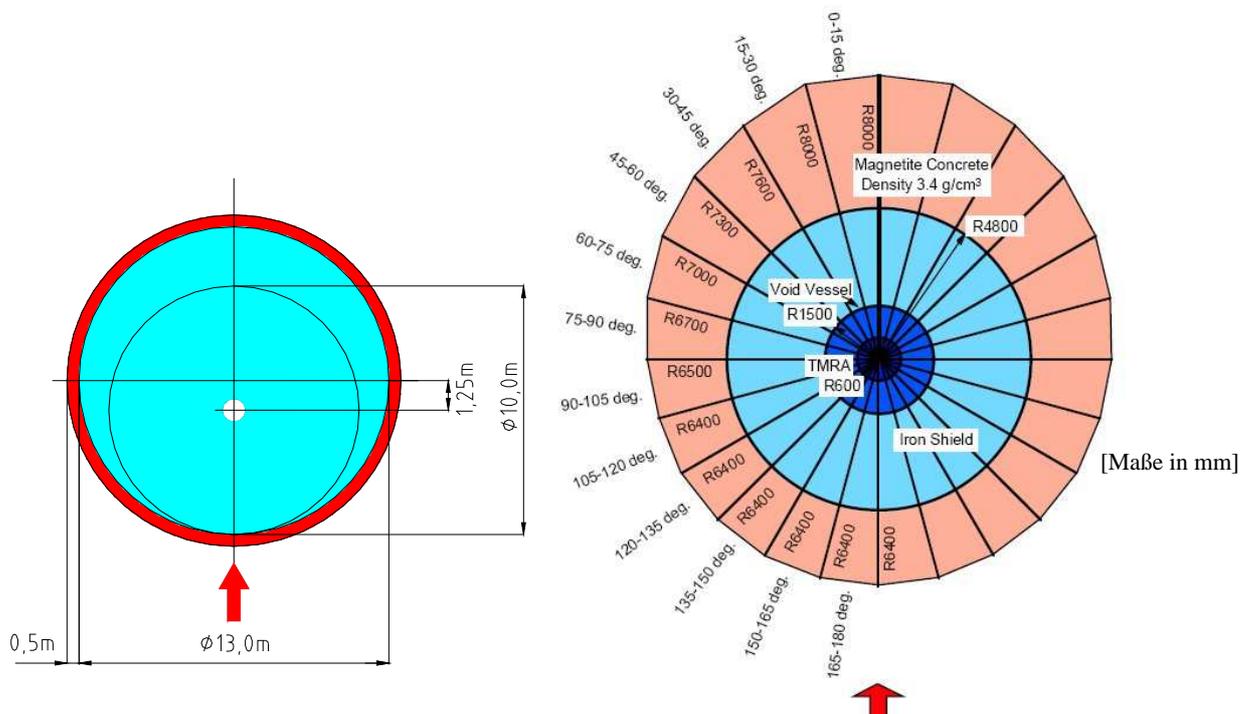


Abb. 7.1.2-6: ESS-Abschirmblock /Han 03/  
( $E_p=1,334$  GeV)

Abb. 7.1.2-7: J-PARC-Abschirmblock  
( $E_p=3,0$  GeV) /Mae 02a/

Beim Vergleich der ESS- Abschirmung für eine Protonenstrahlenergie von 1,334 GeV und J-PARC- Abschirmung für Protonenstrahlenergie von 3 GeV erkennt man ziemlich große

Unterschiede in der Abschirmungsausführung. Die J-PARC Abschirmung ist in Protonenstrahlrichtung um ca. 2,5 m Schwerbeton dicker als bei ESS. Dafür ist die Eisenabschirmdicke der ESS-Spallationsquelle um 1,7 m dicker als bei J-PARC.

Im Target, Targetumgebung und im inneren Teil der Abschirmung wird ein großer Teil der Strahlleistung des Protonenstrahls als Wärmedeposition abgegeben. Teilchentransportsimulationen für die ESS-Targetanlage zeigen, dass 47 % der Protonenenergie (ca. 2,4 MW) der 5 MW Strahlleistung im Target, ca. 0,9 MW im Reflektor und 0,7 MW in der Abschirmung deponiert wird /Fil 00a/, /Fil 03/, /Len 04/.

Für die Spallationsquelle J-PARC (0,9 MW Leistung) ergaben sich ähnliche Verhältnisse. Die Wärmedeposition setzt sich nach /Mae 02/ bei 0,9 MW Protonenstrahl bei der J-PARC Spallationsanlage wie folgt zusammen:

Target –	533,9 kW
Reflektor –	196,4 kW
Reflektorstopfen -	11,0 kW
Moderator -	23,1 kW
Protonstrahlfenster -	3,1 kW
Wassergekühlte Abschirmung -	94,2 kW
Innere Abschirmung	28,1 kW
<u>Äußere Abschirmung</u>	<u>10,0 kW</u>
Summe	ca. 900 kW

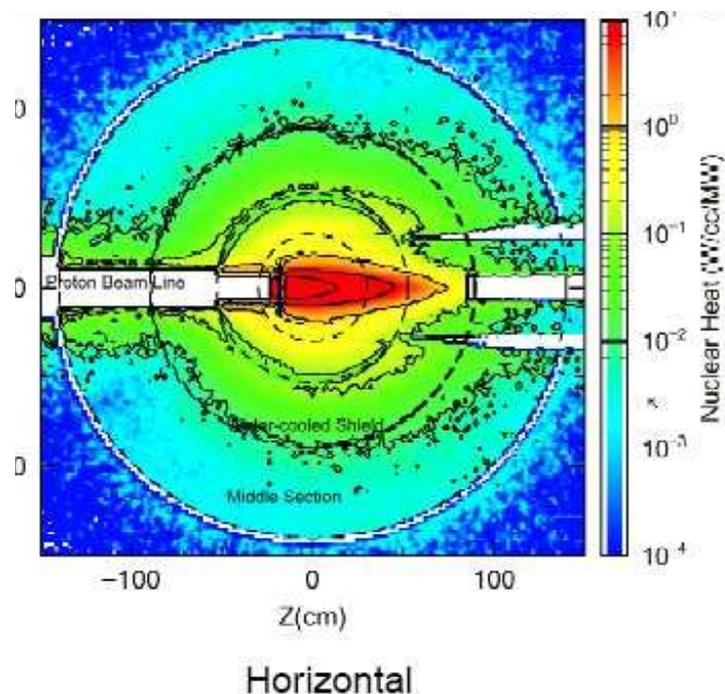


Abb. 7.1.2-8: Wärmedeposition zur Ermittlung der Wärmedeposition in der Abschirmung J-PARC (0,9 MW-Leistung) /Mae 02/

Alle Komponenten, in denen Wärme anfällt, müssen gekühlt werden. Dazu gehören vor allem das Target selbst und die Komponente im Targetnahbereich. Als Kühlmedium wird in der inneren Abschirmung vor allem Wasser eingesetzt. Die äußere Abschirmung wird in einigen Spallationsquellen (SINQ, J-PARC, ESS) mittels Heliumgas gekühlt. Die Abb. 7.1.2-9 zeigt

den Kühlkanalverlauf in den äußeren Abschirmungsstrukturen bei der J-PARC Spallationsquelle. Die hier anfallende Wärmeleistung von ca. 10 kW wird durch die Heliumumwälzung abgeführt.

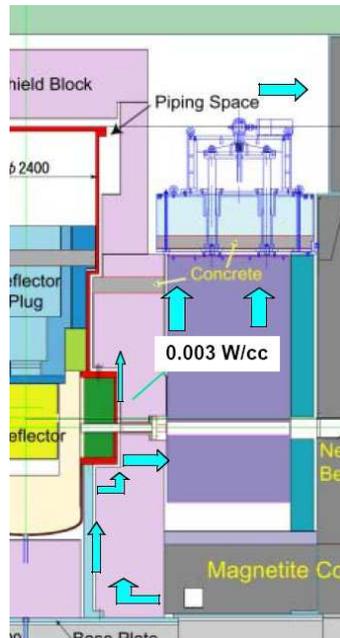


Abb. 7.1.2-9: Heliumumwälzung (blaue Pfeile) in der äußeren Abschirmung bei J PARC (Japan) /Tak 02/

Für die Kühlung der inneren Abschirmungsstrukturen wird aus Gründen der Neutronenabsorption Wasser in Form von Leicht- und Schwerwasser verwendet. Schwerwasser ( $D_2O$ ) wird überall dort verwendet, wo eine niedrige Absorption von thermischen Neutronen gefordert wird. In den meisten Spallationsanlagen wird Schwerwasser für die Kühlung des Reflektors verwendet. Die Kühlung der inneren Abschirmung oder auch der Rückkühlung des Quecksilberkreislaufes (ESS) kann mit Leichtwasser erfolgen /But 05/. Grundsätzlich sollten die schwerzugänglichen Komponenten innerhalb der Targetabschirmung mit je zwei redundanten Kühlkreisen ausgestattet werden. Beim Versagen eines der beiden Kühlkreise (z.B. Verstopfen, Leck) kann der zweite die Kühlfunktion voll übernehmen. Bei redundanter Kühlung müssen stets beide Kühlkreisläufe angeschlossen sein und sich im Betrieb befinden. Die Kühlschlangen in der Abschirmung müssen eine gute Wärmeabfuhr gewährleisten. Es ist darauf zu achten, dass die Kontaktfläche zwischen Kühlmedium und zu kühlender Struktur so groß wie möglich wird. Bei der Spallationsquelle SNQ-KFA Jülich wurde eine Einbettung der Kühlrohre in Bleimatten angedacht /Bau 81/. Bei der Spallationsquelle ESS wurden ganze Blöcke mit eingearbeiteten Kühlkanälen im targetnahen Bereich vorgeschlagen /Han 03/. Die Kühlwasserrohre müssen so verlegt werden, dass geradlinige Durchbrüche durch die Abschirmung vermieden werden. Andernfalls treten im Verrohrungsbereich an der Abschirmoberfläche Stellen höherer Ortsdosisleistung (sog. Hot-Spots) ein. Das Kühlkonzept mit der Verrohrung soll die generelle Montierbarkeit sowohl für den Einbau- als auch für einen evtl. Ausbaufall berücksichtigen.

Die Abschirmung des Targetblocks ist in modernen Spallationsanlagen in einer zylindrischen Form aus Eisen-basiertem Material (Abb. 7.1.2-6, Abb. 7.1.2-7) auf einem 2 bis 4 m starken Betonfundament aufgebaut. Die Eisenabschirmung wird zusätzlich von einer Betonschale umgeben, die gleichzeitig die Tragfunktion für die obere Abschirmung übernimmt. Nach oben ist der Abschirmungszyylinder mit einer abnehmbaren Beton- bzw. Beton/Eisen Decke

abgedeckt. Die gesamte Abschirmung ist aus vorgefertigten Blöcken aufgebaut, die auf der Baustelle zusammengesetzt werden. Die Targetblockabschirmung besteht aus verschiedenen Abschirmungsbereichen, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Die jeweiligen Abschirmbereiche sind in sog. Linersystem untergebracht. Ein solches Linersystem besteht aus einem inneren und einem äußeren Liner. Der Abschluss des Linersystems zur Protonenstrahlführungsatmosphäre (Vakuum) erfolgt über Protonenstrahlfenster und zur Heißen-Zelle-Atmosphäre über die Dichtung auf dem Targetwagen. Die Liner bilden jeweils einen hermetischen Einschluss für das gebildete Volumen. Auslegungskriterium für den inneren Liner ist die Forderung nach vertretbarer Strahlenschädigung während der Lebensdauer der Anlage und die Druckbelastung während der Lebensdauer beim Normalbetrieb und bei Störfällen. Die Einschlusskonzepte unterscheiden sich von Anlage zu Anlage je nach Einschlussforderungen und Einschlussphilosophie (siehe auch /But 05/).

Im Allgemeinen wird die Targetblockabschirmung wie folgt unterteilt:

- Innere Targetblockabschirmung – In diesen Strukturen werden das Target, der Reflektor die Moderatoren sowie die gekühlten Abschirmblöcke integriert. Diese Abschirmung ist in einem Inneren Liner untergebracht. Sie beinhaltet auch Teile, die zu Wartungszwecken demontiert werden müssen. Z.B. bewirkt der regelmäßige Austausch des Reflektors gleichzeitig den Ausbau des daran anschließenden inneren Teils der Abschirmung. Aus dem Grunde kann die innere Abschirmung in die untere innere Abschirmung (nicht beweglich) und die obere innere Abschirmung (abnehmbar) unterteilt werden. In diesem Bereich befinden sich aktiv wassergekühlte Abschirmstrukturen. Die innere Targetblockabschirmung muss folgende Bedingungen erfüllen:
  - Keine durchgehende Spalten
  - Korrosionsbeständig
  - Staubfrei
  - Plane Auflageflächen
  - Keine Spaltverfüllung in der beweglichen Abschirmung.

In diesem Bereich befindet sich auch das Target. Das Target ist in den meisten Spallationsquellen (ISIS, SNS, J-PARC, ESS) auf einem Wagen mit einer dicken Stahlabschirmung aufgebaut. Der Wagen wird zur Wartungs- und Reparaturzwecken in die Heiße-Zelle weggefahren (Abb. 7.1.2-10)

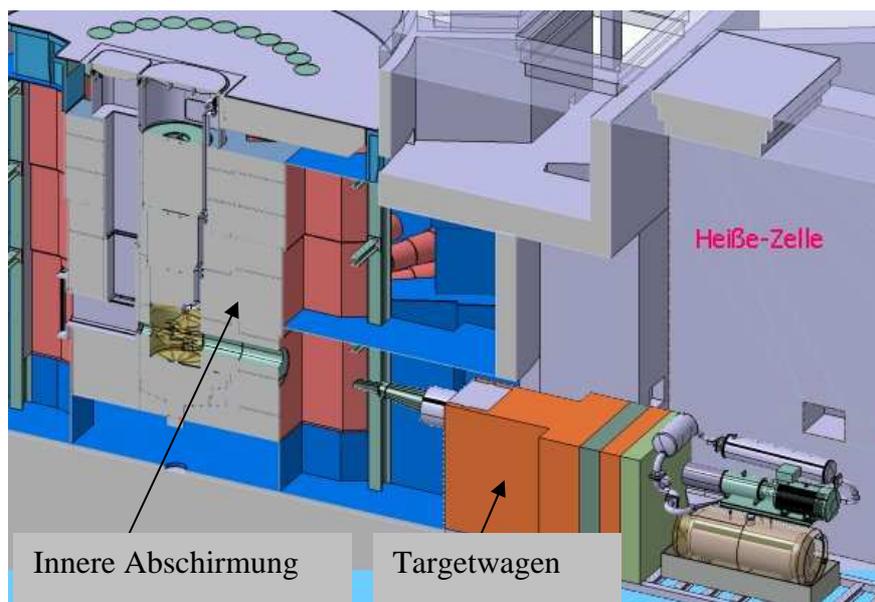


Abb. 7.1.2-10: Targetwagen in der Heißen-Zelle der Spallationsquelle ESS /But 04/.

- Strahlverschlüsse – Die innere Targetblockabschirmung ist mit Strahlverschlüssen umgeben. Die Hauptfunktion der Strahlverschlüsse ist die Schließung und Öffnung des Neutronenstrahlkanals für die Auskopplung der in den Moderatoren erzeugten Neutronen. Zu weiteren Aufgaben der Strahlverschlüsse gehören:
  - Führung der Neutronen von den Moderatoren zu den jeweiligen Experimenten.
  - Abschalten der Strahlung und ausreichende Abschirmung in der geschlossenen Position.
  - Aufnahme und Positionierung der Strahlrohreinsätze.
  - Sicherstellen der reproduzierbaren Strahlrohreinsatzpositionierung.
  - Minimierung der für die Experimente störenden Strahlungskomponenten (z.B.  $\gamma$  – Strahlung oder Neutronen höherer Energie).
  - Im Störfalle (Stromausfall, Ausfall des Antriebssystems, etc.) selbsttätiges Schließen des Kanals.

Die Strahlverschlüsse sind bei den meisten Neutronenquellen innerhalb des äußeren Liners untergebracht (nur bei ESS im inneren Liner). Sie sind in Form von Hubverschlüssen ausgeführt. Der Antrieb erfolgt über Spindelhubtriebe, die im oberen Bereich der Abschirmung untergebracht sind. In den Strahlverschlüssen sind die inneren Strahlrohreinsätze in Form von Neutronenleitern angebracht. Die erforderliche reproduzierbare Positionierung und die Zugänglichkeit im Reparaturfall der Strahlrohreinsätze stellt die größte Herausforderung der konstruktiven Bearbeitung dar (siehe /Han 03a/). Bei ESS wurden sie in Form von Drehverschlüssen in entsprechenden Abschirmblockaufnahmen ausgeführt /Han 03a/, (Abb. 7.1.2-11).

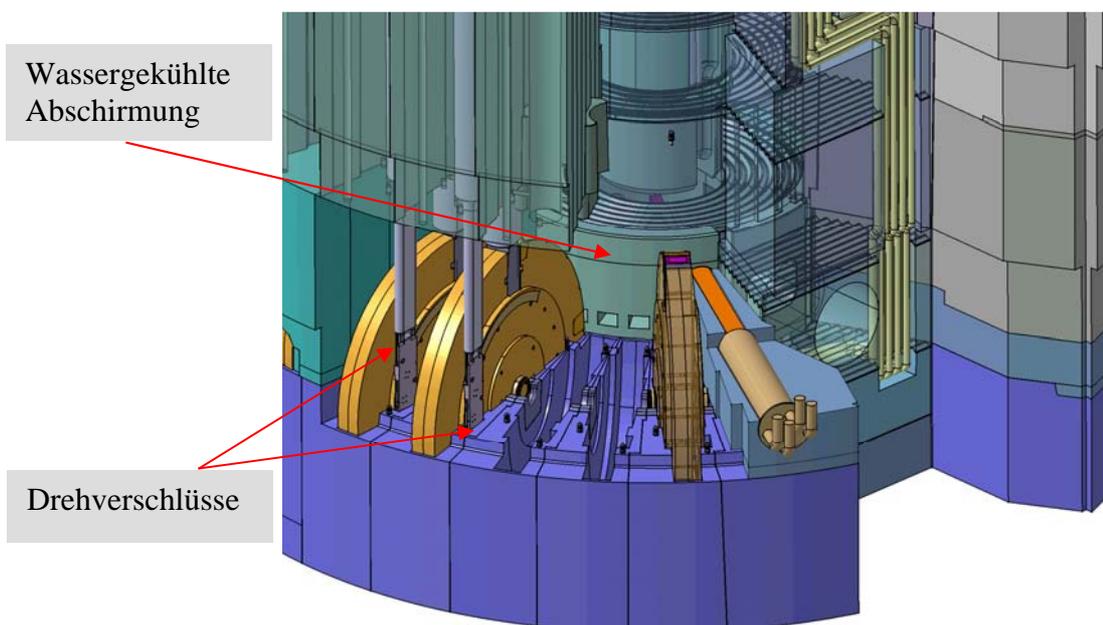


Abb. 7.1.2-11: ESS- Spallationsquelle innere Abschirmung mit integrierten Drehverschlüssen /Han 03a/.

Aus sicherheitstechnischer Sicht muss der Neutronenstrahlverschluss die Äquivalenzdosis am Probenort bis zu vorgegebenen Grenzen reduzieren (in den meisten Quellen  $10 \mu\text{Sv/h}$ ). An der Stelle dominieren die niedrigenergetischen Neutronen (Energiebereich von eV-keV) die totale Äquivalenzdosis. Aus dem Grunde ist der Einsatz von wasserstoffhaltigen Materialien in der Abschirmungsstruktur für die effektive Reduktion der totalen Äquivalenzdosis erforderlich. In der Abb. 7.1.2-12 ist die Ausführung des Strahlverschlusses in der Spallationsquelle J-PARC dargestellt. Der Verschluss besteht aus 1,8 m Stahl mit integriertem Polyäthylenblock (0,2 m dick).

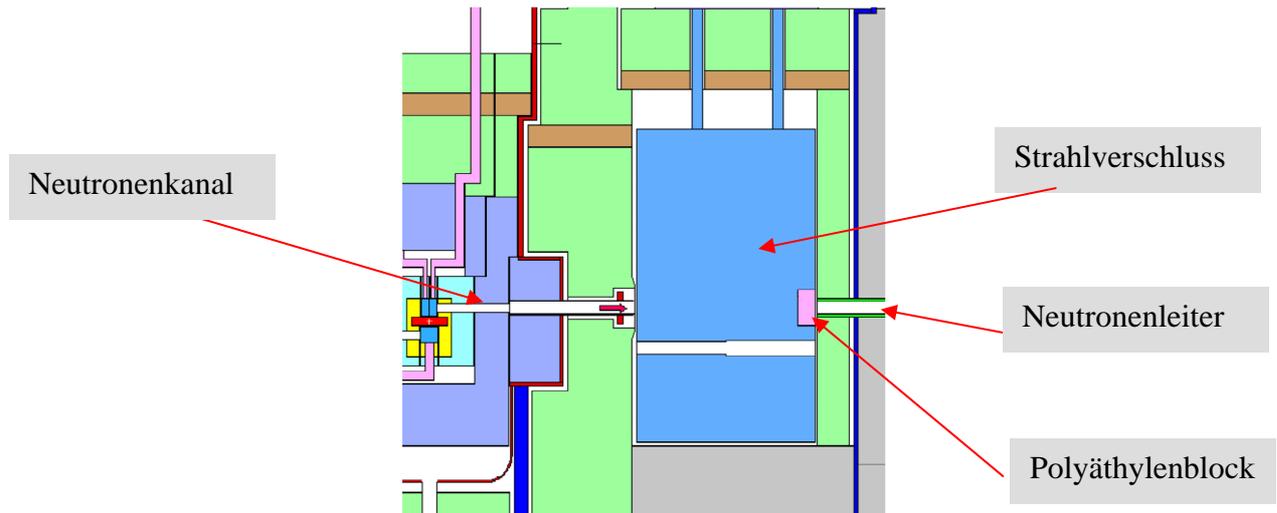


Abb. 7.1.2-12: Strahlverschluss mit Polyäthylen in J-PARC-Spallationsquelle /Mae 02a/

- Äußere Targetblockabschirmung – Die äußere Targetblockabschirmung ist mit dem äußeren Liner umschlossen. Auf dem Betonfundament ist eine Basisplatte horizontal ausgerichtet und mit Ankerschrauben befestigt. Auf dieser Platte ist die erste Blockebene im äußeren Liner verankert. Die beiden Liner bilden jeweils eine vertikale, gasdichte Abgrenzung. Sie sind aus rostfreiem Stahl gefertigt. Für die Abschirmung gelten im Hinblick auf die Spaltendurchgängigkeit und die Materialüberdeckung zwischen den Blöcken die allgemeinen Anforderungen – keine durchgehende Spalten, Blockschichten zueinander versetzt. In dieser Abschirmung sind die Strahlrohre für die Auskopplung der Neutronen integriert. Die niedrige Wärmedeposition in der äußeren Abschirmung erfordert keine aktive Kühlung der Abschirmung. Der obere Bereich der Targetblockabschirmung die sog. Deckenabschirmung ist mit den beweglichen Beton- bzw. Beton/Eisen- Abschirmungsriegeln abgedeckt. Diese Abschirmung ist für die Reduzierung des Skyshineeffektes ausgelegt (Abb.7.1.2-13) und kann gegenfalls verstärkt werden.

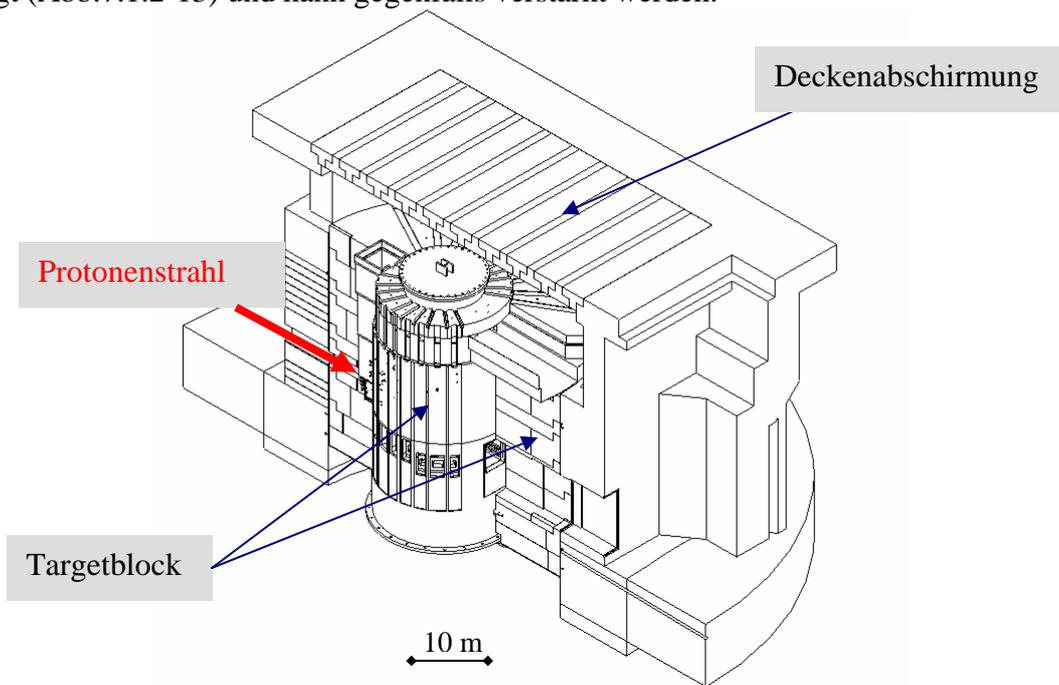


Abb. 7.1.2-13: Abschirmungsriegel in der SNS - Spallationsquelle /McN 01a/

- Heiße-Zelle – Für die Handhabung aktivierter und kontaminierter Komponenten innerhalb der Targetstation ist die sog. Heiße-Zelle vorgesehen. Außerdem sind noch die Dekontaminations- und Transportzelle vorgesehen, die der Aus- bzw. Einschleusung der Komponenten dienen. In der Heißen-Zelle erfolgen die Handhabungsvorgänge nur fernbedient. In der Spallationsquelle wird die Heiße-Zelle primär für den Wechsel des Targets oder für die Wartung der Targetwagenkomponenten verwendet. Die Abschirmung ist vor allem gegen von aktivierten Komponenten ausgehende Strahlung sowie gegen Strahlung von aktivierten Medien der zu öffnenden Kreisläufe, ausgelegt. Die Heißen-Zellenabschirmung wird in Form von dicken Betonwänden mit integrierten Manipulatoren sowie Bleifenstern ausgeführt (siehe Abb. 7.1.2-14). In der Abb. 7.1.2-15 ist der Aufbau der ESS - Targetstation mit den jeweiligen Zellen schematisch dargestellt.



Abb. 7.1.2-14: Heiße- Zellenmanipulatoren in der Spallationsquelle ISIS /Lüid 03/

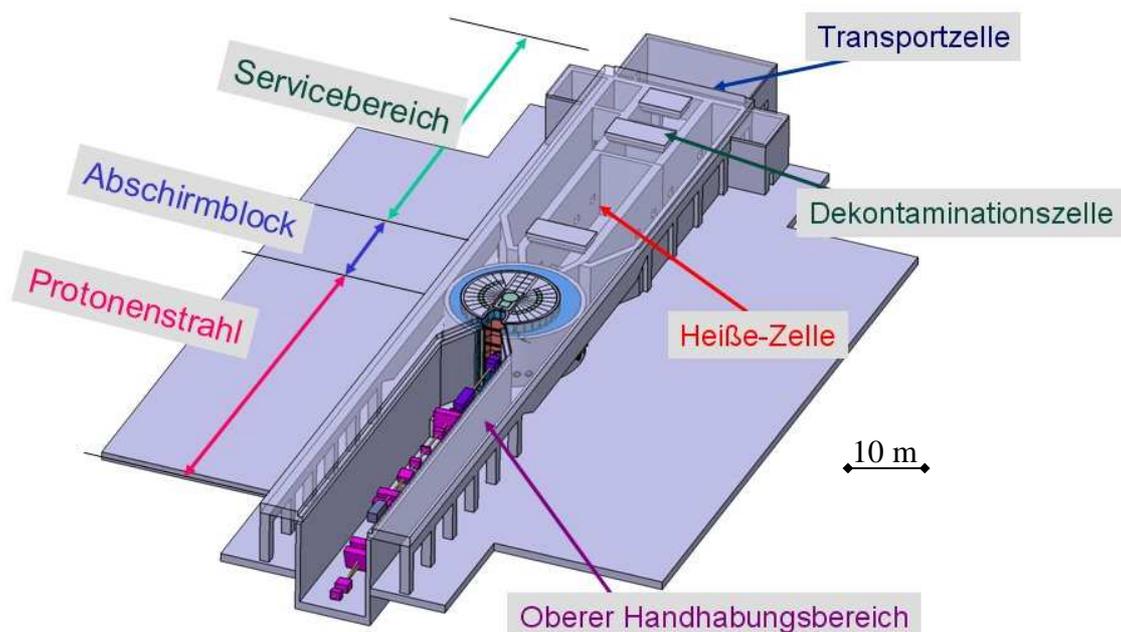


Abb. 7.1.2-15: Targetstation ESS - Schematische Darstellung /Lüid 03/

### 7.1.3 Anforderungen an die Targetabschirmung

Die Targetabschirmung ist aus einzelnen Blöcken aufgebaut. Die angesprochenen verschiedenen Targetblockbereiche stellen unterschiedliche Anforderungen an die Abschirmung. Die wichtigsten Anforderungen an die Targetabschirmung sind in der Tab. 7.1.3-1 zusammengestellt.

Tab. 7.1.3-1: Anforderungen an die Targetabschirmung

Abschirmung	Mechanische Bearbeitung	Oberflächenqualität	Abschirmung abnehmbar	Materialauswahl	Anforderungen
Innere Abschirmung unten	teilweise	niedrig	nur im Notfall	- Gusseisen mit 20 % Recyclingmaterial, - Stahl niedriger Qualität	- Keine durchgehenden Spalten, - Plane Auflageflächen, - Spaltverfüllung möglich
Innere Abschirmung oben	ja	hoch	ja	- Gusseisen oder Stahl niedriger Qualität beschichtet, - Edelstahl	- Keine durchgehenden Spalten, - Plane Auflageflächen, - Keine Spaltverfüllung - Abnehmbare Blöcke - Korrosionsbeständig - Innere Oberflächen der Kühlkanäle rostfrei - Dekontamierbar - Staubfrei
Äußere Abschirmung	Nur die unterste Lage	niedrig	nein	- Gusseisen mit 20 % bis 50 % Recyclingmaterial, - Stahl niedriger Qualität, - Unspezifizierter Stahl	- Keine durchgehenden Spalten, - Plane Auflageflächen - Spaltverfüllung erforderlich
Abschirmung der Protonstrahlführung	teilweise	niedrig	teilweise	- Gusseisen mit 20 % bis 50 % Recyclingmaterial, - Stahl niedriger Qualität, - Unspezifizierter Stahl - Beim Bedarf Oberflächen beschichtet - Zusätzliche Bleiabschirmung möglich	- Keine durchgehenden Spalten, - Plane Auflageflächen - Spaltverfüllung erforderlich - Obere Abschirmungsschicht abnehmbar - Oberflächenschutz mittels Lackierung möglich - Modularer Aufbau der Protonstrahlführung
Deckenabschirmung	nein	niedrig	ja	- Normalbetonriegel - Riegel aus Stahl niedriger Qualität	- Keine durchgehenden Spalten, keine Spaltverfüllung erforderlich - Plane Auflageflächen - mittels Kran abnehmbare Riegel
Äußerer Betonmantel	nein	niedrig	nein	- Normalbeton - Magnetitbeton - Borbeton	- Auslegung als Aufnahmekonstruktion für die Deckenabschirmung sowie Stützkonstruktion für den äußeren Liner
Betonfundament	Nur die Auflagefläche für die Basisplatte	Oberschicht – hoch Ansonsten niedrig	nein	Normal Beton	- Fundamentauslegung für die Targetabschirmung - Oberfläche bearbeitet - Anker für die Abschirmungsaufnahme ausgelegt

### 7.1.4 Beispiele der Targetstationabschirmung

Die folgende Zusammenstellung zeigt die Ausführung der Targetstationabschirmung bei derzeit betriebenen und im Bau befindlichen Spallationsquellen.

#### Spallationsquelle SINQ Schweiz

Die Spallationsquelle SINQ –Schweiz ist seit Juni 1996 in Betrieb.

Die Hauptparameter:

Protonenstrahlenergie:	0,59 GeV
Protonenstrahlleistung:	0,7 MW
Mittlere Stromstärke:	1,2 mA
Pulsfrequenz:	kontinuierlich
Targetmaterial:	Blei

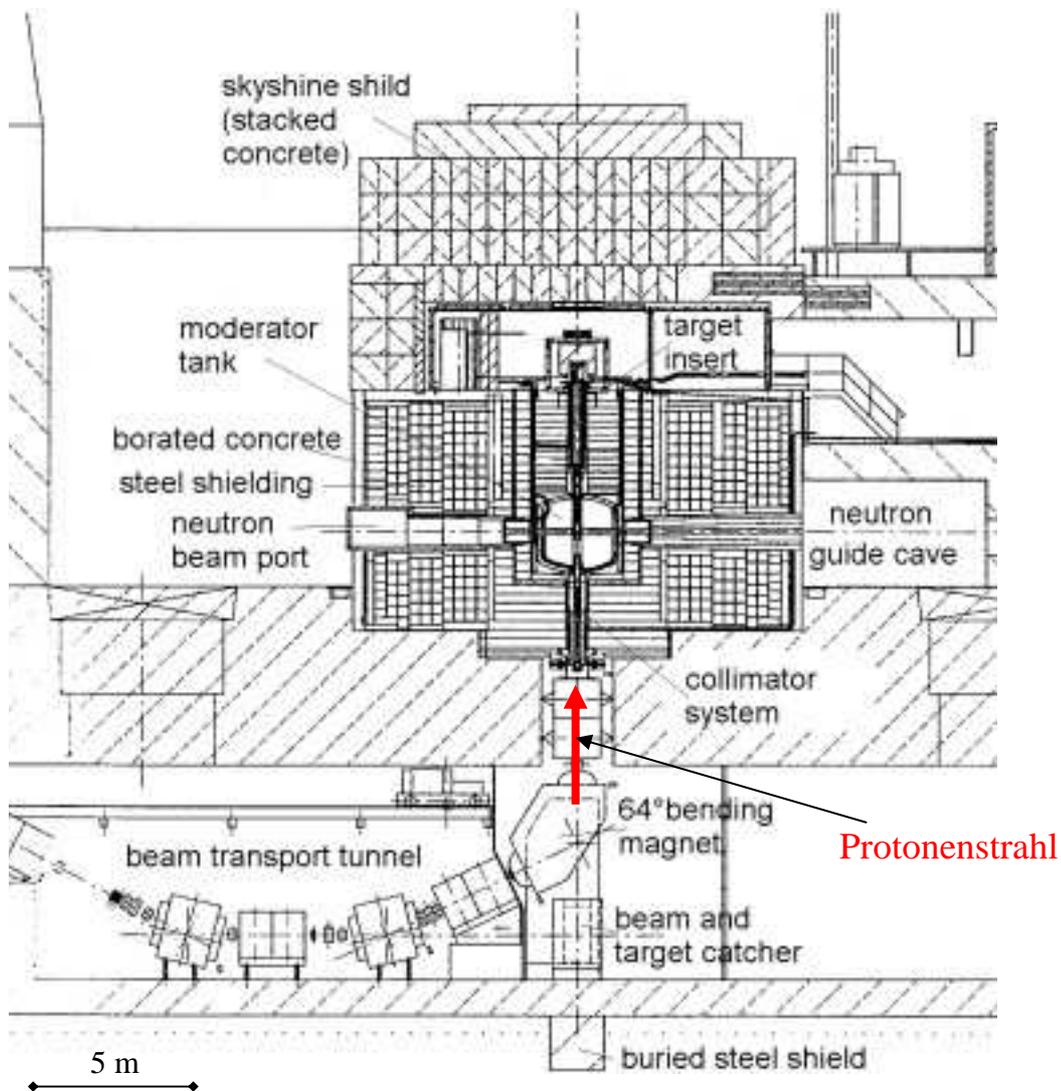


Abb. 7.1.4-1: SINQ Querschnitt /Bau 02/

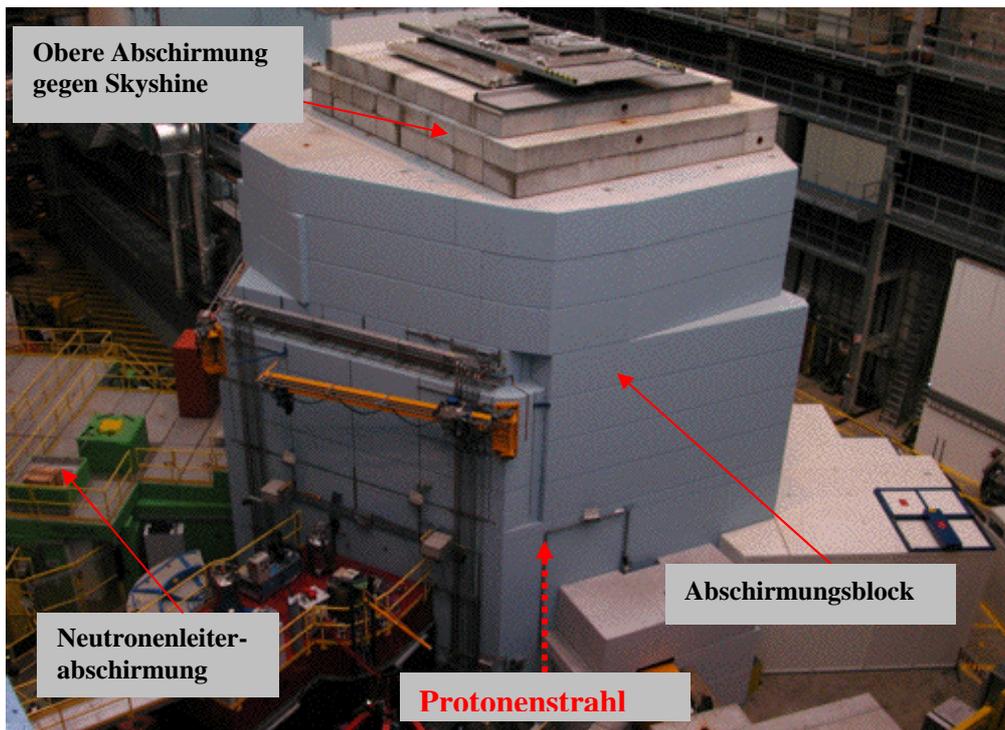


Abb. 7.1.4-2 bis 3: Targetblock SINQ

### Spallationsquelle ISIS England

Die Spallationsquelle ISIS –England ist seit Oktober 1985 in Betrieb.

Die Hauptparameter:

Protonenstrahlenergie:	0,8 GeV
Protonenstrahlleistung:	0,16 MW
Mittlere Stromstärke:	0,2 mA
Pulsfrequenz:	50 Hz
Targetmaterial:	Tantal

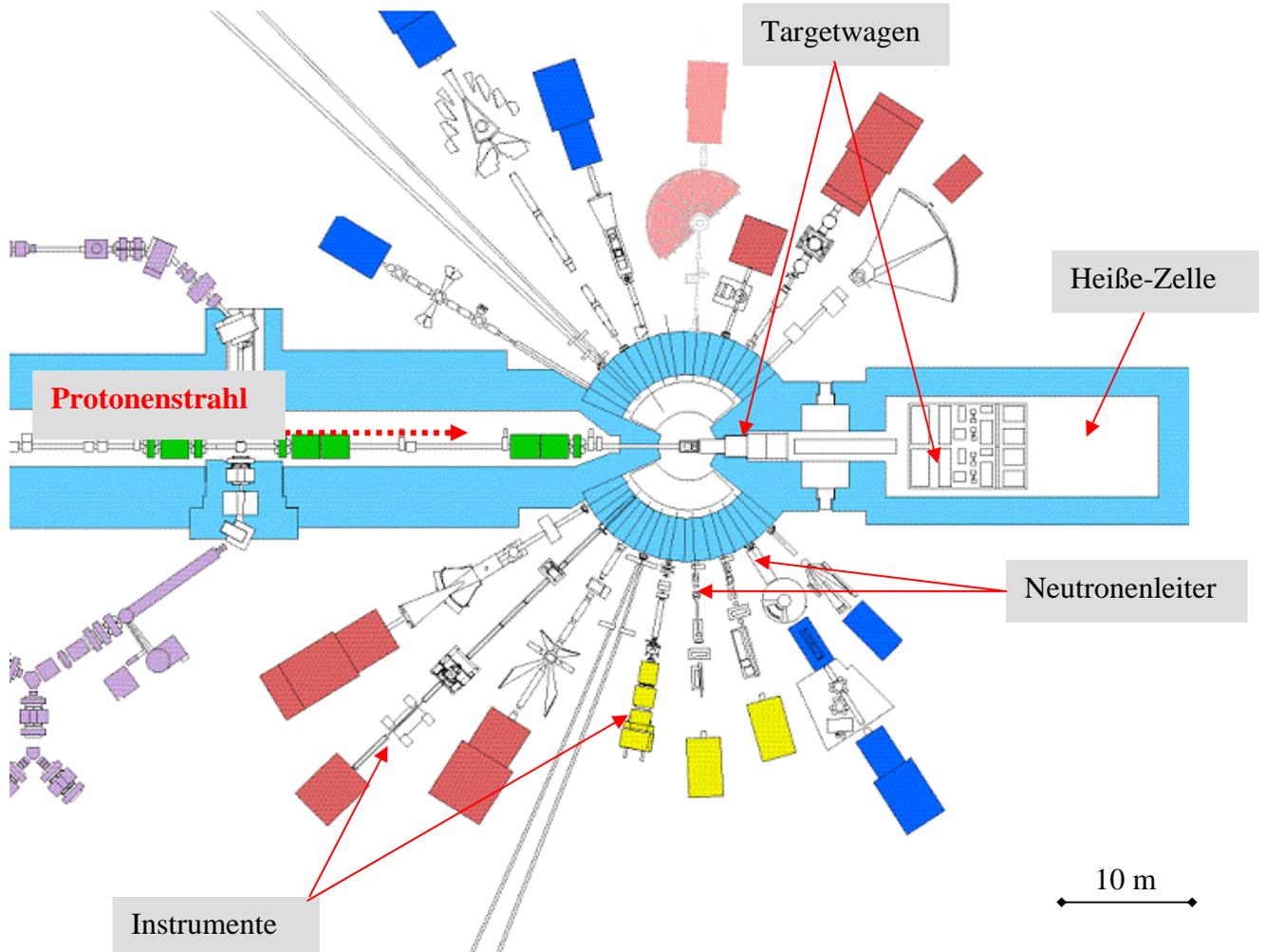


Abb. 7.1.4-4: Targetstation und Instrumentenhalle ISIS

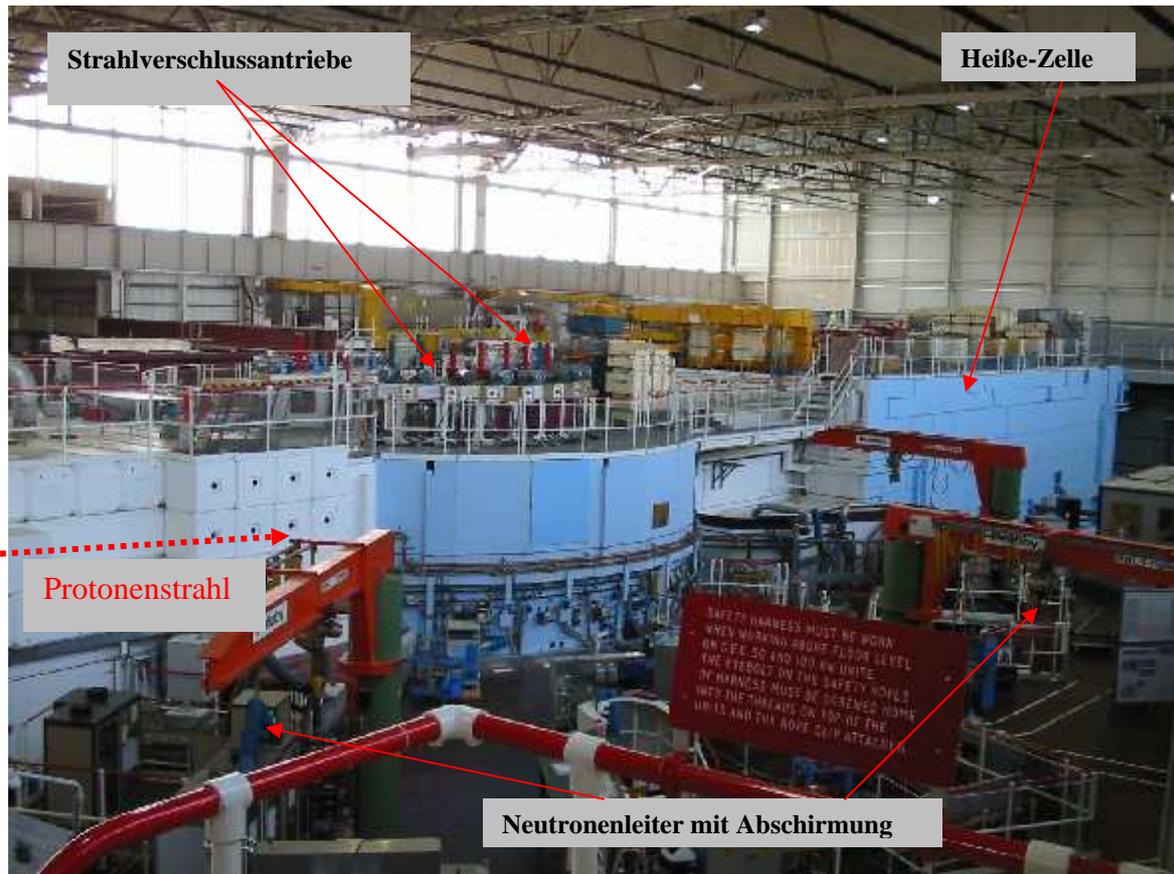


Abb. 7.1.4-5: Targetstation und Instrumentenhalle ISIS

### Spallationsquelle SNS USA

Die Spallationsquelle SNS-USA soll in 2006 in Betrieb gehen

Die Hauptparameter:

Protonenstrahlenergie:	1,0 GeV
Protonenstrahlleistung:	1,4 MW
Mittlere Stromstärke:	1,4 mA
Pulsfrequenz:	60 Hz
Targetmaterial:	Quecksilber

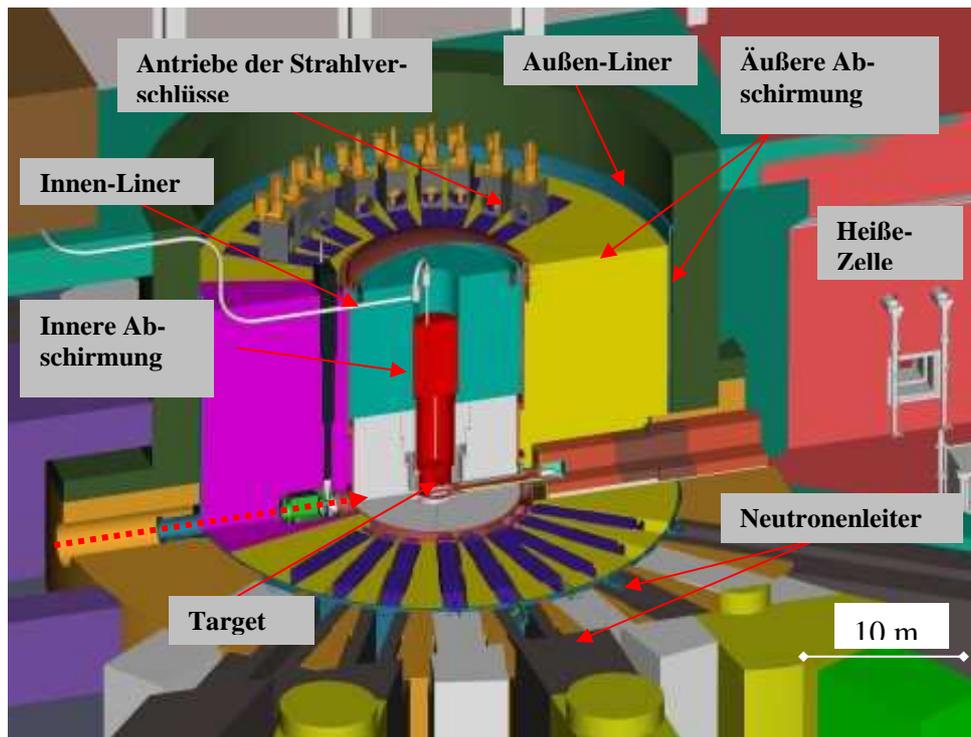


Abb. 7.1.4-6: Querschnitt des SNS-Abschirmblocks /Chip 00/

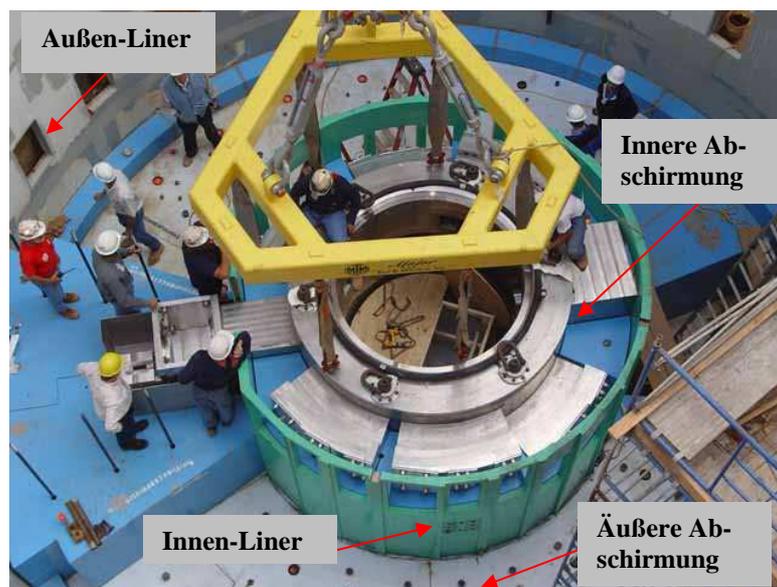


Abb. 7.1.4-7: Aufbau der Targetblockabschirmung SNS (Stand Okt. 2003)/SNS 05/

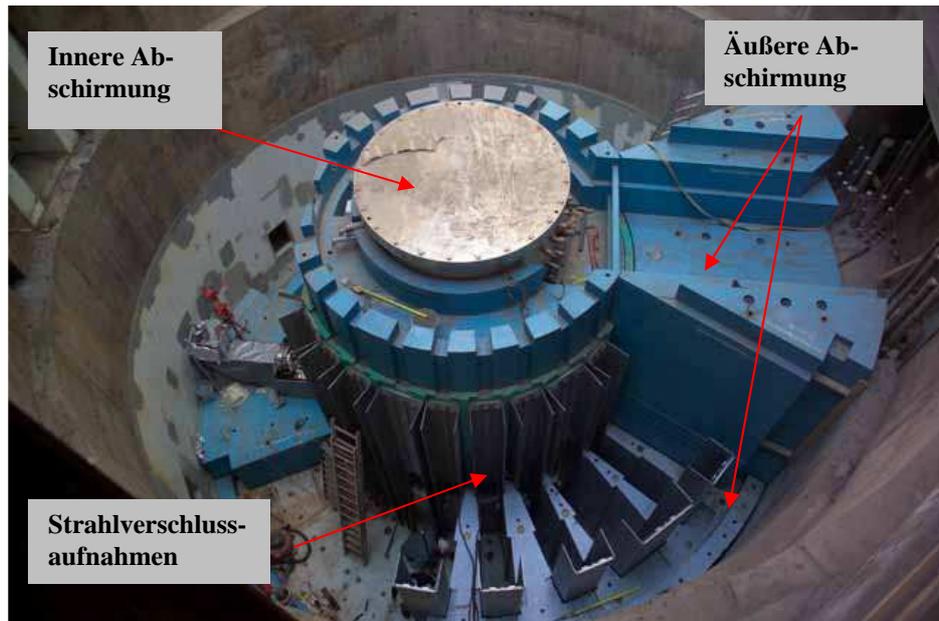


Abb. 7.1.4-8: Aufbau der Targetblockabschirmung SNS (Stand März 2004) /SNS 05/

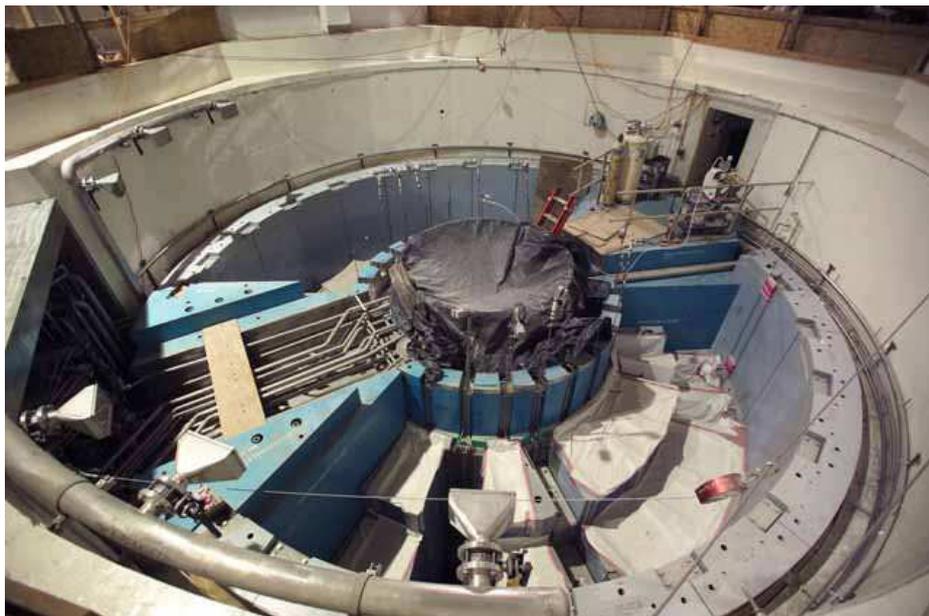


Abb. 7.1.4-9: Aufbau der Targetblockabschirmung SNS (Stand Feb. 2005) /SNS 05/

### Spallationsquelle J-PARC Japan

Die Spallationsquelle J-PARC Japan soll in 2008 in Betrieb gehen

Die Hauptparameter:

Protonenstrahlenergie:	3,0 GeV
Protonenstrahlleistung:	0,9 MW
Mittlere Stromstärke:	0,3 mA
Pulsfrequenz:	25 Hz
Targetmaterial:	Quecksilber

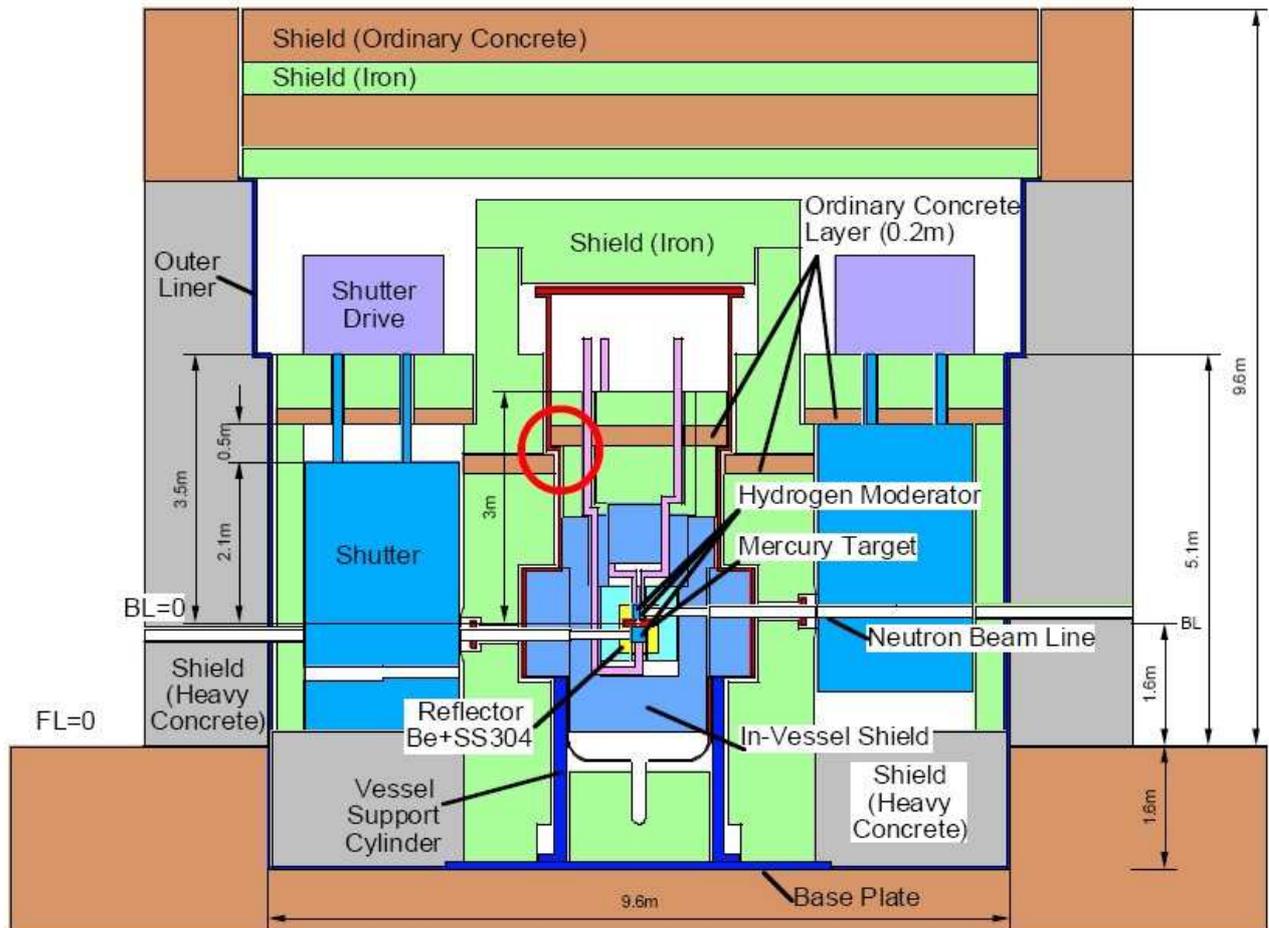


Abb. 7.1.4-10: Querschnitt des J-PARC-Abschirmblocks /Mae 02/

## 7.2 Konzeptionelle und technische Umsetzung der Instrumentenabschirmung

Eine Hauptaufgabe von Spallationsneutronenquelle ist die Produktion von Neutronen entsprechender Energie zur Untersuchung von Materieproben wie Festkörpern oder biologisches Material. Die Neutronen werden durch Neutronenstrahlkanäle aus der Targetstation über gekrümmte Neutronenleiter zum Probenort geleitet. An der Probe werden die Neutronen gestreut und mit Messinstrumenten detektiert und ausgewertet.

### 7.2.1 Sicherheitstechnische Anforderungen an die Instrumentenabschirmung

Die Experimente an Spallationsquellen stellen von allen Anlagenteilen die höchsten Ansprüche an Flexibilität. Die Sicherheitsvorrichtungen und die Sicherheitsvorschriften werden spezifisch für jeden Fall nach einer Analyse der Gefahren bestimmt. Die optimale Lösung, die genügende Sicherheit und einen möglichst ungehinderten Experimentierbetrieb zu vertretbaren Kosten bietet, wird in Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Experimentator, dem Anlagenbetreiber und dem Strahlungsschutz definiert.

In einer Spallationsquelle können die Experimentiereinrichtungen sehr unterschiedlich sein. Bei der Bestimmung der biologischen Abschirmung der Instrumente muss folgendes berücksichtigt werden:

- Die Oberfläche der Instrumentenabschirmung, die an die Experimentierareale grenzt, ist nicht als Ort permanenten Aufenthaltes zu betrachten, genauso wenig wie die vorgelagerten Instrumentenareale selbst.
- Die große Anzahl an Strahlrohren in einer Spallationsquelle verursacht eine dichte Anordnung der Instrumente. Hier kann es zu Schwächungen im Abschirmungsbereich kommen. In solchen Situationen würden mobile Abschirmungen notwendig, um die Bedingungen für Orte permanenten Aufenthalts und die Bedingungen an der Abgrenzung der kontrollierten Zone zu erfüllen.
- Bei der Abstimmung des Experimentierstrahls muss der Strahlkanal durch Strahlverschluss geschlossen werden; damit gelangt sehr verminderte Strahlung zum Probenort oder an die Abschirmungsoberfläche.
- Ein Teil der Experimentiereinrichtungen, die einem hohen Fluss thermischer oder kalter Neutronen ausgesetzt sind (z.B. innere Abschirmung, Strahlfänger, Proben) wird aktiviert. Bei den festen Einrichtungen muss durch die Auswahl geeigneter Materialien eine Minimierung der Aktivierung angestrebt werden. Die aktivierten Teile werden nach den für den Umgang mit radioaktiven Quellen geltenden Vorschriften gehandhabt.

Im Allgemeinen gibt es 3 Arten von Experimenten:

- Spektrometer mit Monochromatoren, die nur einen Teil des Neutronenflusses (typischerweise 1/1000 des Strahls) in das Experiment streuen. Da der Monochromator nur ein Teil der Strahlung in das Experiment streut, müssen die restlichen Neutronenstrahlen in Strahlfänger und Abschirmung vernichtet werden. Die Monochromatorabschirmung muss so ausgeführt werden, dass die Dosisleistung an der Oberfläche aus den Hochenergie-Neutronen und aus der Neutroneneinfang-Gammastrahlung den Bedingungswerten des Strahlungsschutzes entspricht. Im weiteren Verlauf gelangen die

Neutronen über Neutronenleiter zum Experiment. Hier ist die Dosisleistung aufgrund des kleineren Neutronenflusses um ca. 2 Größenordnungen geringer als bei den anderen Experimenten.

- Endständige Experimente, die den ganzen Strahl nutzen (z.B. Neutronenradiographie). Diese müssen in sorgfältig abgeschirmten, abschließbaren Arealen untergebracht werden.
- Experimente mit einem „Chopper“ (Strahlzerhacker), der den mittleren Fluss im Neutronenleiter um einen Faktor 10 bis 100 reduziert.

Aus dem Vorgehenden geht hervor, dass eine massive Abschirmung innerhalb eines Experimentierareals und um dieses notwendig ist. Sie muss fest installiert sein und vom Strahlenschutz kontrolliert werden. Genügt die Abschirmung um das Instrument nicht, muss eine zusätzliche mobile Abschirmung längs des Instruments lokal aufgebaut werden.

Die effektiven Strahlengefahren sind auf räumlich sehr kleine Gebiete beschränkt; die max. Dosisleistungen können aber sehr hoch sein. Längs der Neutronenleiter treten Verluste an kalten Neutronen auf. Die Neutronenleiter selbst müssen so abgeschirmt sein, dass die Dosisleistung an der Abschirmoberfläche den vorgegebenen Wert nicht überschreitet. Es müssen deshalb folgende Schutzmassnahmen getroffen werden:

- Jedes Experimentierareal muss mit einer wirksamen Absperrung umgeben sein.
- Die Absperrungen müssen entsprechend den unterschiedlichen Bedingungen der Experimentiereinrichtungen angepasst werden.
- In den Arealen mit lokal wesentlich höheren Dosisleistungen ist eine Zutrittsfreigabe nur bei sicher verschlossenem Strahl möglich.
- In den Experimentiersituationen, wo ein Zutritt bei laufendem Experimentierstrahl unumgänglich ist, müssen lokale Schutzvorrichtungen angebracht werden. Die Experimentatoren müssen vor den wichtigsten Strahlengefahren geschützt werden.
- Durch die hohe Fluenz thermischer Neutronen wird ein Teil der Experimentiereinrichtungen aktiviert. Aus dem Grunde muss man bei der Abschirmmaterialwahl auf eine minimale Aktivierung geachtet werden.

Die Abschirmung eines Instrumentes kann in zwei Bereiche unterteilt werden:

1. Die Abschirmung der Strahlrohre und der Neutronenleiter.
2. Die Instrumentenabschirmung.

Die Neutronenleiter führen die Neutronen aus dem Moderator oder auch der kalten Quelle zu den Experimenten in der Neutronenhalle. Dabei werden die hochenergetischen Neutronen durch Krümmung der Neutronenleiter, durch Ablenkung der niedrigerenergetischen Neutronen in den Monochromatoren oder durch Chopper herausgefiltert. Die hochenergetischen Neutronen erzeugen durch Spallationsreaktion in den umgebenden Strukturen sekundäre Neutronenflüsse, die abgeschirmt werden müssen. Auch in diesem Bereich stellen die schnellen Neutronen die dominierende Größe in der Gesamtdosisleistung an der Abschirmungsoberfläche dar. Für die Abschirmung werden in erster Linie Eisen, Schwerbeton und event. in Kanister gefüllter Blei verwendet.

Für die Messungen werden im Wesentlichen nur Neutronenspektren im thermischen und subthermischen Energiebereich benötigt. Ein Teil des Neutronenspektrums streut an der Probe und gelangt zu den Detektoren. Die restlichen Neutronen müssen in der Abschirmung abgebremst und absorbiert werden. Die Abbremsung der niederenergetischen Neutronen erfolgt vor allem durch elastische Stoßvorgänge. Zu dieser Moderation eignen sich Materialien mit

guten Moderatoreigenschaften wie Kohlenstoff (Graphit) oder wasserstoffhaltige Substanzen (z.B. Polyäthylen, Paraffin, Wasser). Da die Masse von Neutron und Wasserstoffkern (Proton) praktisch gleich groß ist, können bei solchen Stößen besonders große Energiebeiträge übertragen werden. Aus dem Grunde sind die Abschirmungen rund um das Instrument in den meisten Fällen wie ein klassischer Dreischicht-Schild aufgebaut (siehe Kap. 4.2.3). Zusätzliche Anforderungen (z. B. Abschirmung gegen störendes Magnetfeld) führen zur Anwendung anderer Materialzusammensetzungen für einen Instrumentenschild.

### 7.2.2 Beispiele der Instrumentenabschirmung

In einer Spallationsquelle ist aufgrund der hohen Leistung und der hohen Intensitäten der Neutronenflüssen eine massive Abschirmung für alle Instrumentenarten gefordert. Dabei müssen die Abschirmungen bei vielen Instrumenten nicht nur gegen Strahlung sondern auch gegen magnetischen Einfluss der anderen Instrumente oder auch magnetische Störfaktoren (Kran, etc.) ausgelegt werden. Das Abschirmungsdesign muss den Zugang zu dem Neutronenleiter sowie zu den Komponenten des Instrumentes gewährleisten./ESS 03/

Im Folgenden wird eine Abschirmung für ein Spin-Echo-Instrument für die Spallationsquelle SNS diskutiert. Die Abschirmung wurde in zwei Teile unterteilt. Die ersten 10 m vom Moderator wurden als Abschirmung gegen radioaktive Strahlung in Form von Eisen- und Schwerbetonblöcken ausgeführt. Der nächste Abschnitt (11 m bis 22 m rund um den magnetischen Teil des Instrumentes) befindet sich in einem Abschirmgehäuse aus 0,3 m dicken Normalbetonwänden, die von innen mit 2 Lagen von  $\mu$ -Metall-Blechen ausgekleidet sind. Die Anwendung von  $\mu$ -Metall verhindert oder reduziert den magnetischen Einfluss der benachbarten Instrumente oder auf die benachbarten Instrumente (siehe Abb. 7.2.2-1).

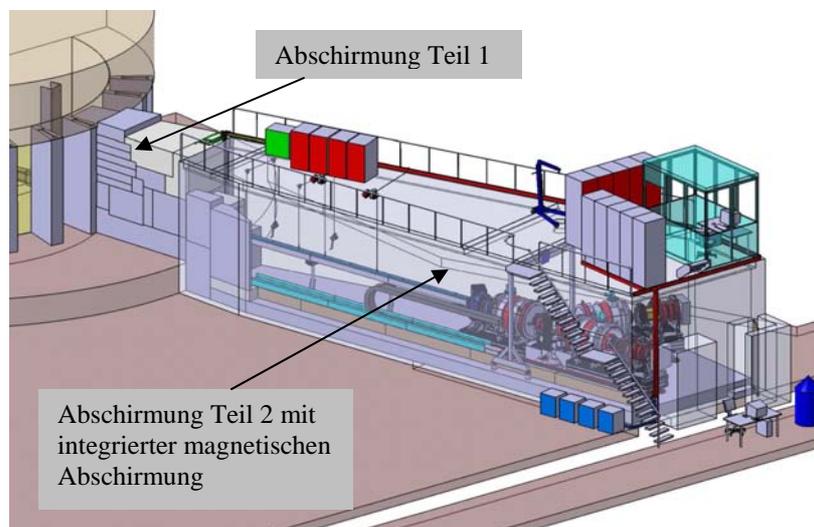


Abb. 7.2.2-1: Abschirmung beim Spin-Echo-Instrument für SNS USA /But 05/

Der Neutronenstrahl wird in 5,9 m Entfernung vom Moderator durch einen sog. „Si-Bender“ (laminar aufgebaute Struktur aus Gadolinium, Silizium, und Superspiegel) um  $3,5^\circ$  abgelenkt (Abb. 7.2.2-2). Dies verhindert den direkten Hochenergieneutronenfluss zum Instrument. Die schnellen hochenergetischen Neutronen werden durch einen Strahlfänger gefangen und die kalten und thermischen Neutronen in dem „Si-Bender“ zum Instrument abgelenkt. Der Strahlfänger wird mit einer Abschirmung aus Stahl mit Bor-Polyäthylen Schicht ausgeführt.

Die Abschirmungsberechnung ist auch in zwei Schritten ausgeführt. Zuerst wird die Isodosis in der Abschirmung in  $0^\circ$  Richtung von Moderator bis zum „Si-Bender“ berechnet, und anschließend die Isodosis in der  $3,5^\circ$  Richtung vom Si-Benderzentrum.

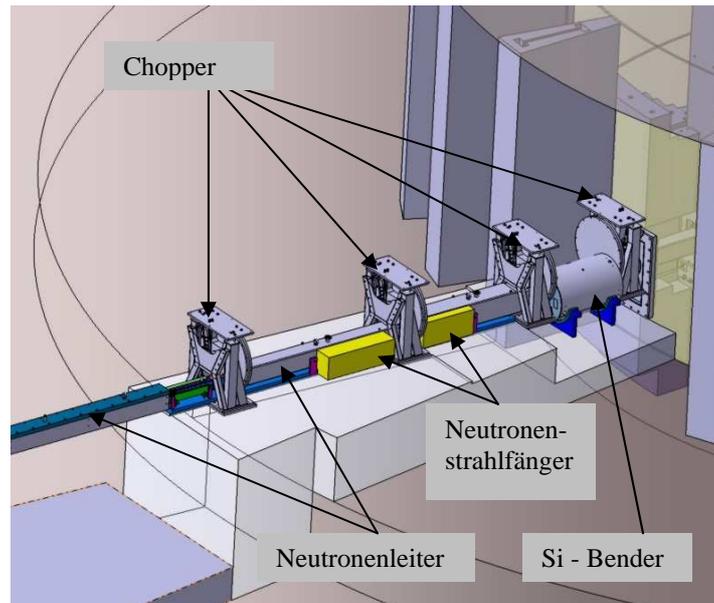


Abb. 7.2.2-2: Anordnung der wichtigsten Komponenten im Neutronenleiter. Der gelbe Balken stellt einen Neutronenstrahlfänger aus Edelstahl dar/But 05/.

Das Neutronenspektrum wurde vom Target bis zur Moderatoroberfläche anhand der detaillierten SNS-Target-Moderator-Reflektor-Geometrie mittels MCNPX- Programms berechnet. Ab der Moderatoroberfläche wurde der Neutronenfluss mittels 2D-DORT-Programms berechnet. Durch die Anwendung der Fluss-/Dosis-Konversionsfaktoren aus der HILO-2k Bibliothek wurde die Äquivalentdosis berechnet.

Die Abschirmungsdicke und die Materialzusammensetzung sollte eine max. Oberflächendosisleistung von 0,25 mrem/h (2,5  $\mu$ Sv/h) gewährleisten. In den Berechnungen bestehen die ersten 5,5 m der Abschirmung aus Edelstahl umgeben mit 0,9 m dickem Schwerbeton, was der Ausführung der Targetblockabschirmung entspricht. Das Strahlfängermaterial besteht aus Edelstahl. Im weiteren Neutronenleiterverlauf wurde das Si-Benderzentrum als neue Neutronenquelle simuliert und im Winkel von 3,5° von der Strahlachse die Oberflächendosis berechnet. Dieser Bereich bis zu 10 m vom Moderator entfernt besteht aus Schwerbeton. Das 11 -te Meter der Abschirmung besteht aus Normalbeton, um den Einfluss der ferromagnetischen Schwerbetonzusätze auf das Magnetfeld am Probenort umzugehen. Im weiteren Verlauf befinden sich der Neutronenleiter und das Instrument in einem Betongehäuse. In der Isodose-Simulation befindet sich das letzte Neutronenleiterstück in der Luft (Abb. 7.2.2-4). Die Ergebnisse in Form von Isodosis Diagramms sind in der Abb. 7.2.2-5 dargestellt. In der Abb. 7.7.2-3 ist der Aufbau der NSE - Abschirmung für das erste Teil bis zu 11 m dargestellt.

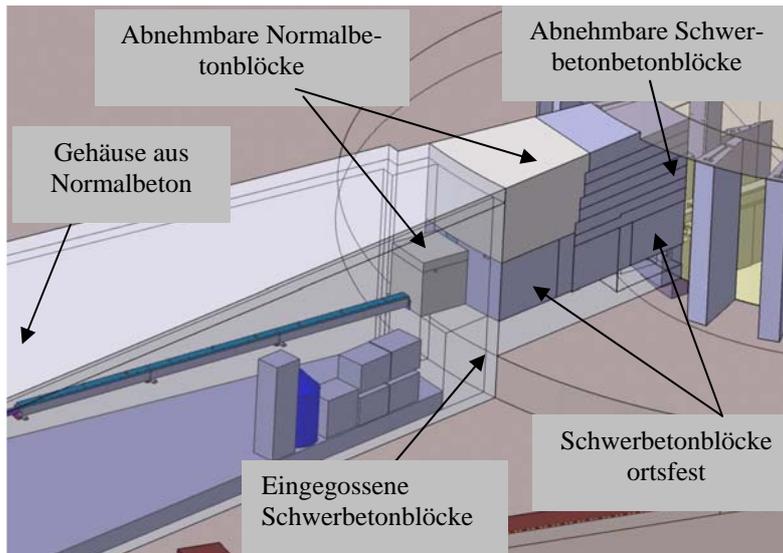


Abb. 7.2.2-3: Abschirmungsdesign für NSE- SNS /But 05/

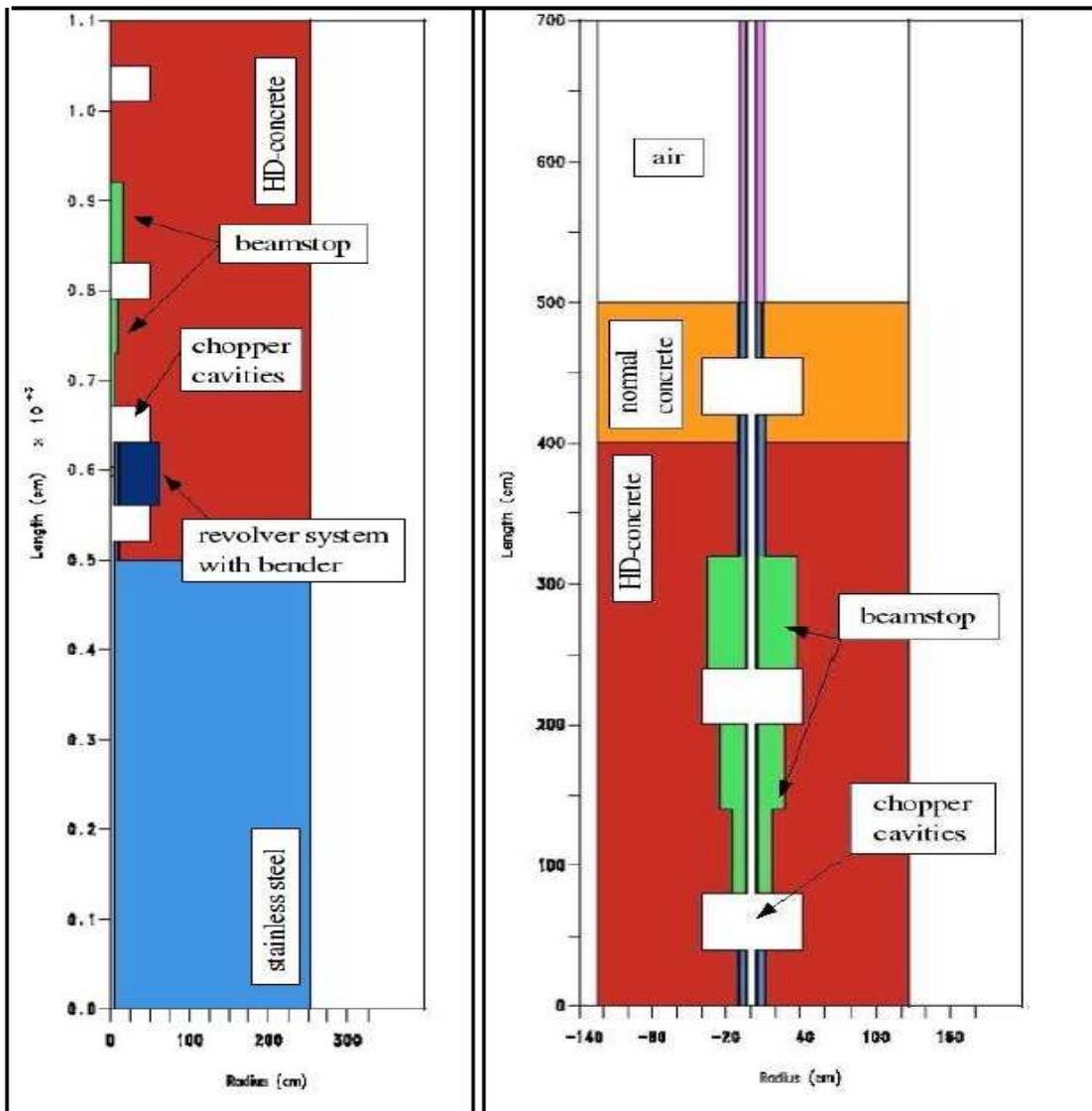


Abb. 7.2.2-4: 2D-Geometrie-Modell in 0°-Richtung (Diagramm links) und 3,5°-Richtung (Diagramm rechts) /Nün 04/.

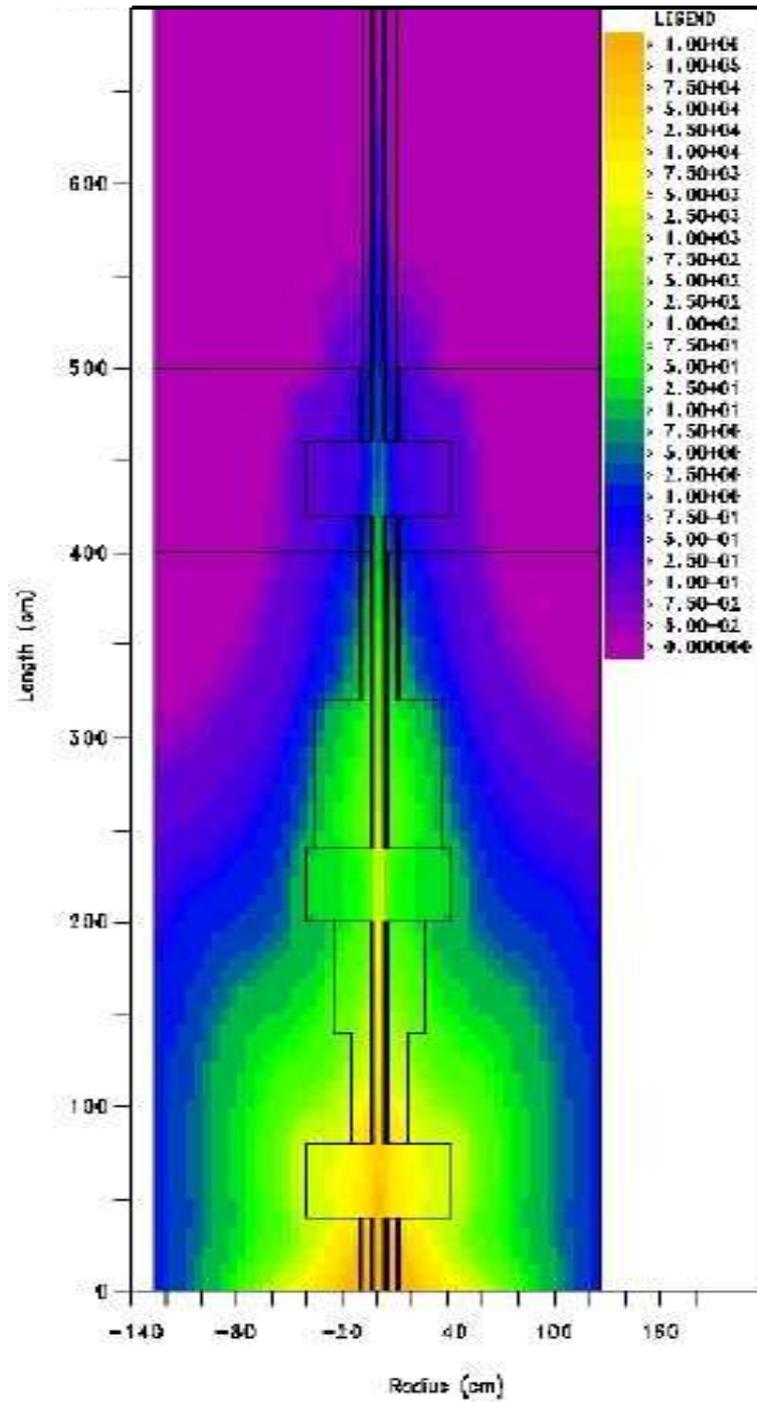


Abb. 7.2.2-5: Isodosis Diagramm für Gesamtdosisleistung (Neutronen und Gammastrahlung) in  $3,5^\circ$  Richtung /Nün 04/ (Isodosis in mrem/h)

Wie an der SNS-Quelle wurden auch bei der Spallationsquelle J-PARC erste Berechnungen für die Auslegung der Strahlrohr- und Neutronenleiterabschirmung mittels Monte-Carlo-Codes MCNPX durchgeführt. Das Berechnungsmodell setzt sich aus folgenden Materialien zusammen:

- Targetabschirmung - Eisen ( $7,2 \text{ g/cm}^3$ ) bis zu 4,8 m vom Moderator entfernt
- Magnetitbeton ( $3,5 \text{ g/cm}^3$ ) 1,3 m dick
- Strahlrohrabschirmung –Eisen + Polyäthylen ( $0,9 \text{ g/cm}^3$ ) 0,3 m dick.

Die Abb. 7.2.2-6 zeigt den Berechneten Isodosen für das Designmodell

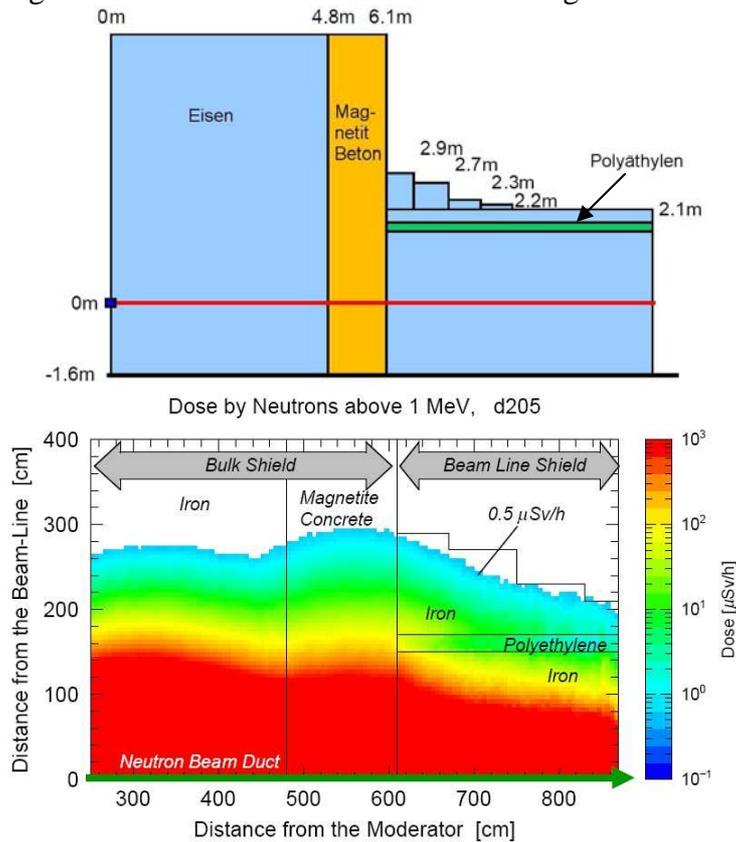


Abb. 7.2.2-6: Abschirmungsdesign für Neutronenleiter J-PARC /Mae 02a/

Für die Ermittlung der Abschirmdicken für Neutronenleiter wurde weiterhin eine empirische Formel entwickelt [Gl. 7.2-1] /Mae 02a/. Zur Ableitung der Formel wurden folgende Angaben gemacht:

- |   |  |
|---|--|
| - Materialzusammensetzung:                        | Eisen + 30 cm dicke Polyäthylenschicht |
| - Dosisanteil der Neutronen mit Energien >10 MeV: | 0,2 $\mu\text{Sv/h}$                   |
| - Gesamtdosis auf der Abschirmungsfläche          | <1 $\mu\text{Sv/h}$                    |

$$T = 530 + 21 * \ln \left[ 130 * P * \left( \frac{X_0}{10} \right)^2 * \left( \frac{1}{L^3} + \frac{C}{X_0 * L^2} \right) \right] \text{ [Gl. 7.2-1]}$$

- T: Abschirmungsdicke der Neutronenleiter [cm]  
 P: Protonenstrahlleistung [MW]  
 X<sub>0</sub>: Länge der Moderatorwand [cm]

- $X_1$ : Strahldurchmesser an der Probe [cm]  
 $L$ : Abstand zwischen dem Moderator und der Probe [cm]  
 $C$ : Konvergenzquote  $[=(X_1-X_0)/L]$

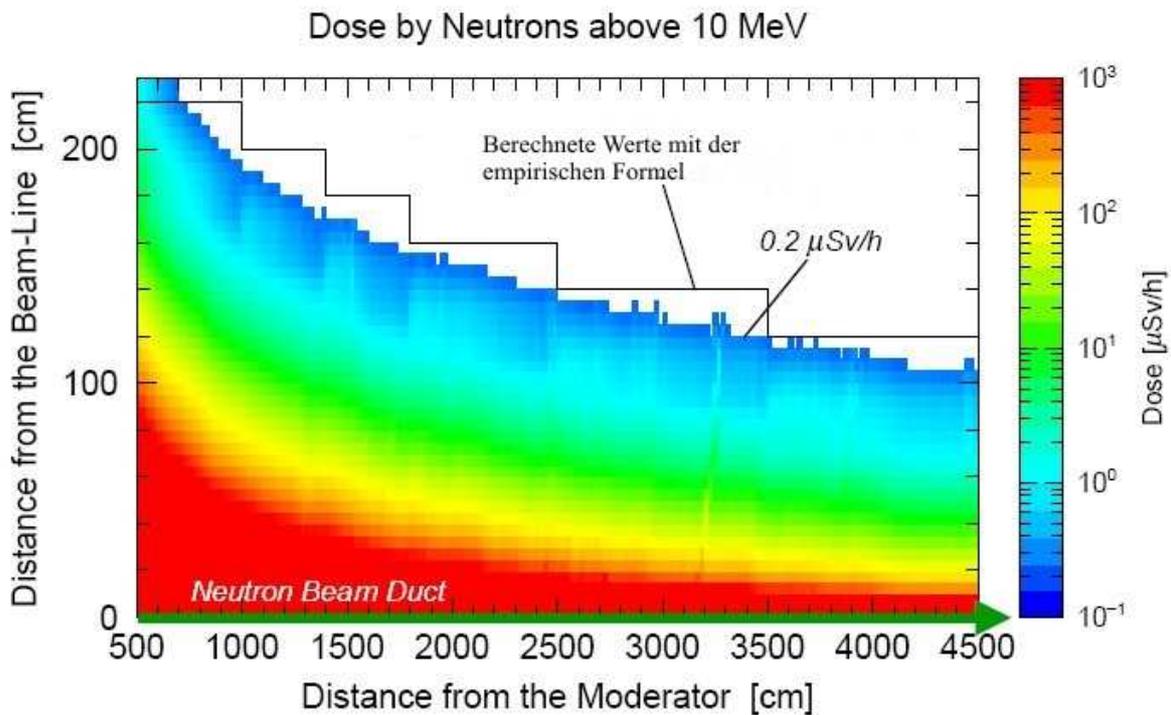
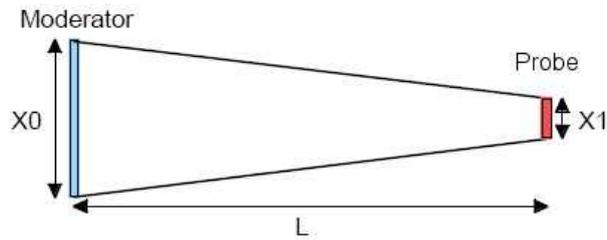


Abb. 7.2.2-7: Vergleich der mittels MC-Methoden und der empirischen Formel berechneten Abschirmdicken des Neutronenleiters für die Neutronenenergie  $>10$  MeV /Mae 02a/

Mit dieser empirischen Formel konnten gute Abschätzungen zu Abschirmdicken der Neutronenleiter gemacht werden. Selbstverständlich müssen genaue Rechnungen durchgeführt werden (Abb. 7.2.2-7). Jedoch sind solche empirischen Rechnungen für die Bestimmung z.B. des Platzes zwischen den Neutronenleitern oder auch räumlicher Anordnung der Instrumente sehr hilfreich.

Die Instrumentenabschirmungen an den Forschungsreaktoren sind ähnlich den Spallationsquellenabschirmungen aufgebaut. Als Beispiel wird hierzu die Abschirmung des Panda-Instrumentes am Forschungsreaktor FRM-II in München ausgewählt (Abb. 7.2.2-8).

Das Panda-Instrument ist ein Dreiachsen-Spektrometer für die Kristallgitter-Untersuchungen mit kalten Neutronen und für die Polarisationsanalyse bei magnetischen Streuproblemen an Einkristallen. Mit dem Instrument können beliebige Punkte im Messraum des Instrumentes gemessen werden.

Die Primärabschirmungen des Neutronenkanals und der Monochromatorburg (Durchmesser 2,6 m) dienen der Moderation und Absorption schneller Neutronen und hochenergetischer

Gammastrahlung. Sie sind aus folgenden Materialien zusammengesetzt: Schwerbeton, boriertes Polyäthylen,  $^6\text{LiF}$  und Blei. Diese Materialien sind in einer Stahlschalung aufgebaut. Die Abschirmungen wurden mittels des Monte Carlo Codes MCNP Version 4B2 berechnet und optimiert. Die Abschirmungen sind zum Teil unmagnetisch, um den Einfluss der großen magnetischen Streufelder vom Probenort zu reduzieren. Die beiden Abschirmungen mit rund 500 kN bzw. 600 kN Gewicht lassen sich auf Luftkissen verfahren. Die reproduzierbare Positionierung der Gesamtanlage und der Einzelblöcke ist durch entsprechend integrierte Vorrichtungen gewährleistet. Das ganze Instrument ist von Abschirmwänden umgeben. Die Abschirmwände bestehen aus folgenden drei Materialschichten; Boriertes Polyäthylen, Cadmium und Blei.

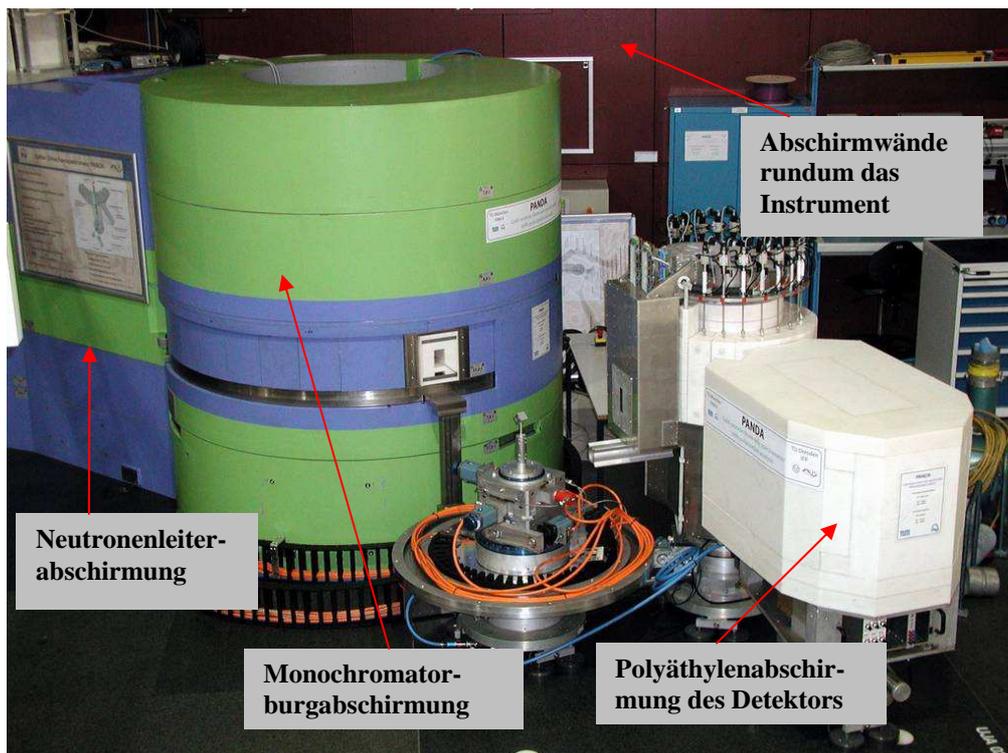


Abb. 7.2.2-8: Aufbau der Panda-Abschirmung am FRM-II Reaktor in München /FRM 05/

### 7.3 Fazit

Analog zur Beschleunigerabschirmung wird folgendes Ablaufschema vorgestellt und für die Entwicklung der Targetsystem- und Experimentabschirmung vorgeschlagen:

Die Targetstationsparameter werden durch die Beschleunigerparameter vorgegeben und definiert. Analog zu dem oben vorgestellten Ablaufschema für die Auslegung des Beschleunigerabschirmungsdesigns resultieren gleichzeitig drei Hauptanforderungen an die Abschirmung eines Beschleunigers (Beschreibung siehe Beschleunigerabschirmung):

1. Die Abschirmungsphilosophie im Aufstellungsland
2. Die Dosisgrenzwerte
3. Boden und Grundwasseruntersuchung

Aufgrund der Protonenstrahlparameter kann die Simulation des Teilchentransports ( Niedrig- und Hochenergieneutronentransport sowie Gamma- und Elektronentransport) in der Abschirmung durchgeführt werden. Diese Teilchentransportsimulation wird in allen Abschirmungsberechnungen sowie für die Aktivierungsberechnungen benötigt.

Unter der Einhaltung der Dosisgrenzen für den jeweiligen Aufstellungsort und den Teilchentransportssimulationen wird ein grobes (meistens 2 D) Abschirmungsdesign entwickelt. Die Aktivierungsrechnungen von Erdreich, Wasser und Luft sowie die Sky-shine-Berechnungen ermitteln die Dicke und die Materialienzusammensetzung der notwendigen Abschirmung. Diese Berechnungsergebnisse werden in dem o.g. groben Abschirmungsdesign berücksichtigt. Dieses Design wird als Basis für die weiteren ingenieurtechnischen Abschirmungsauslegungen zu Grunde gelegt.

Im nächsten Schritt wird ein genaues Abschirmungsdesign mit einer kompletten Abschirmungsgeometrie unter der Berücksichtigung von Abschirmungsblockgeometrien, Spalten Durchbrüchen, Neutronenstrahlkanälen, Neutronenstrahlverschlüssen etc. ausgearbeitet. Diese Abschirmungsgeometrie wird in den weiteren detaillierten 3 D-Abschirmungskalkulationen verfeinert. Eventuelle Verifizierungen, Änderungen oder Nachbesserungen werden in der Abschirmungsgeometrie eingearbeitet. Parallel dazu wird die Bestimmung der Wärmedeposition, Materialschädigung, Aktivierung der Abschirmung durchgeführt. Die Ergebnisse in Form von der Gestaltung der Kühlung oder der Materialzusammensetzung der Abschirmung werden in der entsprechenden Ausführung in der Abschirmungsgeometrie eingearbeitet. Auch hier wird im letzten Schritt die Kostenoptimierung der Abschirmung unter den Aspekten der Abschirmphilosophie durchgeführt.

In dem in der Abb. 7.3-1 dargestellten Ablaufschema wird die Abschirmungsauslegung der Strahlungsrohrkanäle und der Instrumente separat dargestellt. Selbstverständlich gehen auch hier in die Abschirmungsauslegungen die Daten aus den Teilchentransportsimulationen und die Dosisgrenzwerte ein. Der letzte Schritt ist, genau wie in den vorherigen Beispielen, die Kostenoptimierung der Abschirmung.

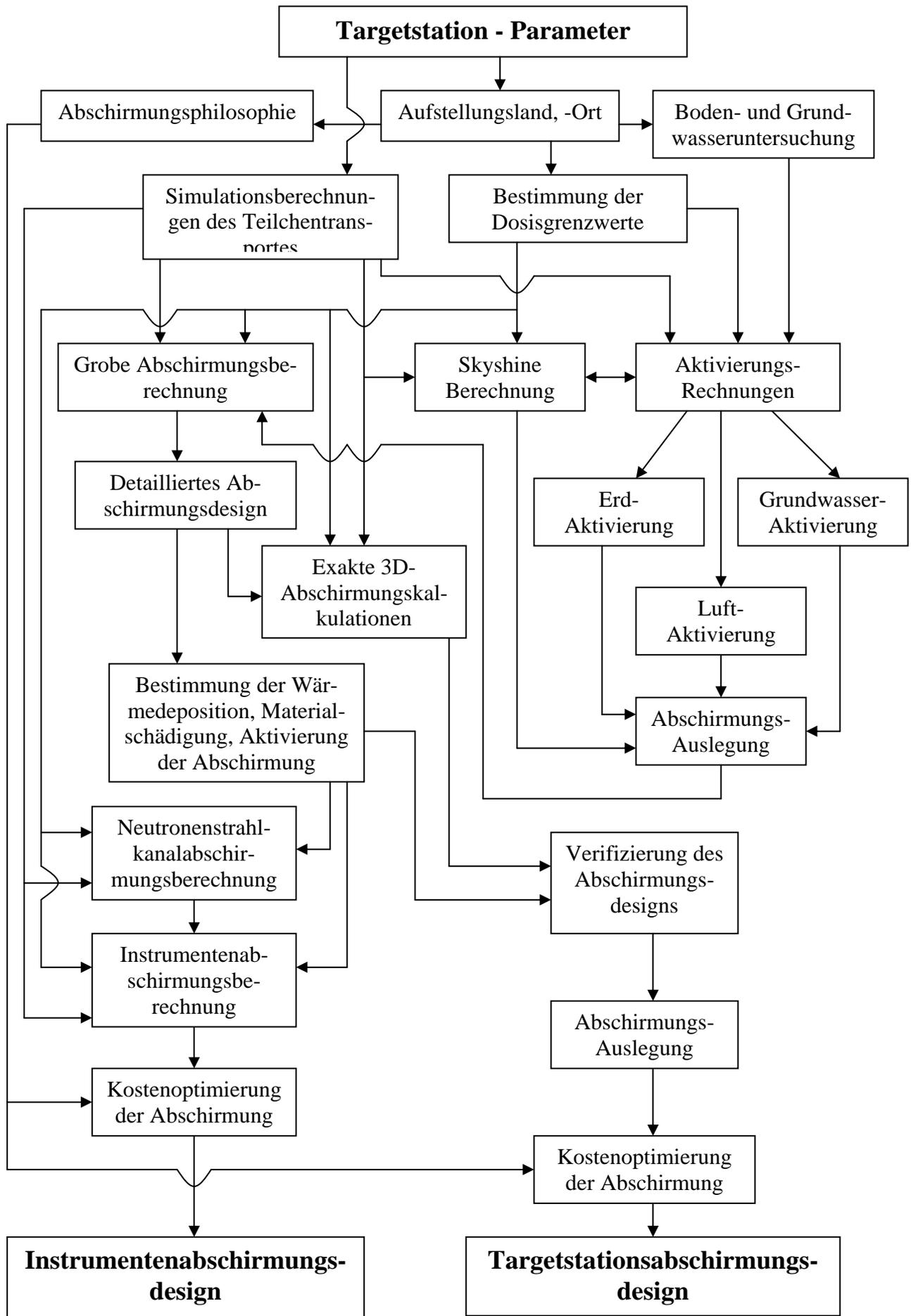


Abb 7.3-1: Ablaufschema für die Auslegung des Targetstationsabschirmungsdesigns.

## 8 Sicherheitstechnische Aspekte von beschleunigergetriebenen Systemen zur Transmutation und Energieerzeugung

Aus den Kernkraftwerken fallen jährlich in Deutschland rund 450 t abgebrannter Kernbrennstoffe an, die langlebige radioaktive Elemente wie Plutonium und die Actiniden Americium, Neptunium und Curium etc. enthalten. Die Hauptaufgabe der heutigen Endlagerung besteht darin, den sicheren Einschluss der radioaktiven Reststoffe für eine sehr lange Zeit zu gewährleisten, insbesondere auch die der langlebigen Spaltprodukte wie  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ .

Im Unterschied zur direkten Endlagerung könnte man die langlebigen radioaktiven Bestandteile des Abfalls gezielt abtrennen (Partitioning) und in speziellen Anlagen in kurzlebige oder auch stabile Elemente umgewandeln (Transmutation). Die Transmutation kann hierbei mit Neutronenbestrahlung der radioaktiven Isotope erfolgen.

Neutronenspektren können in einem Nuklid unterschiedliche Kernumwandlungsprozesse wie Kernspaltung oder Neutroneneinfangreaktion ( $n, \gamma$ ) auslösen. Dabei hängt die Wahrscheinlichkeit, welche der Reaktionen stattfinden, vom Spektrum des Neutronenflusses und dem jeweiligen Nuklid ab. Bei einem thermischen Neutronenspektrum können die großen Wirkungsquerschnitte der Transurane-Isotope (Elemente oberhalb der Ordnungszahl 92) ausgenutzt werden. Allerdings führen die thermischen Neutronen nicht immer zu einer direkten Spaltung. Vor allem Isotope wie z.B. Curium sind nur sehr schwer im thermischen Neutronenspektrum spaltbar. Diese Isotope werden durch einen Neutroneneinfang in höhere Isotope umgewandelt, die meist erst dann in einem thermischen Neutronenspektrum spaltbar sind.

Eine Transmutation von Actiniden (alle Elemente oberhalb der Ordnungszahl 89) und Spaltprodukten kann in verschiedenen Anlagen realisiert werden. Im Allgemeinen werden kritische und unterkritische Transmutationsanlagen unterschieden. Als kritische Transmutationsanlagen werden die Systeme bezeichnet, in denen ohne externe Neutronenquellen eine stabile Kettenreaktion ( $k_{\text{eff}}=1$ ) aufrechterhalten werden kann. Hier können die in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in Betracht gezogen werden, wo durch spezielle Modifikationen des Systems die Umwandlung der Transurane stattfinden würde oder auch die Erzeugung der ungewünschten Actiniden im Vorfeld vermieden würde. In /Pio 01/ wurden solche Modifikationen am Leichtwasser-, Hochtemperatur- sowie am schnellen Reaktor vorgestellt und diskutiert. Allerdings sind die Umwandlungsraten wegen der begrenzten Neutronenflüsse ( $\leq 10^{14}\text{n}/(\text{cm}^2\text{s})$ ) gering.

Im Gegensatz zu kritischen Systemen kann bei einem unterkritischen System die Aufrechterhaltung des Neutronenflusses nur durch externe Quellneutronen erfolgen. Als Quelle für die externen Neutronen dient eine beschleunigergetriebene Spallationsquelle. Diese Anlagenart wird in der Praxis als beschleunigergetriebenes System oder ADS-System (engl. Accelerator Driven System) bezeichnet. In der Abb. 8-1 ist das Prinzip einer solchen Anlage dargestellt. Durch die Bereitstellung von externen Neutronen muss die Kritikalitätsbedingung nicht eingehalten werden. Eine Kettenreaktion kann nur durch die Spallationsneutronen ausgelöst werden. Diese Kettenreaktion wird jedoch beim Abschalten des Beschleunigers sofort unterbrochen. Dadurch eröffnen sich Möglichkeiten, Systemparameter und Brennstoffwahl flexibler zu gestalten und die Transurane effektiver umzusetzen. Durch den von außen aufgeprägten Protonenstrahl werden die Dynamik und die Sicherheitseigenschaften des Systems entscheidend bestimmt.

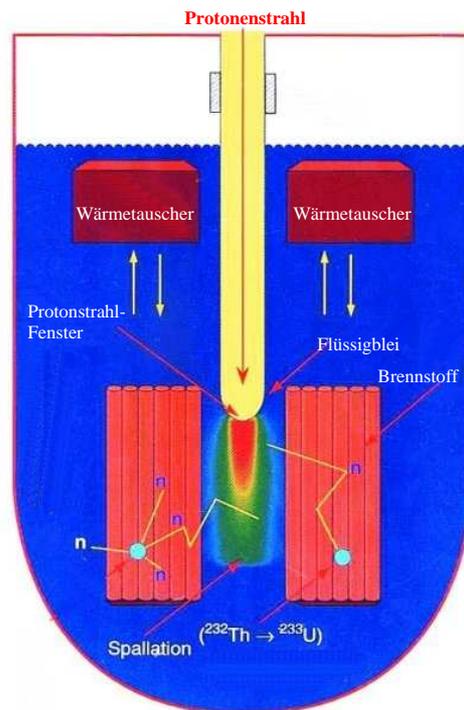


Abb. 8 -1: Prinzip eines beschleunigergetriebenen ADS-Systems nach /Kla 00/

Allerdings basieren die Erkenntnisse über das Sicherheitsverhalten einer unterkritischen Transmutationsanlage nur auf theoretischen Betrachtungen, da weltweit keine solche Anlage in Betrieb ist. Die Erfahrungen mit kritischen Reaktoren sind nur sehr begrenzt auf die unterkritischen Systeme übertragbar.

Um eine unterkritische Anlage künftig für einen sicheren Betrieb auszulegen, sind detaillierte Kenntnisse über Neutronenproduktion, -energiespektren, und -flussdichteverteilung erforderlich.

Eine Arbeitsgruppe um C. Rubbia am CERN (Schweiz) entwickelte mehrere unterkritische Systeme auf Thorium-Basis /Rub 93/, /Rub 95a/. C. Rubbia entwickelte einen sog. Energieverstärker (Energy Amplifier, EA) zur Energieerzeugung. Es handelt sich hier um eine beschleunigergetriebene Spallationsquelle umgeben von einem spaltstoffhaltigen Kern, wo sowohl eine Stromerzeugung im Sinne eines Leistungsreaktors sowie eine Vernichtung von hochradioaktiven Transuranen stattfindet /Rub 94/, /Rub 95/. Die unterschiedliche Zielsetzung sollte nur durch einen geänderten Brennstoff realisiert werden. Zuerst werden im Spallationstarget schnelle Neutronen erzeugt, die aus den Isotopen  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  und  $^{240}\text{Pu}$  durch Neutroneneinfang Spaltstoffe brüten. Die gebrüteten Spaltstoffe ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Pu}$ ) können dann durch moderierte Neutronen gespalten werden, was zur Erzeugung der thermischen Leistung und ferner zu einer elektrischen Leistung führt. In der Abb. 8-2 ist eine schematische Darstellung eines ADS-Transmutationssystems dargestellt.

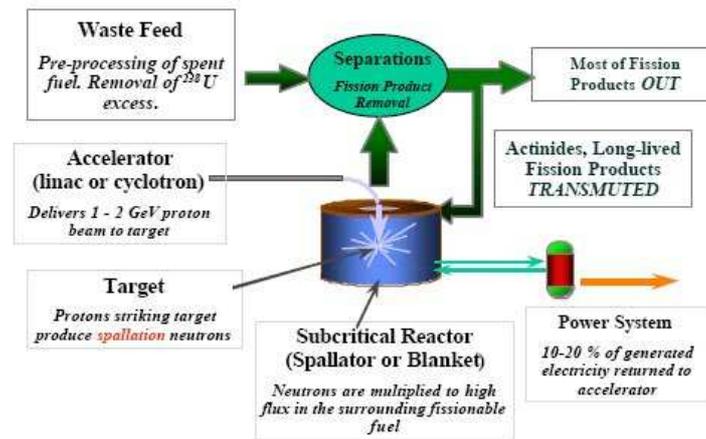


Abb. 8-2: Schematische Darstellung eines ADS-Transmutationssystems /Gud 00/

Das Konzept des Energy Amplifiers (EA) /Rub 95a/ basiert auf der Neutronenproduktion durch Spallation an Blei und der Vermehrung der Neutronen in der Kernspaltungsreaktionen durch Actiniden. Durch die Kernspaltungen in der unterkritischen Anordnung werden nicht nur die langlebigen Actiniden in kurzlebige Spaltprodukte umgewandelt, sondern es wird auch Energie in Form von Wärme erzeugt. Die erzeugte thermische Energie wird über das Primärkühlmittel aus den Brennelementen abgeführt und über das Sekundärkühlmittel an den Dampfprozess zur Energieerzeugung übertragen. (Abb. 8-1).

Ein Teil der erzeugten elektrischen Energie wird benötigt, um den Beschleuniger zu betreiben. Die Höhe dieses Energieanteils, sowie auch der verbleibende Anteil an Energie zur Energiegewinnung ist von der Neutronenvermehrung (Multiplikationsfaktor  $k$ ) im Blanket-Blei-Pool (Abb. 8-1) abhängig. In diesem Zusammenhang ist die Lage des optimalen  $k$ -Wertes systemspezifisch und muss für jede Anlage über eine neutronenphysikalische Auslegung individuell ermittelt.

Ein erstes Experiment unter dem Namen FEAT (First Energy Amplifier Test) wurde 1995 am CERN zum Vergleich der experimentellen Daten mit den aus EA-MC /Kad 00/ errechneten Werten und zur Untersuchung des Einflusses der kinetischen Protonenenergie auf den Energiegewinn (EA-MC-Code ist ein Monte Carlo Code für die Berechnung von dreidimensionalen stochastischen zeit- und energieabhängigen Neutronenverteilungen) durchgeführt.

Der Energiegewinn oder auch die Energieverstärkung in einem EA-System ist definiert als der Quotient zwischen der in einem EA produzierten und der durch den Beschleuniger verbrauchten Energie. In /Kad 05/ wurde der Quotient mittels [Gl. 8-1] parametrisiert. In der Praxis soll der Gewinn  $G$  zwischen 30 und 60 betragen.

$$G = G_0/(1-k) \quad [\text{Gl. 8-1}]$$

$k$  Multiplikationsfaktor

$G_0$  Konstante, die den jeweiligen Spallationsprozess charakterisiert.

Das FEAT Experiment wurde an einer existierenden unterkritischen Anlage mit Natururan und Leichtwasser durchgeführt. Uran wurde in Form von mehreren dünnen mit Aluminium umhüllten Stäben im Leichtwasser (als Moderator) eingetaucht und in hexagonaler Anordnung positioniert (Abb. 8-3). Für das Experiment wurde ein Protonenstrahl (von  $10^8$  Protonen/s) durch CERN Proton Synchrotron (PS) geliefert. Der gefundene maximale Multiplikationsfaktor beträgt hier  $k = 0,97$ .

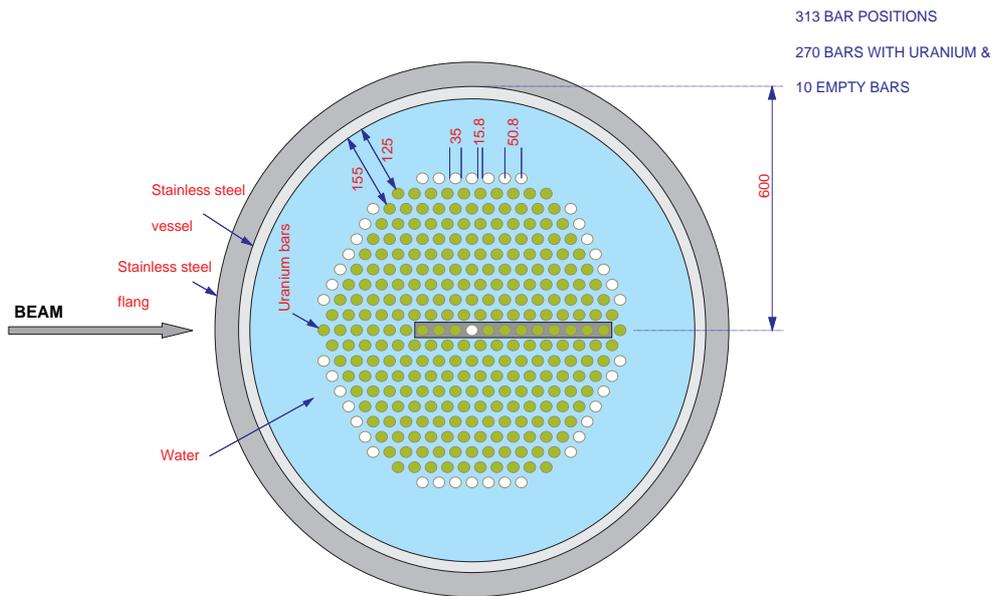


Abb. 8-3: Hexagonale Anordnung des Targets in der unterkritischen FEAT-Anlage /Kad 00/

In der Abb. 8-4 ist der Energiegewinn in Abhängigkeit von der kinetischen Protonenenergie dargestellt. Für die Protonenenergie im Bereich über 1 GeV ist der Gewinn fast konstant, während er unter 800 MeV deutlich abfällt. D.h. für einen Energieverstärker ist die Protonenstrahlenergie von 1 GeV ausreichend, um optimale Energiegewinne zu erzeugen.

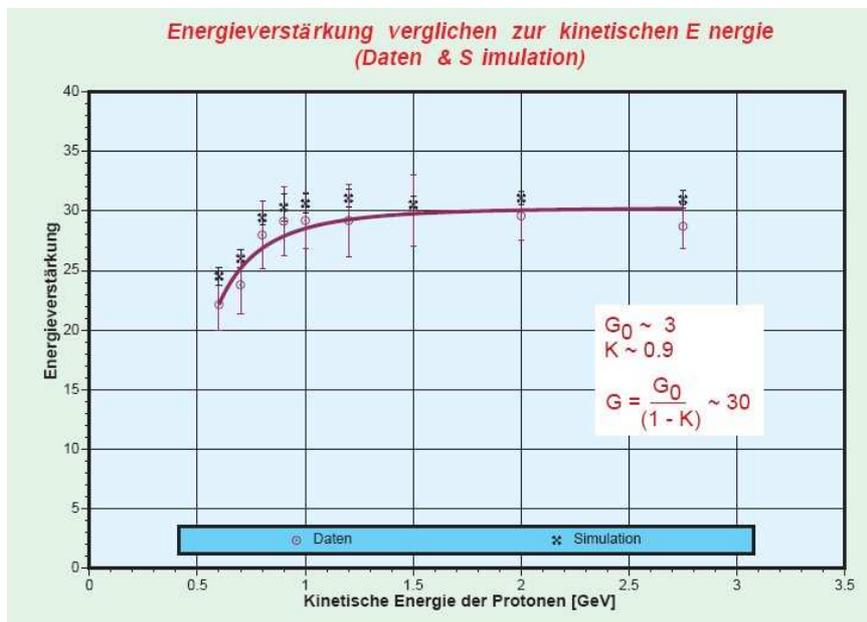


Abb. 8-4: Mittlerer Energiegewinn in Abhängigkeit von der kinetischen Protonenenergie in der FEAT-Anlage nach /Rad 04/ und /Kad 05/.

## 8.1 Abschirmungsproblematik an beschleunigergetriebenen Systemen

In /ANS 99/ wurde ein technisches Layout einer subkritischen Transmutationsanlage ausgearbeitet (Abb 8.1-1), um die Machbarkeit eines beschleunigergetriebenen Systems zu demonstrieren. In dieser Anordnung wurde als Kühlmittel und gleichzeitig Spallationstarget eine flüssige Pb-Bi-Mischung (Siehe auch Kap. 8.1.2) verwendet. Die Protonenstrahlenergie beträgt 600 MeV, der mittlere Protonenstrom 3,2 mA. Diese Transmutationsanlage besteht (wie auch die anderen Transmutationsanlagen) aus folgenden Hauptkomponenten:

- Protonenbeschleuniger mit einem Protonenstrahlfenster (Pos. 5)
- Target aus schweren Atomkernen (Pos. 5)
- Blanket mit Brennstoff (Pos. 1)
- Hilfssysteme (Kühlkreisläufe, Wärmetauscher etc.)

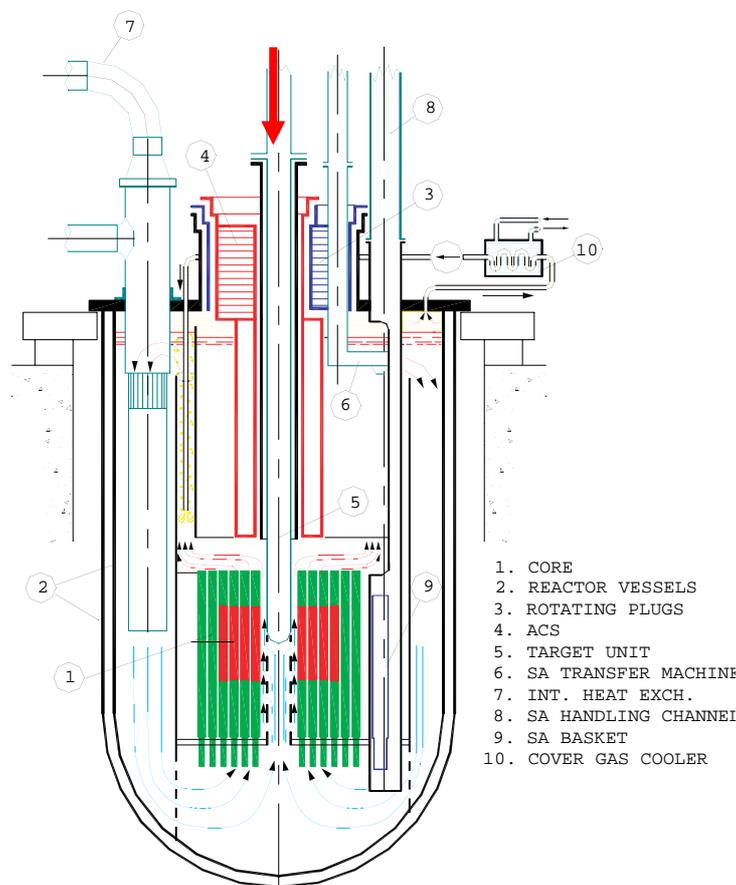


Abb. 8.1-1: Schema einer subkritischen Transmutationsanlage sog. EADF (Energy Amplifier Demonstration Facility /ANS 99/, /Kad 00/)

Der Protonenbeschleuniger erzeugt einen Protonenstrahl im Bereich von 0,6 bis 1 GeV Energie. Für den Übergang des Protonenstrahls ins Target wird ein Protonenstrahlfenster benötigt. Die Hauptaufgabe des Protonenstrahlfensters (analog zur reinen Spallationsquelle) ist die atmosphärische Trennung des Beschleunigervakuums und der Targetatmosphäre bei gleichzeitig möglichst hoher Transparenz für den Protonenstrahl. Das Anforderungsprofil des Protonenstrahlfensters wurde u.a. in /Jan 95/, /But 04/ untersucht und spezifiziert. Bei der Verwendung von Blei oder Pb-Bi als Flüssigmetalltarget stellt sich aufgrund des niedrigen Dampfdrucks und der entsprechend niedrigen Verdampfungsraten die Frage, ob ein Fenster über-

haupt notwendig ist. Die hohen Druckgradienten können z. B. durch die Methode des differentiellen Pumpens erzeugt werden. Das Protonenstrahlfenster stellt in dem Falle nur eine zusätzliche Sicherheitsbarriere dar, die das Vakuum des Beschleunigers aufrecht hält (Abb. 8 - 1). Jedoch treten auch hier einige Probleme auf. Die Temperatur des Systems beträgt (im Falle des flüssigen Bleis) ca. 1000 °C. In solcher Umgebung können keine Fe-basierten Werkstoffe eingesetzt werden.

Bei der Verwendung eines Feststofftargets für eine ADS Anlage stellen die Ausführung des Protonenstrahlfensters und dessen Kühlung Sicherheitsprobleme dar. Im Fenstermaterial wird abhängig von Strahlstromdichte und gewähltem Material eine volumenbezogene Wärmeleistung deponiert. Das Protonenstrahlfenster wird neben der Druckdifferenz von ca. 1 bar zwischen Beschleunigervakuum und Targetatmosphäre hauptsächlich durch den Druck des Kühlmittels belastet. Gleichzeitig bestimmt die Strahlenschädigung des ausgewählten Strahlfenstermaterials entscheidend die Wechselfrequenz des Fensters, die Zuverlässigkeit des Beschleunigers und die Zeitverfügbarkeit der ADS-Anlage.

### 8.1.1 Auslegung der Protonenbeschleunigerabschirmung

Die Leistung des Protonenstrahls sowie die Beschleunigercharakteristik sind ausschlaggebende Faktoren für die Auslegung des ADS-Systems. In der Abb. 8.1.1-1 ist eine Relation zwischen den Strahlparametern ( $I_B$ - Strahlstrom,  $E_B$ -Strahlenergie) und der elektrischen Leistung eines unterkritischen ADS-Systems (bei konstantem Parameter  $k_{\text{eff}} = 0,97$ ) dargestellt. Da die Protonenstrahlleistung mit dem heutigen Stand der Beschleunigertechnik bis 5 MW möglich ist (ESS-Studie), ist die elektrische Leistung auf 100 MW<sub>e</sub> begrenzt (Abb. 8.1.1-1). Für die industrielle Anwendung des unterkritischen ADS-Systems als Kraftwerk würden Protonenstrahlleistungen in der Höhe von 100 MW (Strahlstrom 100 mA, Energie 1 GeV) benötigt /NEA 02/.

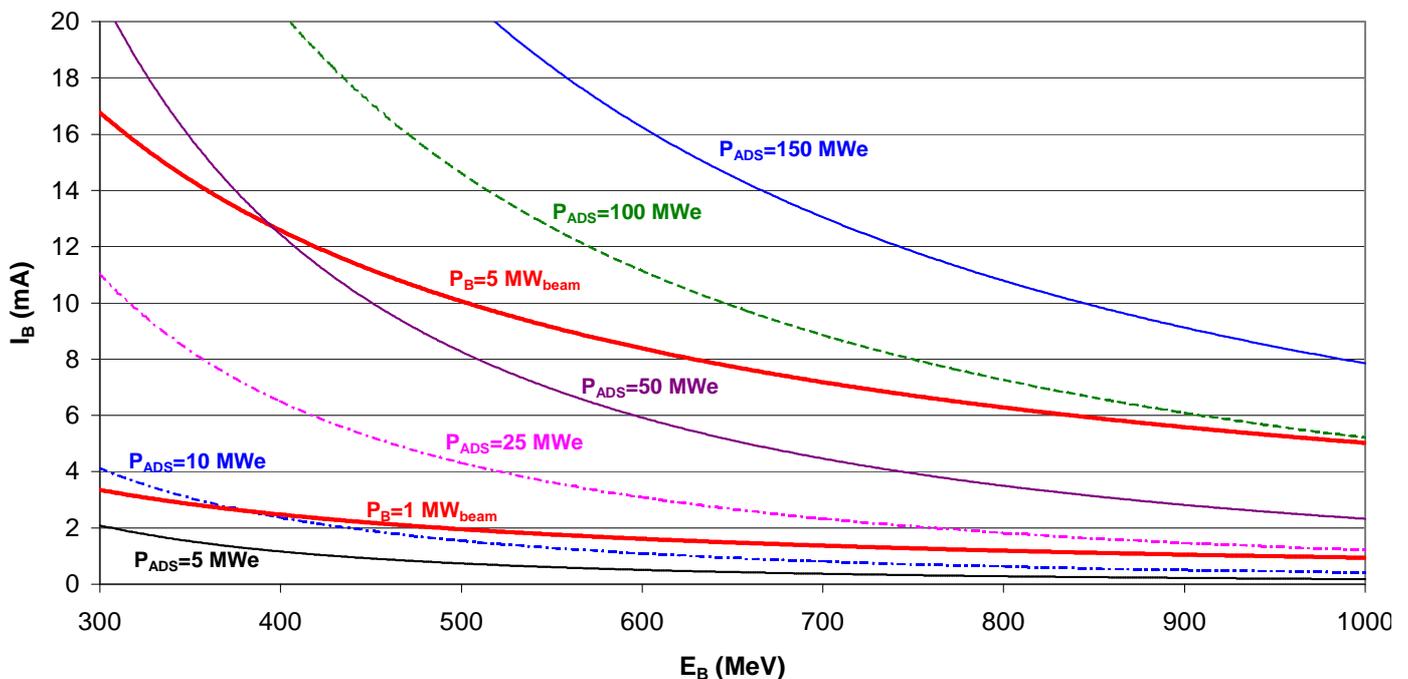


Abb. 8.1.1-1: Beschleunigerleistung für ADS-System nach /NEA 02/.

Für einen ADS-Beschleuniger mit einer Protonenenergie in der Größenordnung von 1 GeV werden zwei unterschiedliche Systeme in Betracht gezogen: Linearbeschleuniger und Zyklotron. Die Entscheidung, welche der beiden Systeme für eine Transmutationsanlage gebaut werden sollten, hängt von mehreren Faktoren ab. Vor allem die Protonenstrahlparameter sowie die Betriebszuverlässigkeit müssen bei der Auswahl berücksichtigt werden. Dabei liegt die Parametergrenze für die Anwendung des Zyklotrons bei Energien bis zu 1 GeV und bei Leistungen bis zu 10 MW.

Im Linearbeschleuniger werden die geladenen Teilchen auf einer langen geraden Strecke beschleunigt /ESS 03/, /Kip 98/. Auch hier werden die Teilchen durch die wechselnde elektrische Polarität in verschiedenen Beschleunigerstufen beschleunigt. Typische Baulängen für Linearbeschleuniger bei 1 GeV Strahlenergie betragen 500 bis 800 m. Die Anwendungsgrenzen sind eher ökonomischer, als technologischer Natur. Vor allem die Abschirmung der langen Beschleunigerstrecke macht einen erheblichen Kostenfaktor aus.

In der NEA- Studie /NEA 02/ wurde ein Entwurf eines Linearbeschleunigers 100 MW-Klasse vorgestellt, wobei sich dieser Entwurf auf die protonenphysikalischen Betrachtungen beschränkt. Ein technisches Konzept wurde dabei nicht ausgearbeitet. Es fehlen vor allem Untersuchungen und Auslegungen bezüglich der Abschirmung.

Aus sicherheitstechnischer Sicht gelten gleiche oder ähnliche Anforderungen an die Beschleunigerabschirmung in einem ADS-System wie bei einer „reinen“ Spallationsquelle (siehe Kap. 6). Aufgrund der erheblich größeren Strahlleistungen des Protonenstrahls müssen zusätzliche Anforderungsaspekte in Betracht gezogen werden.

- 1. Strahlverluste im Normalbetrieb** – In einem 100 mA RFQ (Radio frequency quadrupole) Bereich eines niedrig energetischen (6,7 MeV) Beschleunigers (LEDA- Low Energy Demonstration Accelerator) in LANL (USA) ergaben die ersten Messungen, dass bei einem kontinuierlichen Protonenstrahlstrom von 100 mA die Strahlverluste unter 5 % der Leistung gehalten werden können. Beim Protonenstrahl von 80 mA wurden Strahlverluste von 1-2 % gemessen /Joh 99/, /Fer 01/. Die Strahlverlustwerte können in diesem Bereich bis zu 20 W/m erreichen. Dies erfordert viel stärkere Abschirmungen, als z.B. die für den Beschleuniger der Spallationsquelle ESS (siehe Kap. 6.2). Insbesondere stellen sich hier die Fragen nach der Zugänglichkeit und Handhabung der Beschleunigerkomponenten im Tunnel selbst. Bei so großen Strahlverlusten müssten fast alle Arbeiten am Beschleuniger, an den Kavitäten etc. mittels fernbedienter Manipulatoren durchgeführt werden. Dies würde die Kosten des Beschleunigerbaus enorm erhöhen. Aber auch im Hochenergiebereich ist mit erhöhten kontinuierlichen Strahlverlusten zu rechnen. Die exakte Bestimmung der Strahlverluste sollte nicht nur theoretisch errechnet sondern auch in der Praxis ermittelt werden. Dies ist immens wichtig für die exakte Auslegung des Beschleunigerabschirmungsdesigns.
- 2. Strahlverluste bei Betriebsstörungen** – Auch hier müssen konservative Annahmen getroffen werden. Im Kap. 6.2 wurden Annahmen von Verlust von 5 aufeinander folgenden Vollenleistungspulsen (10 MW, 5 Einzelpulse) getroffen. Diese Annahmen gelten allerdings nur für einen gepulsten Protonenbeschleuniger. Die Protonenbeschleuniger für ein ADS-System sind meistens als Beschleuniger mit kontinuierlichem Protonenstrahl geplant. Dennoch kann auch hier der spontane Verlust innerhalb wenigen ms an einem beliebigen Punkt des Beschleunigers stattfinden (stochastische Verteilung). Da hier wesentlich größere Strahlleistungen (100 MW) auftreten, muss die Abschirmung um ein vielfaches stärker werden, als die im Kap. 6.2 dargestellte. Vor allem die spontanen Strahlverluste und daraus resultierender Skyshine werden die Abschirmdicke eines ADS-Beschleunigers

bestimmen. Hierzu müssen genaue Rechnungen und Untersuchungen durchgeführt werden.

3. **Zeitverfügbarkeit des Protonenstrahls** – Bei der industriellen Nutzung eines ADS-Systems muss eine Zeitverfügbarkeit des Protonenstrahls von 95-97 % gewährleistet werden. Die Energieproduktion in einem ADS-System ist ein kontinuierlicher Prozess, der hohe Betriebssicherheit gewährleisten muss. Auch die Kontinuität des Protonenstrahls ist einer der wichtigsten Faktoren in der Auslegung des Protonenbeschleunigers. Eine Unterbrechung des Strahls für eine längere Zeit als 300 ms könnte zu sehr großen thermischen Spannungen in der Beschleunigerbauteilen (z. B. Protonenstrahlfenster) und dadurch zu verminderter Lebensdauer der Beschleunigerstrukturmaterialien führen /NEA 02/.

Unabhängig vom eingesetzten Beschleunigerkonzept können keine der heute betriebenen oder sich im Bau befindlichen Anlagen diese Protonenstrahlleistungen von 100 MW erzeugen. Deswegen müssen weitere Forschungsarbeiten bezüglich der Strahlleistung, der Zeitverfügbarkeit sowie des Abschirmungsdesigns durchgeführt werden. Die, nach dem heutigen Stand der Technik, leistungsstärksten Beschleuniger erreichen Leistungen von 0,7 MW (Zyklotron SINQ – 0,59 GeV, 1,2 mA) bis zu 1,4 MW (Linac+Speicherring SNS- 1,0 GeV 1,4 mA). Für die ESS-Anlage wurde ein Beschleunigerkonzept von 2 x 5 MW (Linac+Speicherring mit je 1,334 GeV 3,75mA) entwickelt. Allerdings wird das ESS-Projekt nicht realisiert.

Bei der Auslegung des Beschleunigers sollte nicht nur die Protonenphysik, sondern auch die Abschirmungstechnik in Betracht gezogen werden. Diese Entwicklungsarbeiten sollen parallel aus physikalischer und ingenieurtechnischer Sicht vollzogen werden, um die notwendigen Fortschritte in der ADS-Systemauslegung zu erreichen.

### 8.1.2 Abschirmungsproblematik bei der Target-Blanketstation

Die Target-Blanketstation ist der zentrale Bauteil der Transmutationsanlage. Hier wird in Abhängigkeit von der Protonenstrahlenergie und dem Targetmaterial der benötigte Neutronenfluss erzeugt. Generell wird zwischen Feststofftarget und Flüssigtarget unterschieden.

Als Feststofftargetmaterialien wird vorzugsweise Wolfram, Uran oder Tantal eingesetzt. Allerdings ergeben sich beim Betrieb eines Feststofftargets, insbesondere durch die hohe im Target deponierte Energie, einige Probleme bei der Anwendung (z. B. hohe Wärmefreisetzung im Target, hohe Nachzerfallswärme, Kühlungsschwierigkeiten). In solchen Systemen wird vor allem Natrium als Kühlmedium eingesetzt. Der niedrige Schmelzpunkt von 98°C führte zur Natriumkühlung bei den sog. schnellen Brutreaktoren. Natrium zeichnet sich auch durch eine gute Verträglichkeit mit den Strukturwerkstoffen aus. Hier treten im Gegensatz zu den Flüssigmetallkühlungen keine signifikanten Korrosionsprobleme in den Umgebungsstrukturen auf /Ung 04/. Trotzdem wird vom Natrium als Kühlmedium zunehmend Abstand genommen. Natrium reagiert stark exotherm mit Luft und Wasser. Zusätzlich ist die niedrige Siedetemperatur von Natrium (883°C) ein Sicherheitsrisiko.

In den derzeit diskutierten Transmutationskonzepten /Jan 95/, /Kne 99/, /Gud 00/, /Kur 02/ werden vorwiegend Flüssigmetalltargets (entweder Blei oder Blei-Wismut-Mischung (weiter Pb-Bi-Mischung)) als Target bevorzugt. Ein anderes Flüssigmetall, nämlich Quecksilber wurde auch als Kühlmittel für ADS- Systeme vorgeschlagen. In den reinen Spallationsquellen SNS und JPARC wurde Quecksilber als Targetmaterial verwendet. Jedoch sprechen der niedrige Siedepunkt von 356°C und der hohe Absorptionswirkungsquerschnitt für Neutronen gegen den Quecksilbereinsatz in einem ADS-System.

Der Vorteil der Flüssigmetalle in einer Transmutationsanlage besteht darin, dass das Spallationsmaterial auch gleichzeitig als Kühlmittel verwendet werden kann. Dadurch kann nicht nur eine sehr effiziente und einfache Kühlung realisiert, sondern auch eine kontinuierliche Entfernung der Spaltprodukte über die Gasphase ermöglicht werden.

Beim Einsatz eines Flüssigmetalltargets müssen jedoch auch zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden, die eng mit dem eingesetzten Flüssigmetall zusammenhängen.

Flüssiges Blei reagiert nicht exotherm mit Wasser oder Luft, was aus sicherheitstechnischer Sicht einen erheblichen Vorteil bietet. Beim Protonenbeschuss weist Blei hohe Neutronenausbeute aus, und eignet es sich daher gut als Spallationstarget.

Durch die Aktivierung des Bleis entsteht aus  $^{204}\text{Pb}$  das Nuklid  $^{205}\text{Pb}$  mit einer signifikant langen Halbwertszeit von  $1,5 \times 10^7$  Jahre. Allerdings ist der Anteil von  $^{204}\text{Pb}$  in Blei sehr gering.

Zu den weiteren Nachteilen bei der Bleikühlung zählen die hohe Bleischmelztemperatur von 327°C, was eine Temperatur des Primärkreislaufes von 400 bis 600°C erfordert /ENE 01/, und erhebliche Korrosionsschwierigkeiten bereitet.

Die Pb-Bi-Mischung besteht aus einer eutektischen Mischung von 44% Blei und 56% aus Wismut. Die Schmelztemperatur der eutektischen Mischung beträgt 125°C. Dadurch kann die erforderliche Mindesttemperatur im Primärkreislauf erheblich reduziert werden.

Der Zusatz von Wismut führt hingegen zu erhöhter Korrosivität des Mediums. Das größte Problem bei der Verwendung von Pb-Bi-Mischung stellt das durch den Neutroneneinfang in  $^{209}\text{Bi}$  in Spallationsreaktionen (p, xn) entstandene Isotop  $^{210}\text{Po}$  dar. Dieser  $\alpha$ -Strahler (Halbwertszeit 138 Tage) mit einer hohen Toxizität ist extrem flüchtig. Dies führt innerhalb kurzer Zeit zu einer Kontamination aller mit Pb-Bi benetzten Teile mit  $^{210}\text{Po}$ .

Flüssigmetalle zeichnen sich durch sehr gute Kühleigenschaften aus. Der Betrieb der Anlage kann im Gegensatz zur Gaskühlung bei nahezu Umgebungsdruck erfolgen.

Der Flüssigmetalleinsatz weist aber auch erhebliche Nachteile auf. Die Betriebstemperatur der Kühlung muss größer als die Schmelztemperatur des Metalls sein, um das Erstarren des Kühlmittels an jeder Stelle des Kühlkreislaufes zu verhindern. Darüber hinaus, durch die hohe Dichte der Flüssigmetalle (bei Blei und Pb-Bi) müssen erhebliche Massen im Primärkreislauf bewegt werden. Auch erschwert die Undurchsichtigkeit flüssiger Metalle die kontinuierliche Überwachung sicherheitsrelevanter Bauteile.

Die in Abb.8.1.2-1 dargestellte Abschirmungsanordnung in einer Transmutationsanlage besteht aus einer Kombination aus Stahl und Beton und basiert auf dem vorgeschlagenen in /Cin 04/ und /Gir 04/ XADS-Anlagendesign (eXperimental Accelerator Driven Systems).

Das Protonenstrahlfenster und Brennstoff befinden sich in einem Flüssigmetalltarget aus einer Mischung von Blei und Wismut, welche durch Umpumpung und mittels Wärmetauschers auf konstantem Temperaturniveau gehalten wird. Der Brennstoff ist in einem sog. Blanket deponiert. Diese komplette Anordnung wird in einem inneren Liner positioniert. Von außen wird der innere Liner mit einem Gas gekühlt. Außerhalb des inneren Liners befindet sich die Eisenabschirmung. Die erste Schicht der Stahlblöcke ist wassergekühlt. Anschließend wird die nächste Eisenschicht in Form von ungekühlten Abschirmungsblöcken aufgebaut. Die ganze Eisenabschirmung ist in einem äußeren Liner untergebracht. Der äußere Liner ist mit einem dicken Schwerbetonmantel umschlossen. Oberhalb des Protoneneintritts befindet sich eine dicke abnehmbare Abschirmung in Form eines Abschirmstopfens. Durch diese Öffnung wird der Kranzugang zu den untergebrachten Teilen gewährleistet.

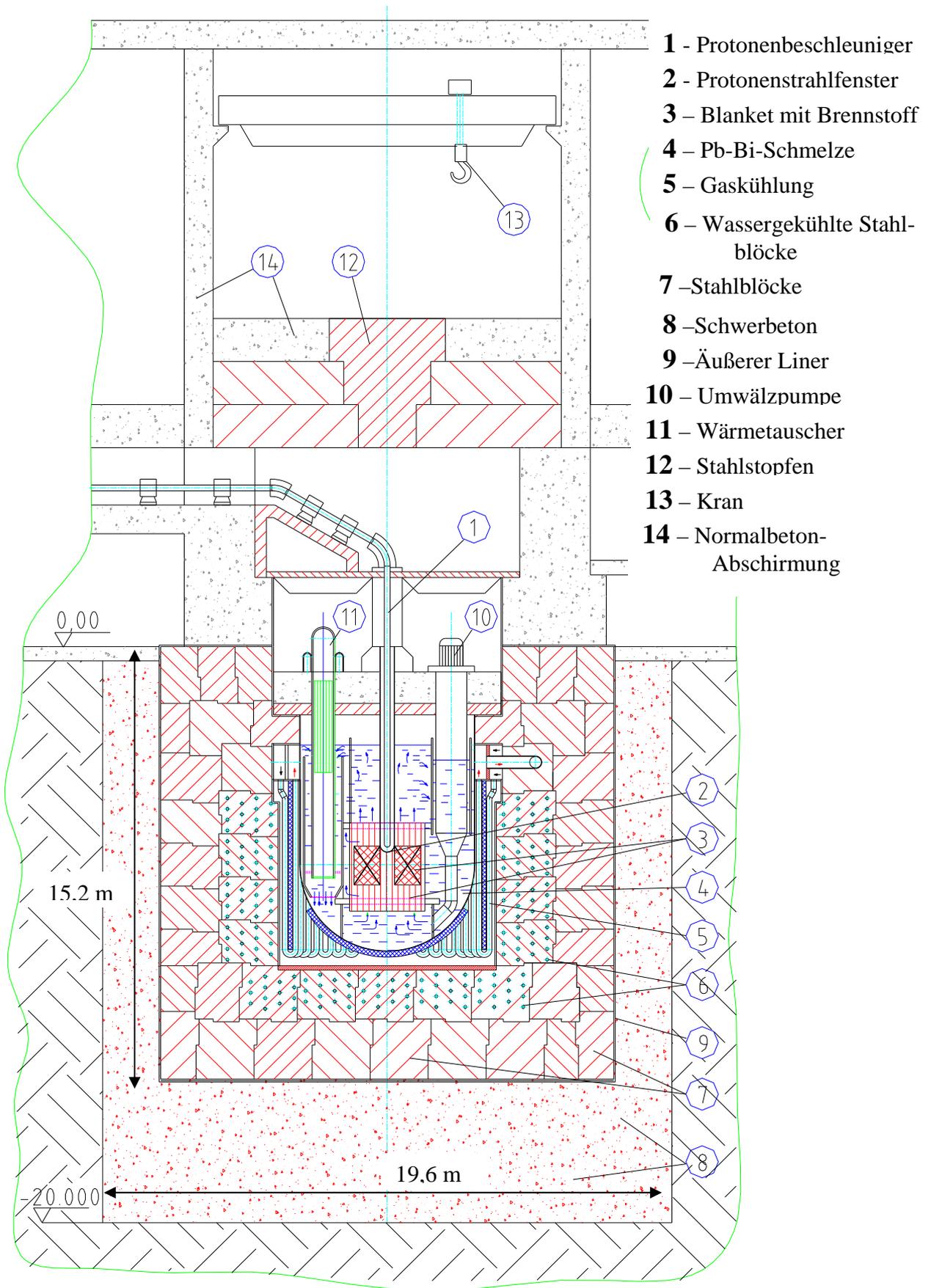


Abb. 8.1.2-1: Target-Blanketstationabschirmung einer beschleunigergetriebenen Transmutationsanlage.

Im Kapitel 2.2 wurden die wichtigsten Eigenschaften eines Spallationsneutronenspektrums beschrieben und die Unterschiede in der Reaktor- und Spallationsanlageabschirmung diskutiert. Ähnliche Neutronenspektren entstehen auch in einem ADS-System. Als Beispiel können die für die EADF mittels EA-MC-Code kalkulierte Neutronenspektren.

In der Abb. 8.1.2-2 sind Neutronenflüsse an verschiedenen Stellen der EADF-Anlage dargestellt. Diese Neutronenflüsse können auch für die Bestimmung der Wärmedeposition und Strahlenschädigung der Materialien genutzt werden.

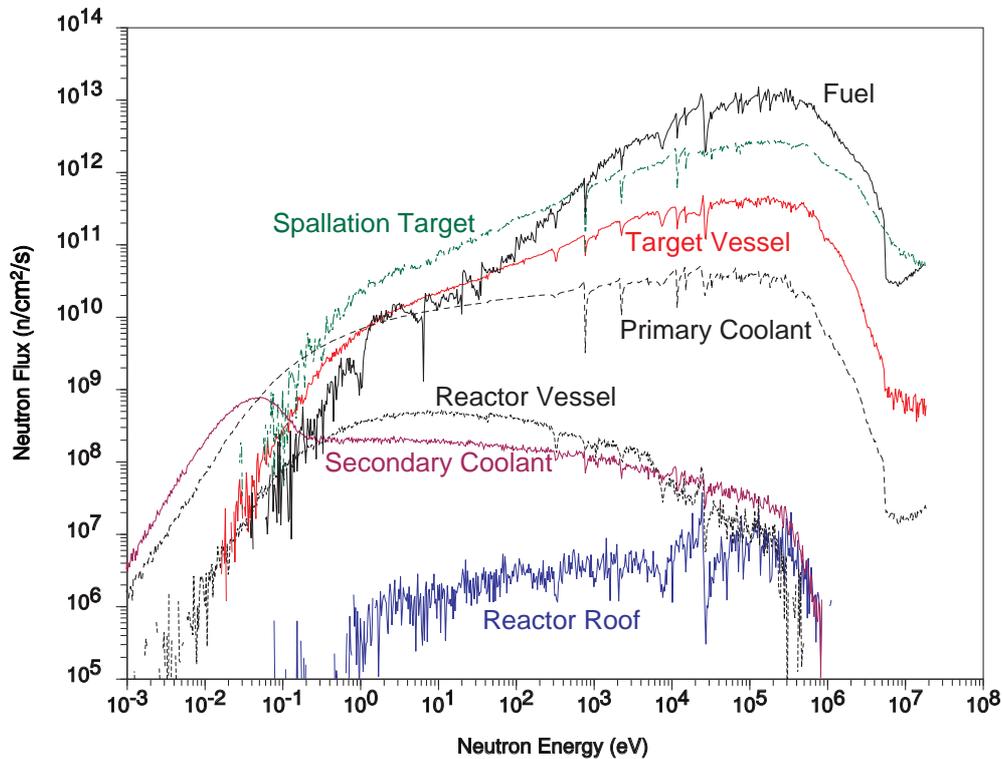


Abb. 8.1.2-2: Neutronenflüsse an verschiedenen Stellen in der EADF-Anlage /Kad 00/.

Die aus dem Target resultierenden hochenergetische Neutronen zeigen auch hier starke Energieabhängigkeit und anisotropische Verteilung. In der Vorwärtsrichtung ( $0^\circ$  zum Protonenstrahl) reicht die höchste Neutronenenergie bis zur Energie des wechselwirkenden Primärteilchens. D.h. auch hier bestimmen die hochenergetische Neutronen die Abschirmauslegung. Dies bestätigten auch durchgeführte für die EADF-Anordnung FLUKA Simulationen (Abb. 8.1.2-3).

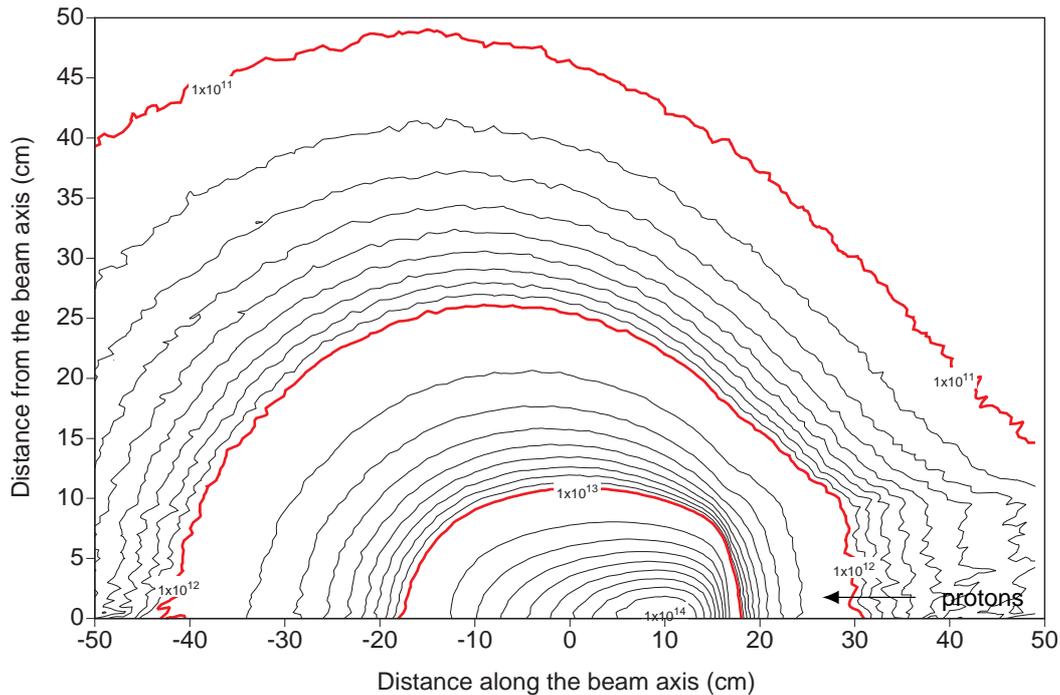


Abb. 8.1.2-3: Hochenergieneutronenfluss ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) bezogen auf die Protonenstrahlachsen  
Protonenstrahl von 600 MeV, 3,2 mA in der EADF-Anlage /Kad 00/.

Wie schon im Kap. 7.1.1 angesprochen kann der Protonenstrahl auf verschiedene Weise zum Target geführt werden. In den meisten Entwürfen einer Transmutationsanlage wird die vertikale Protonenstrahlführung von oben bevorzugt. Diese Protonenstrahlführungsanordnung weist jedoch einige Nachteile auf:

- Diese Anordnung erfordert komplizierte Blanket Be- und –Entladungsvorgänge.
- Der letzte Beschleunigerumlenkmagnet befindet sich unmittelbar über dem Target-Blanketsystem, was den Zugang zu den meisten Targetkomponenten sehr erschwert (Abb. 8.1.2-1).
- Die durchgeführten Dosisrechnungen für das sog. MYRRHA-Projekt /Abd 04/ zeigten, dass in einem ADS-System die Protonenstrahlführung eine der größten Leckagestellen für die rückwärts zur Protonenstrahlrichtung gestreuten Neutronen darstellt. Die mittels MCNPX-Codes berechnete Äquivalentdosis beträgt auf der Oberfläche über dem Target in 15 cm Entfernung vom Protonenstrahlrohr ca. 200 Sv/h (Abb. 8.1.2-4). Diese Strahlungsbelastung erfordert nicht nur sehr starke Abschirmungen über dem Beschleunigerrohr, sondern auch die fernbedienbare Handhabung der Beschleunigerkomponenten im Bereich der Target-Blanketstation.

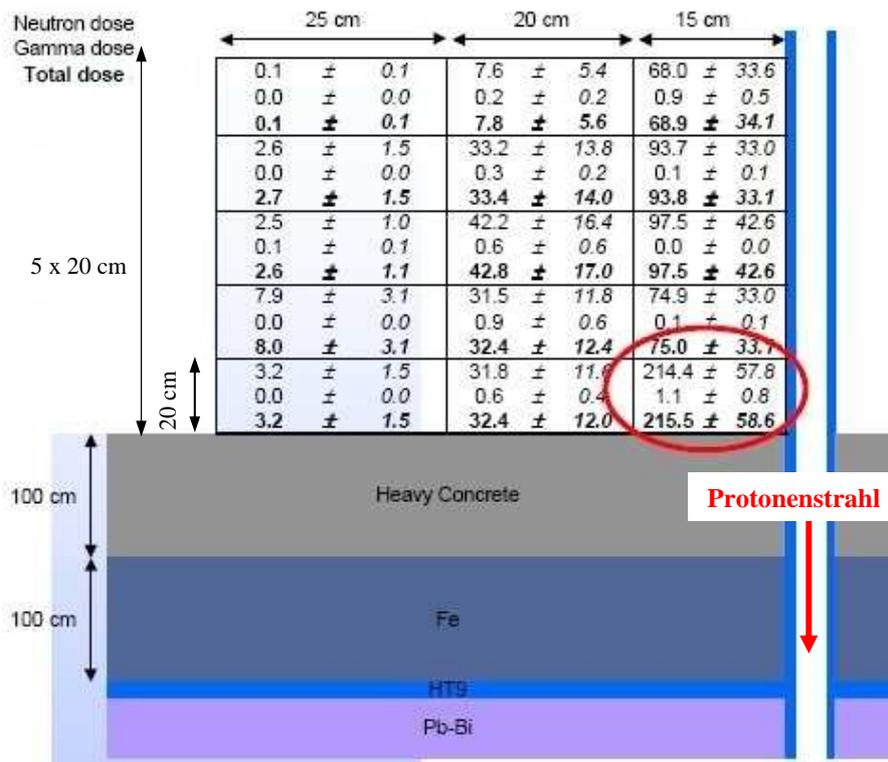


Abb. 8.1.2-4: Berechnete Dosisleistungen in Sv/h auf der Deckenoberfläche im MYRRHA-Projekt /Abd 04/.

Die Abschirmungsdicke kann bei der Anwendung von Flüssigmetalltargets (Blei oder Pb-Bi) aufgrund der Selbstabschirmungsprozesse im Flüssigmetall dünner sein wie bei einer reinen Spallationstargetstationsabschirmung. Vor allem in der Protonenstrahlrichtung könnte bei genügend dicker Flüssigmetallschicht die Abschirmungsdicke kleiner werden. Durch die sog. Selbstabschirmung des Flüssigmetalls kann der Abschirmungsaufbau weniger Eisen bzw. Stahl beinhalten. Im Gegensatz zu einer Spallationsquelle befinden sich in einem ADS-System keine Neutronenleiter oder Instrumente. Daher ist die Anforderung einiger Instrumente, so nah wie möglich an den Moderatoren aufgebaut zu werden, nicht gegeben (vergl. auch Kap. 7.2.1). Die volumetrische Abschirmungsbegrenzung in der ADS-Target-Blanketstation ist vor allem von den Platzverhältnissen sowie von den Baukosten der Anlage abhängig. Die Verwendung preiswerter Materialien wie z. B. Normalbeton (siehe Tab. 4.5-2, Kap. 4.5) führt zwangsläufig zu größeren Abschirmdicken. Dadurch können aber die Abschirmungskosten gesenkt werden. Es muss jedoch eine genaue Abwägung der Abschirmungsoptionen gemacht werden, um optimales Abschirmungsdesign zu erreichen.

Durch die geforderten hohen Protonenstrahlleistungen ist die Abschirmungsproblematik einer ADS-Target-Blanketstation sicherheitstechnisch komplexer als bei einer reinen Spallationsquelle, wo die Strahlleistungen aus heutiger Sicht bis max. 5 MW reichen. Aus dem Grunde muss zusätzlich zu den oben angesprochenen Abschirmungsproblemen in der Auslegung der ADS-Target-Blanketabschirmung noch die Problemstellung der Kühlung der Target-Blanketabschirmung in Betracht gezogen werden. Die Target-Blanketabschirmung befindet sich außerhalb des Targetbehälters (Abb. 8.1.2-1). Aufgrund der sehr hohen Wärmedeposition im Targetmaterial sowie der großen Neutronenflüsse mit hohen Energien wird in der Abschirmung mit sehr hohen spezifischen Wärmedepositionen gerechnet. Deswegen müssen alle Targets nahen Abschirmstrukturen aktiv gekühlt werden. Die Wahl des Kühlmediums (Wasser, Gas) sowie die Rohrleitungsführung in der Abschirmung haben nicht unerheblichen Einfluss auf die Konfiguration der Abschirmung. In der Abb. 8.1.2-1 ist eine Kombination aus Gas- und Wasserkühlung dargestellt. Mit dem Gas wird die äußere Wand des Targetbehälters

gekühlt. Die erste Schicht der Eisenabschirmung wird dagegen mit Wasser gekühlt. Für die endgültigen thermodynamischen Auslegungen müssen jedoch exakte Berechnungen unter Berücksichtigung der realen Geometrien gemacht werden.

## 8.2 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Abschirmungsproblematik an beschleunigergetriebenen Systemen dargestellt und diskutiert. Es wurde aufgezeigt, welche Bedingungen und Anforderungen für eine sichere Auslegung der ADS-Abschirmung eingehalten werden müssen. Es stellt sich heraus, dass für eine ADS-System-Abschirmungsauslegung noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht. Eine detaillierte Untersuchung zur Abschirmung des Beschleunigers und der Target-Blanket-Station von zukünftigen ADS-Anlagen bedarf neuer Untersuchungen.

Die in diesem Kapitel dargestellten Überlegungen basieren mehr auf theoretischen Betrachtungen und Erfahrungen in der Auslegung einer Spallationsanlagenabschirmung. Eine exakte und genehmigungsreife sicherheitstechnische Abschirmungsausführung kann nur im Zusammenhang mit einem „Bauprojekt“ einer zukünftigen ADS-Anlage erstellt werden.

Die in den Kap. 6.4 und 7.3 aufgezeigten Ablaufschemata zur Abschirmungsauslegung können bei der Abschirmungsauslegung einer Transmutationsanlage dabei hilfreich sein. Sie fassen alle Schritte einer Abschirmungsauslegung für einen Beschleuniger und eine Targetstation um.

## 9 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dargestellt, welche Abschirmungsaspekte, Faktoren, Anforderungen und Überlegungen für die sicherheitstechnische Abschirmungsauslegung eines Beschleunigers und einer Spallationsquelle in Betracht gezogen werden müssen. Die Neutronendosen und -flüsse an Spallationsanlagen weisen ganz andere Problemstellungen auf als Neutronenspektren bei Kernreaktoren. Die unterschiedlichen Hochenergieneutronenspektren in einer Spallationsquelle mit ihrer starken Anisotropie, die in der Abschirmung erzeugten Gammaquanten und sekundären Hoch- und Niedrigenergieneutronen führen zu ganz anderen sicherheitstechnischen und strahlenschutzrelevanten Überlegungen bei der Auslegung der Abschirmung einer Spallationsanlage.

Eine Abschirmung ist im Allgemeinen eine bestimmte Anordnung von Stoffen. Die Hauptaufgabe einer Abschirmung besteht darin, die in einen bestimmten Bereich gelangende ionisierende Strahlung zu verringern oder auf biologisch zulässige Werte zu begrenzen. Um die Stärke der Abschirmung auszulegen, müssen Berechnungen durchgeführt werden. Diese können mit verschiedenem Aufwand durchgeführt werden: Von einfachen Abschätzungen bis hin zu komplizierten Rechenverfahren. Für dicke Abschirmungen, von mehreren mittleren freien Weglängen von der Quelle, hängt die Teilchenfluss- oder Dosisabschwächung annähernd exponentiell von Faktoren wie der Abschwächungslänge und der Dichte des Materials und linear von der Quellstärke ab. Die Prinzipien einfacher Abschirmungsabschätzungen für erste Auslegungen werden aufgezeigt. Für den Sicherheitsingenieur ist es außerordentlich wichtig schon im Vorfeld der Bauplanung, bevor langwierige und komplizierte Computerrechnungen durchgeführt sind, den Platzbedarf und die Abschirmungsanforderungen einer Anlage zumindest grob zu kennen.

Die vielen sicherheitstechnischen Fragestellungen, die beim Bau und Betrieb von Beschleunigern, Spallationssystemen und deren Experimentiereinrichtungen auftreten, können jedoch nur durch Computersimulationsmethoden erfasst und analysiert werden. Diese modernen Computersimulationsmethoden des Teilchentransportes in Materie und der Wechselwirkung dieser Teilchen mit Materie erlauben eine Bestimmung der Abschirm- und Strahlenschutzsicherheit an Mittelenergiebeschleunigern sowie an einer Spallationsquellen. Die heutzutage wichtigsten deterministischen und stochastischen Berechnungsmethoden werden systematisiert, verglichen und ausführlich dargestellt. Das vor allem an den Beschleunigeranlagen auftretende Sky- und Groundshinephänomen wird ausführlich diskutiert und dargestellt.

Realistische Neutronentransport- Berechnungen durch eine dicke Abschirmung sind allerdings sehr kompliziert. Die Anwendung hochentwickelter Berechnungstechniken und gleichzeitig lange Rechenzeiten sind notwendig, um Teilchenflüsse und Teilchenenergiespektren mit guter Statistik zu simulieren. Umso wichtiger ist die Validierung der berechneten mit den aus den Experimenten gewonnenen Daten. Die in dieser Arbeit ausgewählten Experimente tragen zum besseren Verständnis des Teilchentransports sowie der Neutronenproduktion in der Abschirmung bei. Die Übereinstimmung der gerechneten Ergebnisse mit den experimentellen Messungen bestätigt die angewandten Berechnungsmethoden und Computersimulationen. Die Physik der Teilchenstrahlung sowie Strahlenexposition und Strahlenwirkung werden so weit wie nötig in ihren Grundzügen erläutert.

Im Rahmen der Arbeit wird eine Analyse der für die Abschirmung verwendeten Materialien sowie Analyse der Materialienabschirmwirkung gegen die verschiedenen Strahlungsarten zusammengestellt. Dabei wird die Anwendung von Abschirmungsmaterialien aus Recycling-schrott als preiswerte Alternative diskutiert und postuliert.

Die Abschirmung in einem Spallationssystem ist ein Bestandteil der Beschleuniger-, Targetstations- und Instrumentenhallenbauten. Die Planung und das endgültige Layout der Abschirmung muss daher mit allen anderen Bereichen der Anlage abgestimmt werden. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss der Anlagenparameter auf konzeptionelle Aspekte und die daraus resultierenden Abschirmungsanforderungen formuliert. Für die Erstellung der Abschimmungsspezifikationen der Spallationsanlage wird ein Leitfaden erstellt, der dem Sicherheitsingenieur als Wegweiser für den Abschimmungsentwurf dienen kann. Auch die wichtigsten Designanforderungen, die aus einigen Erfahrungen des Autors in der Erstellung von Abschimmungskonzepten hervorgehen, werden erläutert und dargestellt.

Einen großen Bereich der Arbeit nimmt die ausführliche Darstellung der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Umsetzung der Beschleuniger- sowie der Targetstationabschirmung ein. Hier werden sicherheitstechnische Fragestellungen und Probleme bei der Abschirmung an Beschleuniger, Hochstromtargets und Instrumenten erörtert. Dabei werden die sicherheitstechnischen Abschimmungsanforderungen speziell für die Bauten eines Spallationssystems formuliert und diskutiert. Im Anschluss an die jeweiligen Kapitel wird die Abschimmungsausführung an den im Betrieb oder im Bau befindlichen Spallationsquellen analysiert und in Form von Abschimmungsbeispielen dargestellt.

Aufgrund der aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aus anderen Anlagen wird in den Abbildungen 6.4-1 und 7.3-1 jeweils ein „Kochrezept“ für die Erstellung der Beschleuniger- und Targetstationabschirmung aufgestellt. Nach diesem Ablaufschema kann die jeweilige Abschirmung konzipiert und ausgearbeitet werden. Das Ablaufschema zeigt nur die wichtigsten Schritte, die für eine Abschimmungsauslegung notwendig sind. Jeder der Schritte muss exakt entwickelt, überlegt und ausgearbeitet werden. Dies kann nur in enger Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen aus Bereichen wie Teilchentransportberechnung, Sicherheitstechnik und Strahlenschutz, Materialentwicklung, ingenieurtechnische Auslegung durchgeführt werden. Anhand der in dieser Arbeit beschriebenen Beispiele von Beschleuniger- und Targetstationabschimmungen neuer nuklearer Anlagen wird deutlich gezeigt, wie komplex und vielfältig die Sicherheitstechnik von Abschimmungen sich darstellt.

Weltweit wird an Konzepten zur Transmutation und zur Energieerzeugung auf der Grundlage von intensiven Protonbeschleunigern gearbeitet. Partitioning und Transmutation sind technologisch eine interessante Option, um die Endlagerungsproblematik des Abfalls aus Kernreaktoren zu entschärfen. Jedoch sind für diese Entwicklungen zukünftig sehr intensive FuE-Arbeiten erforderlich.

Obwohl die Abschirmung einer der wichtigsten Sicherheitsfaktoren einer Transmutationsanlage ist, wird bei den derzeitigen FuE-Arbeiten von Transmutationsanlagen nur sehr wenig auf die Abschimmungsproblematik eingegangen. Auch die Abschimmungstechnik einer Transmutationsanlage bietet noch erhebliches Entwicklungspotential.

In dieser Arbeit werden die große Komplexität und Vielfalt moderner Abschimmungsauslegungen gezeigt. Durch leistungsfähige Teilchentransportsimulationen sowie durch die Entwicklung der Materialtechnologie werden Abschimmungsauslegungen immer genauer und die Bestimmung von Dosisraten für den fortschrittlichen Strahlenschutz immer realistischer.

Insgesamt stellt die Arbeit den neusten Stand ingenieurorientierter und systematisierter Abschimmungsauslegungsverfahren im Beschleuniger- und Spallationsquellenbereich dar.

## 10 Literaturverzeichnis

- /Abd 04/ H.A. Abderrahim et al.  
*MYRRHA – A Pb-Bi Experimental ADS. Specific approach to Radiation Protection Aspects in the project*  
 ICRS 10/RPS 2004, Madeira, Portugal, May 9-14, 2004
- /Ahl 05/ U. Ahlers Fa. PONTAX GmbH Gesellschaft für Strahlenschutz,  
 An den Birken 11, 57368 Lennestadt Deutschland
- /Als 81/ R.G. Alsmiller, J. Barish, R.L. Childs  
*Skyshine at neutron energies < 400 MeV*  
 Part. Accel. 11 (1981) 131-141.
- /Ami 86/ W. Amian, P. Cloth, V. Drüke, D. Filges, N. Paul, H.Schaal  
*A medium energy neutron deep penetration experiment*  
*Experimental and theoretical analysis*  
 Berichte der Kernforschungsanlage Jülich- Jül-2101  
 ISSN 0366-0885, 1986
- /Ami 86a/ W. Amian, P. Cloth, V. Drüke, D. Filges, N. Paul, H.Schaal  
*Experimental and theoretical analysis of the high energy Deep Penetration Experiment at WNR-Los Alamos*  
 ICANS-IX International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
 SIN Villingen Schweiz, Villinger, September 1986
- /ANS 99/ ANSALDO Nucleare  
*Energy Amplifier Demonstration Facility Reference Configuration: Summary Report*  
 ANSALDO Nucleare, EA-B0.00-1-200-Rev.0, January, 1999
- /Arm 72/ T. W. Armstrong, Chandler K. C.  
*HETC Monte Carlo High Energy Nucleon Meson Transport Code*  
 ORNL-4744, ORNL, 1972
- /Arm 81/ T.W. Armstrong  
*Suggested Spallation Source Shielding Experiments for Code Validation*  
 Armstrong&Associates Report No. AA-814904, October 1981
- /Arm 82/ T.W. Armstrong, F. Cloth, D. Filges  
*Computational Methods for High-Energy Source Shielding*  
 ICANS-VI International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
 27 June – 02 July, 1982

- /Arm 83/ T.W. Armstrong, F. Cloth, D. Filges, H. Schaal  
*Calculation Methods and High-Energy Cross Sections for Spallation Source Shielding*  
ICANS-VII International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario Canada, 1983
- /Bau 81/ G.S. Bauer, H. Sebening, J.-E. Vetter, H. Willax  
*Realisierungsstudie zur Spallations-Neutronenquelle  
Teil II Technisch-wissenschaftliche Beschreibung*  
Arbeitsgemeinschaft Spallations-Neutronenquelle Kernforschungsanlage  
Jülich-Kernforschungszentrum Karlsruhe  
Mai 1981
- /Bau 01/ G.S. Bauer  
*Status von Spallationsquellen und die Weiterentwicklung der SINQ*  
Anwender-Workshop zur Nutzung der Neutronenradiographie  
Paul Scherrer Institut 14.Mai 2001
- /Bau 02/ G.S. Bauer  
*Operational Experience and Development Activities at the Swiss Spal-  
lation Neutron Source SINQ*  
Paul Scherrer Institut, Villingen 2002
- /Ber 63/ H. Bertini  
*Low-Energy Intranuclear Cascade Calculation.*  
Phys. Rev. 113, No.4, 1801 (1963)
- /Ber 69/ H. Bertini  
*Intranuclear Cascade Calculation of Secondary Nucleon Spectra from  
Nucleon-Nucleus Interaction in the Energy Range 340 to 2900 MeV and  
Comparison with Experiments.*  
Phys. Rev. 188, No.4, 1711 (1969)
- /Ber 01/ P. Berkvens  
*Safety aspects, Combined Neutron Centre for European Research and  
Technology (CONCERT)*  
Intermediate Report March1, 2001
- /Ber 02/ P. Berkvens  
*Shielding philosophy adopted for the ESS accelerator*  
17.08.2002
- /Blo 80/ R. N. Blomquist,  
*VIM-A Continuous Energy Monte Carlo Code at ANL*  
A Review of the Theory and Application of Monte Carlo Methods, Pro-  
ceedings of a Seminar-Workshop, ORNL/RSIC-44 (April 1980).
- /Bög 95/ A. Böge  
*Das Techniker Handbuch*  
14. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig 1995

- /Bou 96/ L. Bourgois et al.  
*Health Physics*, 70, 36 (January 1996)
- /Bow 83/ Ch. Bowman  
*Status report on the WNR/PSR pulsed Spallation Neutron Source at the Los Alamos National Laboratory*  
ICANS-VII International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario Canada, 1983
- /Bre 68/ H. Brechna  
*Radiation Effects on Superconducting Magnets*  
SLAC – PUB-469 (August 1968)
- /Bri 86/ J.F. Briesmeister  
*MCNP-A Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport.*  
Los Alamos National Laboratory, LA-7396-M Revision2,  
September 1986
- /Bro 79/ T.A. Broom  
*Shielding for the Spallation Neutron Source at the Rutherford Laboratory*  
Meeting on Targets for Neutron Beam Spallation Sources  
Jülich, 11-12 June 1979
- /But 04/ M. Butzek  
*Sicherheitstechnische Auslegung der Betriebsumgebung eines Hochleistungs-Spallationstargetsystems der Megawattklasse mit Quecksilber als Targetmaterial*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich; Jül-4175  
ISSN 0944-2952, Zentralabteilung Technologie  
D468 (Diss., Wuppertal, Univ., 2004)
- /But 05/ M. Butzek et al.  
*Current status of the development of a Neutron Spin Echo instrument for the SNS*  
ICANS-XVII International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Santa Fe, New Mexico April 25-29, 2005
- /Cat 02/ N. Catalan-Lasheras et al.  
*Accelerator physics model of expected beam loss along the SNS accelerator facility during normal operation*  
Oak Ridge 2002
- /Chi 84/ A. Chilton, J. K. Shultis, R. E. Faw  
*Principles of radiation shielding*  
Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, NJ 07632
- /Chi 00/ K. Chipley  
*Beam Dump Systems Overview*  
SNS PSAD Review Oak Ridge, Sept. 2000

- /Cin 04/ L. Cinotti et al.  
*The experimental Accelerator Driven System (XADS) Designs in the EURATOM 5<sup>th</sup> Framework Programme*  
ANSALDO NUCLEARE Divisione, Genova 2004
- /Clo 83/ F. Cloth, D. Filges, R.D. Neef, H. Schaal  
*Recent Target Design Calculations at KFA*  
ICANS-VII International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario Canada, 1983
- /Clo 84/ P. Cloth, D. Filges et.al.  
*The KFA-Version of the High-Energy Transport Code HETC and the Generalized Evaluation Code SIMPEL*  
KFA-Report Jül-Spez-196  
Report AECL-8488 (1984)
- /Clo 88/ P. Cloth, P. Dragovitsch, D. Filges,  
*Prediction of Double-Differential (p,xn)-Cross Sections*  
Reported in NEANDC(E)-292 U Vol. V (1988)
- /Clo 88a/ P. Cloth, D. Filges et.al.  
*HERMES A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interaction Studies,*  
KFA-Report Jül-2203 (1988)
- /Cos 85/ J.D. Cossairt and L.V. Coulson  
*Neutron skyshine measurements at Fermilab*  
Health Phys.. 48 (1985) 171-181
- /Cos 04/ J.D. Cossairt  
*Radiation physics for personnel and environmental protection*  
Fermilab Report TM-1834, Revision 7, April 2004
- /Dre 62/ L. Dresner  
*EVAP-A FORTRAN program for calculating the evaporation of various particles from excited compound nuclei.*  
Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-196, Oak Ridge,  
April 1962
- /Eick 84/ W. Eickelpasch et al.  
*Die Aktivierung des biologischen Schilds im stillgelegten Kraftwerk Gundremmingen Block A*  
EUR 8950 DE, Brüssel, 1984
- /Ehr 86/ H.G. Ehrlich, J. Wolters  
*Strahlenschutzkonzept am Beschleuniger der SNQ*  
SNQ A 1456.1- von 22.1.1986
- /Emm 79/ M.B. Emmett  
*The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System*  
ORNL-4972/R1, Oak Ridge, 1979

- /ENE 01/ ENEA (Hrsg.)  
*A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration*  
ENEA, 2001-ISBN 88-8286-008-6
- /ESS 97/ *ESS-A Next Generation Neutron Source for Europe: Volume I – The European Spallation Source*,  
ISBN 090 237 6 6500, 1997
- /ESS 02/ *The ESS Project, Volume III – Technical Report*,  
ISBN 3-89366-303-3, 2002
- /ESS 03/ *The ESS Project, Volume III Update– Technical Report*,  
ISBN 3-89336-345-9, 2003
- /Euroatom 96/ *EU Council Directive 96/29/EUROATOM of 13.05.1996, laying down basic safety standards for the health protection of general public and workers against the dangers of ionising radiation*
- /Fas 90/ A. Fasso; Hrsg.: H. Schopper  
*Band 11: Abschirmung gegen hochenergetische Strahlung*  
*Landolt-Börnstein*  
*Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*  
Springer-Verlag Berlin, 1990
- /Fas 93/ A. Fasso; A. Ferrari, J. Ranft, at al.  
*FLUKA 92*  
Proc. of the Workshop on „Simulating Accelerator Radiation Environments“ Santa Fe Jan. 11-15 1993
- /Fer 01/ R. Ferdinand  
*IPHI-RFQ Reliability Approach*  
Proceedings of the 2nd Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Accelerators  
Aix-en-Provence (France), 22-24 November 1999,  
OECD/NEA, Paris (France), 2001
- /Fil 92/ D. Filges  
*Moderne Monte Carlo Teilchentransport-Simulationsverfahren für sicherheitstechnische Anwendungen und Freagestellungen in der Beschleunigertechnik und in der Raumfahrt.*  
Habilitationsschrift, Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal, 1992  
Berichte des Forschungszentrums Jülich; 2609 ISSN 0366-0885

- /Fil 95/ D. Filges, R.-D. Neef, H. Schaal, B. Wolfertz  
*Procedures and Data for Shielding Calculations of Spallation Target Stations and Accelerators in the Medium Energy Range*  
Proceedings of the Specialists Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, pp.:251-273,  
28-29 April 1994, Arlington Texas (USA) OECD Documents, Paris, 1995
- /Fil 00/ D. Filges et.al.  
*Radiation Shielding and Protection of the European Spallation Neutron Source (ESS)*,  
Journal of Nuclear Science and Technology , ICRS-9 Oct. 17-22, 1999  
Supplement 1, S. 30-34 (March 2000)
- /Fil 00a/ D. Filges, R.-D. Neef, H. Schaal  
*Nuclear simulation and radiation physics investigations of the target station of the European Spallation Neutron Source*  
Nuclear Technology Vol. 132 P. 30-48, Oct. 2000
- /Fre 72/ E. Freytag  
*Nukleare Elektronik und Messtechnik Band 3*  
*Strahlenschutz an Hochenergiebeschleunigern*  
ISBN 3 7650 2502 X  
Verlag G. Braun Karlsruhe 1972
- /FRM 05/ Internetseite (16.09.2005):  
<http://www.frm2.tum.de/panda/index.shtml>
- /Gal 01/ F.X. Gallmeier  
*Radiation Transport through complex shield penetrations in accelerator environments using hybrid Monte Carlo/Discrete ordinates calculations*  
Oak Ridge National Laboratory, 2001
- /Gal 04/ F.X. Gallmeier, P.D. Ferguson, I.I. Popova, E.B. Iverson  
*The Spallation Neutron Source (SNS) Project:*  
*A Fertile Ground for Radiation Protection and Shielding Challenges*  
ICRS-10, Funchal, Madeira, Portugal, Mai 9-13,2004
- /Gir 04/ B. Giraud  
*Principal concepts of XDAS designs in the 5<sup>th</sup> FP*  
ICRS-10/RPS 2004 Conferences, Madeira 9-14 May, 2004
- /Gol 04/ F. Goldenbaum  
*The physics of spallation processes : theory, experiments and applications*  
ISBN-3-89336-346-7 Wuppertal, Univ., Hab. Schrift,  
Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek , 2004

- /Gud 00/ W. Gudowski  
*Transmutation of Nuclear Waste*  
Nuclear Physics A663&664 (2000) 169c-182c
- /Han 97/ H. Handa et al.  
*Analysis on High-energy Neutron Shielding Experiments in ISIS*  
SARE-3, KEK Proceeding 97-5, Vol. 97-5, 300 (1997)
- /Han 03/ R. Hanslik, M. Butzek, J. Bajus, T. Kulesa  
*Design of the ESS Target Station Shielding*  
ESS-Report, ESS 03-150-T, December 2003
- /Han 03a/ R. Hanslik, M. Butzek, T. Kulesa, A. Müller  
*ESS Neutron Beam Extraction System*  
ESS-Report, ESS 03-151-T, December 2003
- /Hay 99/ K. Hayashi  
*Evaluation Method of Neutron and Photon Skyshine*  
KEK Proceedings 98-16  
JHF-98-7 Tsukuba, Japan February 1999
- /Hei 03/ G. Heidenreich, I Ziegler, E. Schachinger  
*Design of High Power Beam Dumps and Collimators*  
ICANS-XVI International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Düsseldorf-Neuss, Germany, May 12-15, 2003
- /HIN 03/ HINDAS Final Report  
*Experiments and theory between 200 and 2000 MeV*  
European Communities under the Fifth Framework Program, Nov. 2003
- /Hug 97/ H.G. Hughes, K.J. Adams, M.B. Chadwick et.al.  
*MCNPX-The LAHET/MCNP Code Merger*  
LA-UR-97-1638, 1997
- /IAE 88/ International Atomic Energy Agency (IAEA)  
*Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators*  
Technical Reports Series No. 283, Wien 1988
- /ICRP 51/ International Commission on Radiological Protection (ICRP)  
*Data for Use in Protection Against External Radiation*  
ICRP-Publication No. 51 (1987)
- /ICRP 60/ International Commission on Radiological Protection (ICRP)  
*Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*  
ICRP- Publication No. 60. Annals of the ICRP 21 (1-3) Pergamon Press, Oxford 1991

- /Ike 03/ Y. Ikeda  
*1 MW Pulse Spallation Neutron Source (JSNS) under the High Intensity Proton Accelerator Project (J-PARC)*  
ICANS-XVI International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Düsseldorf-Neuss, Germany, May 12-15, 2003
- /Jae 60/ Th. Jaeger  
*Grundzüge der Strahlenschutztechnik*  
Springer Verlag, Berlin 1960
- /Jan 95/ C. Jansen, P.W. Philippen  
*Protonenstrahlfenster und Flüssigmetalltarget für eine beschleunigergetriebene Transmutationsanlage*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich; Jül-3152,  
Jülich, Dezember 1995
- /Joh 99/ K.F. Johnson et al.  
*Commissioning of the Low-energy Demonstration Accelerator (LEDA) Radiofrequency Quadrupole (RFQ)*  
Proceedings of PAC'99, New York (USA)
- /Joh 00/ J. O. Johnson et al.  
*The Spallation Neutron Source (SNS) Target Station Title I Shielding Analyses*  
Target Station Shielding Review Meeting, March 27-28, 2000, Oak Ridge, Tennessee
- /Joh 00a/ J. O. Johnson  
*Accelerator & Target Station Neutronic & Shielding Analysis WBS 1.6.10.2*  
SNS-106100000-DC0001-R00, Juni 2000
- /Kek 05/ Internetseite (23.05.05)  
<http://hadron.kek.jp/~accelerator/TDA/tdr2003/chap8/8.pdf>
- /Kad 00/ Y. Kadi  
*The EA-MC Monte Carlo Code Package*  
5<sup>th</sup> Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE 5), Paris 17-18 July 2000
- /Kad 05/ Y. Kadi, A.H. Herrera-Martinez  
*Energy Amplifier Systems: Simulation and Experiments in the Field*  
Accelerator Applications 2005 AccApp 05  
Venice, Italy 29 August-1 September 2005
- /Kip 98/ R. Kippenhahn  
*Atom – Forschung zwischen Faszination und Schrecken*  
Pipper Verlag GmbH, München, Februar 1998

- /Kla 00/ R. Klapisch  
*Accelerator driven systems: an application of proton accelerators to nuclear power industry*  
Europhysics News, Vol 31 No.6 (2000)
- /Kne 99/ J.U. Knebel, et al.  
*The FZK Three-Beam concept for an Accelerator-Driven System (ADS)*  
Forschungszentrum Karlsruhe-Technik und Umwelt (IATF)  
Jahrestagung Kerntechnik 1999
- /Kne 01/ J.U. Knebel, G. Heusener  
*Untersuchungen zur Transmutation und zu Beschleuniger getriebenen Systemen (ADS) im Forschungszentrum Karlsruhe*  
Radioaktivität und Kernenergie  
Forschungszentrum Karlsruhe, Mai 2001  
ISBN 3-923704-26-7
- /Koe 04/ W. Koelzer  
*Grundlagen über Atomaufbau, Radioaktivität, Strahlenarten, Dosis, Abschirmung*  
Informationskreis Kern-Energie  
Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin, Januar 2004
- /Kon 02/ Ch. Konno  
*Skyshine and other Dose Evaluation*  
JSNS Technical Advisory Committee JAERI Japan, October 20-30, 2002
- /Kop 02/ I. Koprivnikar, E. Schachinger  
*The Biological Shield of a High Intensity Spallation Source: A Monte Carlo Design Study*  
Sixth Workshop on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, (SATIF-6) April 10-12, 2002
- /Kot 05/ H. Kothen, Fa. Röhr+Stolberg GmbH, Krefeld (März 2005)
- /Kri 98/ H. Krieger  
*Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz*  
Band 1 Grundlagen  
B.G. Teubner Stuttgart 1998
- /Kri 05/ V. Krieg, Fa. Siempelkamp GmbH, Krefeld (März 2005)
- /Kur 02/ Y. Kurata et al.  
*The accelerator driven strategy in Japan*  
Journal of Nuclear Materials 301 (2002) 1-7

- /Lam 88/ C.M. Lamply, M.C. Andrews, M.B. Wells  
*The Skyshine-III Procedure: Calculation of the Effects of Structure Design on Neutron, Primary Gamma-Ray and Secondary Gamma-Ray dose Rates in Air*  
RRA T8209A, (RSIC Code Collection CCC-289), Radiation Research Associates, Fort Worth, Texas (1988)
- /Len 04/ B. Lensing  
*Untersuchung sicherheitstechnisch relevanter nuklearer Parameter einer hochintensiven Spallationsneutronenquelle im MW Bereich am Beispiel des Referenzentwurfes der Europäischen Spallationsneutronenquelle (ESS)*  
Bergische Universität Wuppertal - Dissertation, 2004
- /Lew 93/ E.E. Lewis, W.F. Miller, Jr.  
*Computational Methods of Neutron Transport*  
ISBN-0-89448-452-4, ANS Illinois, 1993
- /Lil 90/ R. A. Lillie  
*DTD: A Coupling Code for Two-Dimensional R-Z Cylindrical Geometries*  
Trans. Am. Nucl. Soc. 61, 381, 1990
- /Lin 61/ S.J. Lindenbaum  
*Shielding of high-energy accelerators*  
Ann. Rev. Nucl. Sci. 11, 213, 1961
- /Lüd 03/ M. Lüdeke, M. Butzek, R.Hanslik et.al.  
*Handling of Components of the ESS Target Station*  
ICANS-XVI International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Düsseldorf-Neuss, Germany, May 12-15, 2003
- /Mac 88/ R. J. Macek  
*The Proton Storage Ring: problems and solutions*  
ICANS-X International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
Los Alamos National Laboratory and Argonne National Laboratory,  
USA, Oct. 3-7, 1988
- /Mae 02/ F. Maekawa, et al.  
*Evaluation of Nuclear Heating, DPA and Induced Radioactivity in Main Components*  
JSNS Technical Advisory Committee JAERI Japan, October 20-30, 2002
- /Mae 02a/ F. Maekawa, M Tamura, M. Kawai  
*Shielding Calculation for the Target Station Design*  
JSNS Technical Advisory Committee JAERI Japan, October 20-30, 2002

- /Maa 05/ K. Maas - Produktmanager  
*Angebot Nr. 510578-Bayerische Metallwerke GmbH, Juni 2005*
- /McN 01/ T. McManamy  
*Target Systems Design Status*  
Experimental Facilities Advisory Committee  
Oak Ridge, 26-28 March, 2001
- /McN 01a/ T. McManamy  
*Target Systems Installation Sequence*  
Experimental Facilities Advisory Committee  
Oak Ridge, 26-28 March, 2001
- /Mok 95/ Mokhov, N. V.  
*The MARS code system user's guide*  
Fermilab-FN-628, Fermi National Accelerator Laboratory (1995)
- /Mol 91/ J. Mol  
*Die Bereitstellung computerunterstützter Methoden zur Analyse der Strahlungssituation an Teilchenbeschleunigern und deren exemplarische Anwendung auf das Cooler-Synchrotron COSY*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich; 2435  
ISSN 0366-0885, Institut für Kernphysik  
D 468 (Diss. BUGH Wuppertal) Januar 1991
- /Moo 02/ R. Moormann, et al.  
*ESS safety items and shielding philosophy*  
2nd ESS TAC meeting Paris 03-05.11.2002
- /Moo 04/ R. Moormann, S. Reiche-Begemann et al.  
*Safety and Licensing of the European Spallation Source (ESS)*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich; 4136  
ISSN 0944-2952, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik  
Juni 2004
- /Moy 61/ B. J. Moyer  
*Evaluation of Shielding Requirements for the Bevatron*  
Report UCRL-9769, June 1961
- /Moy 62/ B. J. Moyer  
*Method of calculation of the shielding enclosure for the Berkeley Bevatron*  
Proc. 1st int. conf. Shielding around high energy accelerators,  
Presses Universitaires de France, Paris 1962
- /Nak 81/ T. Nakamura, T. Kosako  
*A systematic study on neutron sky shine from nuclear facilities, Part I: Monte Carlo analysis of neutron propagation in air-over-ground environment from a monoenergetic source.*  
Nucl. Sci. and Eng. 77 (1981) 168-181.

- /Nak 02/ T. Nakashima, et al.  
*Current Status of the AGS Spallation Target Experiment*  
Proc. of the 6<sup>th</sup> Meeting of the Task Force “Shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities (SATIF-6), Stanford, USA 10-12 April, 2002
- /Nak 03/ N. Nakao et al.  
*MARS14 Collimation and Shielding Studies for the 3 GeV Ring of J-PARC Project*  
KEK, Tsukuba 2003
- /Nak 03a/ T. Nakamura, T. Nunomiya, H. Yashima, S. Yonai  
*Overview of recent experimental works on high energy neutron shielding.*  
Cyclotron and Radioisotope Centre, Tohoku University, Japan, May, 2003
- /Nak 04/ T. Nakashima, et al.  
*Radiation Safety Design for the J-PARC Project -High Intensity Proton Accelerator Project*  
ICRS10 May 9-14, 2004
- /NEA 02/ NEA (Hrsg.)  
*Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors(FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study*  
NEA Report No. 3109, 2002
- /Nii 01/ K. Niita, et al.  
*High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM*  
JAERI-Data/Code 2001-007 (2001)
- /Nel 68/ W.R. Nelson  
*The Shielding of Muons around High Energy Electron Accelerators: Theory and Measurement.*  
Nuclear Instruments and Methods 66 (1968) 293
- /Nun 02/ T. Nunomiya et al.  
*Deep-Penetration calculation with an 800 MeV proton beam compared with the shielding experiment at ISIS*  
Proceedings of the Sixth Meeting of the Task Force on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities  
SLAC Menlo Park CA USA, April 2002
- /Nün 01/ K. Nünighoff  
*Experimente und Theorien zur Neutronenproduktion in Schwermetall-targets : Anwendbarkeit von Monte-Carlo Simulationsverfahren zur sicherheitstechnischen Auslegung der Europäischen Spallationsneutronenquelle ESS*  
JUEL-3916 , Wuppertal, Univ., Diss.,  
Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek , 2001

- /Nün 04/ K. Nünighoff et al.  
*Estimation of the Shielding requirements for the Neutron Beam Line of the NSE Instrument at SNS and a First Engineering Design*  
Jülich, 16<sup>th</sup> August 2004
- /Oda 98/ N. Odano, J. O. Johnson, et al.  
*Shielding and activation analyses in support of the spallation neutron source (SNS) ES&H requirements*  
ANS Radiation Protection and Shielding Division Topical Meeting  
Nashville, Tennessee, April 19-23, 1998
- /Ouc 04/ N. Ouchi  
*Linac – Status of building and installation schedule*  
JAERI, 2004
- /Pat 73/ H. W. Patterson, R. H. Thomas  
*Accelerator Health Physics*  
ISBN 0-12-547150-5  
Academic Press New York and London, 1973
- /Pio 01/ M. Piontek  
*Actinidenumwandlung in thermischen unterkritischen Systemen*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich;3886  
ISSN 0944-2952, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik  
D82 (Diss. RWTH, Aachen, 2001)
- /Pop 04/ I. Popova  
*MCNPX vs. DORT in SNS Shielding Design Studies*  
10<sup>th</sup> International Conference on Radiation Shielding ICRS 10  
Madeira Portugal 09-14 May 2004
- /Pra 89/ R. Prael, H. Lichtenstein  
*User Guide to LCS: The LAHET Code System*  
LA-UR-89-3014, LANL 1989
- /Qua 95/ U. Quade, S. Kaden  
*Recycling radioaktiver Reststoffe durch Schmelzen*  
Atw 40 Jg.  
Heft 4-April 1995
- /Qua 02/ U. Quade, V. Krieg, Siempelkamp-Nukleartechnik GmbH  
*ESS Target shielding*  
ESS Report-Workpackage 3.1-3.4
- /Rin 75/ A. Rindi, R.H. Thomas  
Particle Accelerators 7, 23 (1975)
- /Rad 04/ F. Radermacher CERN&RWTH  
*Ein Beschleuniger-betriebenes System für Kernreaktoren und zur Zerstörung von nuklearem Abfall,*  
AKE Seminar Bad Honnef 21/22 Oktober 2004

- /Rho 78/ W.A. Rhoades et al.  
*DOT-IV, Two-Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport System*,  
Oak Ridge National Laboratory,  
Oak Ridge, Report, ORNL/TM-6529 (1978)
- /Rho 88/ W.A. Rhoades and R.L. Childs  
*The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code*  
Nucl. Sci.&Engr. 99,1 pp. 88-89 (1988)
- /Rho 97/ W.A. Rhoades and D.B. Simpson  
*The TORT Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code (Tort Version 3)*  
Oak Ridge National Laboratory,  
Oak Ridge, TN, ORNL/TM-13221 (October 1997)
- /RSI 98/ RSICC-Radiation Safety Information Computational Center  
Computer Code Collection  
*DOORS3.2: One, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code System*  
Oak Ridge National Laboratory,  
Oak Ridge, TN, CCC-650 (July 1998)
- /Rou 69/ J.T. Routti, J. Tapio  
*High Energy Neutron Spectroscopy with Activation Detectors*  
Report UCRL-18514 (1969)
- /Rub 93/ C. Rubbia et al.  
*An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator*  
CERN Report: CERN/AT/93-47(ET), 1993
- /Rub 94/ C. Rubbia  
*A High Gain Energy Amplifier Operated with Fast Neutrons*  
Proceedings of the International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Las Vegas, USA, 1994
- /Rub 95/ C. Rubbia et al.  
*Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier*  
CERN Report: CERN/AT/95-44(ET), September 1995
- /Rub 95a/ C. Rubbia et al.  
*A realistic Plutonium elimination Scheme with Fast Energy Amplifiers and Thorium-Plutonium Fuel*  
CERN Report: CERN/AT/95-53(ET), December 1995
- /Rus 90/ Gary J. Russel  
*Spallation Physics – An Overview*  
ICANS-XI International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
KEK, Tsukuba, 22-26 October, 1990

- /San 00/ R.T. Santoro et al.  
*Spallation Neutron Source Radiation Shielding Issues*  
Oak Ridge, TN 37832-6363-423-574-6084, 2000
- /Sau 76/ P. F. Sauermann  
*Strahlenschutz durch Abschirmung*  
*Tabellen zur Berechnung der Abschirmung von Gamma-Strahlung*  
Kernforschungsanlage Jülich GmbH  
ISBN 3-521-06102-7, Verlag Karl Thiemig München 1976
- /Sau 85/ P. F. Sauermann  
*Abschirmungspraxis*  
*Aus 25 Jahren Erfahrung (1960 – 1985)*  
Kernforschungsanlage Jülich GmbH  
Institut für Chemie – Strahlenschutz August 1985
- /Saut 83/ E. Sauter  
*Grundlagen des Strahlenschutzes*  
*Thiemig-Taschenbücher Band 95/96*  
Karl Thiemig AG Verlag, München 1983
- /Sch 96/ H. Schaal, D. Filges, R.D. Neef, J. Wimmer  
*Shielding Calculations for ESS using the CASL Computer Codes*  
ESS-Report, ESS 96-43-T, July 96
- /Sch 90/ H. Schopper (Hrsg.), A. Fasso; K. Goebel. M Höfert  
*Landolt-Börnstein numerical data and functional relationships in science and technology, new series; Group I: nuclear and particle physics*  
*Volume II: Shielding against high energy radiation*  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1990
- /Sch 05/ H. G. Schumacher, Schumacher Kies GmbH Tönisvorst (März 2005)
- /SIN 97/ SINQ - Institut PSI  
*Sicherheitsbericht zur Spallations-Neutronenquelle SINQ am Paul Scherrer Institut (PSI)*  
Villingen, 15. Mai 1997 (1. Revision)
- /SNS 00/ SNS Design Criteria Documents  
*1.6.5 – Target Station Shielding*  
SNS:106050000-DC-0001-R00, April, 2000
- /SNS 05/ Internetseite:  
<http://www.sns.gov/>  
Photo Gallery, Aug. 2005
- /SSV 01/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen  
(Strahlenschutzverordnung-StrlSchV)  
Bundesgesetzblatt, Bonn, 26. Juli 2001

- /Sta 93/ H. P. Stammen  
*Diskussion von Konversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition durch Neutronen, Protonen, Pionen und Gammateilchen bis 100 GeV*  
Studienarbeit BUGH Wuppertal, 1993
- /Sta 94/ H. P. Stammen  
*Abschirmuntersuchungen zur Targetstation einer Spallationsneutronenquelle mit Protonenenergien zwischen 800 MeV und 3000 MeV im Rahmen der Entwicklung der „Europäischen-Spallationsneutronenquelle (ESS)“*  
Fachgebiet Reaktorsicherheit/Sicherheit kerntechnischer Anlagen  
Diplomarbeit BUGH Wuppertal, 1994
- /Ste 84/ G. R. Stevenson, R.H. Thomas  
*A simple procedure for the estimation of neutron skyshine from proton accelerators*  
Health Phys. 46 (1984) 115-122
- /Sul 84/ A.H. Sullivan et al.  
*Decommissioning of a Tunnel used as shield for a high-energy proton beam*  
CERN TIS-RP/124/CF, Genf, 1984
- /Suz 92/ T. Suzuki, A. Hasegawa, S. I. Tanaka and H. Nakashima  
*Development of BERMUDA: A Radiation Transport Code System Part I. Neutron Transport Codes*  
JAERI 1327 (May 1992).
- /Tak 81/ K. Takeuchi, S. Tanaka, M. Kinno  
*Transport calculation of gamma rays including Bremsstrahlung by the discrete ordinate code PALLAS*  
Nucl. Sci. & Eng., 78 273 (1981)
- /Tak 02/ H. Takada et. al.  
*Target Station Structure*  
Neutron-source Technical Advisory Committee  
Center for Proton Accelerator Facility Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), October 28-30, 2002
- /Tal 01/ P. Talerico  
*The conventional Facilities Requirements for the SNS Linac*  
Proceeding of the Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001
- /Tan 04/ Shun-ichi Tanaka  
*High Intensity Proton Accelerator Project in Japan (J-PARC)*  
Neutron-source Technical Advisory Committee  
Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)  
ICRS10 Mai 9-14, 2004 2002

- /Tes 85/ K. Tesch  
*A Simple Estimation of the Lateral Shielding for Proton Accelerators in the Energy Range 50 to 1000 MeV*  
Oxford Journals, Radiation Protection Dosimetry 11: Pp. 165-172  
(1985)
- /Tho 68/ R. H. Thomas  
*The Proton Synchrotron as a Source of Radiation*  
Engineering Compendium on Shielding Vol. 1  
Springer-Verlag, Berlin, 1968
- /Ung 04/ H.-M. Unger  
*Wärmetechnische Untersuchung eines Transmutationssystems mit flüssigem Brennstoff.*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich;Jül-4133  
ISSN 0944-2952, Institut für Kernphysik,  
D468 (Diss. BUGH Wuppertal)
- /Uni 05/ Internetseite (26.07.2005)  
<http://www.uniterra.de/rutherford/ele005.htm>
- /Vol 04/ M. Volkmer  
*Radioaktivität und Strahlenschutz*  
Informationskreis Kern-Energie  
Robert-Koch-Platz4, 10115 Berlin, Januar 2004
- /Voo 70/ M.H. van de Voorde  
*Effects of Radiation on Materials and Components*  
CERN 69-12 (Mai 1969) und CERN 70-5 (Febr. 1970)
- /War 73/ W. Ward, Jr. Engle  
*A Users Manual For ANISN,  
A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering*  
ORNL under the SNAP and DASA shielding programs, AEC Contract W-7405 eng 26,Report Nr. K-1693, Updated 1973
- /Wol 96/ B. Wolfertz  
*Entwicklung eines ingenieurmäßigen Simulationssystems zur Berechnung von Strahlenschutzparametern an Protonenbeschleunigern im Energiebereich bis 3 GeV*  
Berichte des Forschungszentrums Jülich;3197 ISSN 0944-2952, Institut für Kernphysik; D468 (Diss. BUGH Wuppertal), 1996
- /Yar 79/ Y. Yariv and Z. Fraenkel  
Phys. Rev. C20, p.2227 (1979)
- /Zaz 87/ J.M. Zazula, D. Filges, P. Cloth  
*Sky- and Groundshine Phenomena and Related Radiological Quantities Evaluated for the Environment of High-Current Spallation Facility Particle Accelerators, Vol. 21 (1987)*

# 11 Anhang

Tab. 11.1 Ausgewählte mechanische und thermische Eigenschaften der Stähle nach /Chi 84/

Eigenschaften	Edelstähle			
	Unlegierter Stahl	304 und 304L	316 und 316L	347
Schmelzpunkt (°C)	~1540	1400-1450	1370-1450	1400-1430
Dichte (kg dm <sup>-3</sup> ) (25°C)	7.86	7.9	8.0	8.0
Spez. Wärmekapazität (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) (0-100°C)	0.46	0.50	0.50	0.50
Wärmeleitfähigkeit (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) 25° C 100° C	33-52 /	/ 16	/ 16	/ 16
Längenausdehnungskoeffizient (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ) (20-100°C)	11.7	17	16	17
Elastizitätsmodul (MPa)	2 x 10 <sup>5</sup>			
Streckfestigkeit (MPa)	345	210-240	210-240	240
Zugfestigkeit (MPa)	550-690	550-590	540-590	630
Verlängerung	16-20 %	55 %	55 %	50 %

Tab. 11.2 Ausgewählte mechanische und thermische Eigenschaften von Blei und Uran nach /Chi 84/

Eigenschaften	Blei	Uran
Schmelzpunkt (°C)	327.4	1133
Dichte (kg dm <sup>-3</sup> ) (25°C)	11.34	19.05
Spezifische Wärmekapazität (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) 20-25° C 100°C	0.129 0.132	0,117 -
Wärmeleitfähigkeit (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) 20-25° C 100° C 200° C	35 34 32	24 27 30
Längenausdehnungskoeffizient(10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ) (20-100°C)	29	7-15
Elastizitätsmodul (MPa)	1.4 x 10 <sup>4</sup>	1.7 x 10 <sup>5</sup>
Streckfestigkeit (MPa)	5.5	190
Zugfestigkeit (MPa)	13.1	390
Druckfestigkeit (MPa)	ca. 17	-

Tab. 11.3 Typische Zusammensetzung einigen Betonsorten nachdem Aushärten nach /Chi 84/

Type	Normal- beton	Magnetit- beton <sup>a</sup>	Baryt- beton <sup>b</sup>	Magnetit- beton und Stahl	Limonit- beton und Stahl	Serpentin- beton <sup>d</sup>
Dichte (g cm <sup>-3</sup> )	2,350	3,530	3,350	4,640	4,540	2,100
Element	Partialdichte (g cm <sup>-3</sup> )					
H	0.013	0.011	0.012	0.011	0.031	0.035
O	1.165	1.168	1.043	0.638	0.708	1.126
Si	0.737	0.091	0.035	0.073	0.067	0.460
Ca	0.194	0.251	0.168	0.258	0.261	0.150
C						0.002
Na	0.040					0.009
Mg	0.006	0.033	0.004	0.017	0.007	0.297
Al	0.107	0.083	0.014	0.048	0.029	0.042
S	0.003	0.005	0.361			
K	0.045		0.159		0.004	0.009
Fe	0.029	1.676		3.512	3.421	0.068
Ti		0.192		0.074		
Cr		0.006				0.002
Mn		0.007				
V		0.011		0.003	0.004	
Ba			1.551			

<sup>a</sup> Zusatz von Magnetit (FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

<sup>b</sup> Zusatz von Baryt (BaSO<sub>4</sub> Erz)

<sup>c</sup> Limonit als Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Erz-, plus Stahlzusätze

<sup>d</sup> Serpentin (3MgO·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) als Zusatz; ein hochtemperaturgeeigneter Beton mit minimalem Wasserverlust

Tab. 11.4 Ausgewählte mechanische und thermische Eigenschaften von Graphit nach /Chi 84/

Eigenschaften	Graphit
Dichte (kg dm <sup>-3</sup> )	1,7
Spezifische Wärmekapazität (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0,720
<u>Wärmeleitfähigkeit (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)</u>	
Entlang der Kristallschichten	170
Orthogonal zu den Kristallschichten	130
<u>Längenausdehnungskoeffizient(10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)</u>	
Entlang der Kristallschichten	2
Orthogonal zu den Kristallschichten	4
<u>Elastizitätsmodul (MPa)</u>	
Entlang der Kristallschichten	1,0 x 10 <sup>4</sup>
Orthogonal zu den Kristallschichten	7,7 x 10 <sup>3</sup>
Zugfestigkeit (MPa)	9,7
Druckfestigkeit (MPa)	41

Tab. 11.5 Wichtigste Radionuklide bei der Beschleunigeranlagenaktivierung /Pat 73/

<b>Material</b>	<b>Radionuklid</b>	<b>Halbwertszeit</b>	
Kunststoffe und andere organische Materialien	Be-7	53.6	Tage
	C-11	20.4	Minuten
Aluminium	Alle oben genannten und		
	F-18	110	Minuten
	Na-22	2.60	Jahre
	Na-24	15.0	Stunden
Stahl	Alle oben genannten und		
	K-42	12.47	Stunden
	K-43	22.40	Stunden
	Sc-44	3.92	Stunden
	Sc-44m	2.44	Tage
	Sc-46	84.00	Tage
	V-48	16.00	Tage
	Cr-51	27.8	Tage
	Mn-52	5.55	Tage
	Mn-52m	21.3	Minuten
	Mn-54	300	Tage
	Co-56	77	Tage
	Co-57	270	Tage
	Co-58	72	Tage
	Fe-55	2.94	Jahre
	Fe-59	45.10	Tage
Co-60	5.27	Jahre	
Rostfreier Stahl	Alle oben genannten und		
	Ni-57	37.00	Stunden
	Cu-60	24.00	Minuten
	Ni-65	2.56	Stunden
Kupfer	Cu-61	3.33	Stunden
	Cu-62	9.80	Minuten
	Cu-64	12.82	Stunden
	Zn-63	38.30	Minuten
	Zn-65	245.0	Tage

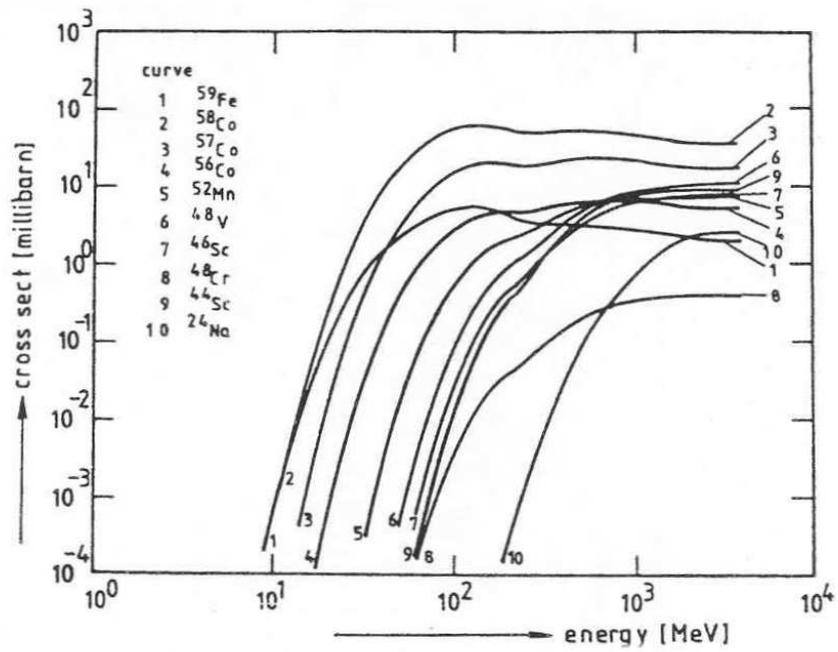


Abb. 11.6: Wirkungsquerschnitte von Hochenergieaktivierungsprodukten in Cu nach /Rou 69/



# Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein erster und besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. D. Filges, der mich zu dieser Arbeit ermuntert und mit zahlreichen Anregungen und wertvollen Ratschlägen unterstützt sowie das Referat übernommen hat. Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. A. Tietze für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Lehder für die Übernahme des Vorsitzes.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Herren PD Dr. rer. nat. F. Goldenbaum, Dr. rer. nat. K. Nünighoff sowie Herren Dr.-Ing. M. Butzek und Dipl. Ing K. Dahlhoff für die freundliche Unterstützung und die vielfältigen Erklärungen bedanken.

Bei Herrn Dr.-Ing. R. Sievering und Herrn Dipl. Ing. G. Hansen und allen meinen Kolleginnen und Kollegen der Zentralabteilung Technologie des Forschungszentrums Jülich bedanke ich mich für ihre Unterstützung und die unzähligen Hinweise und Anregungen.

Ich bedanke mich auch bei Herrn Dipl. Ing. Achim Stumpfe, der sich die Zeit für das Korrekturlesen dieser Arbeit genommen hat und fehlerfreie Redaktion der Arbeit ermöglicht hat.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Anna und meinen Kindern Katharina und Gregor vor allem für ihr Verständnis für meine häufige geistige und physische Abwesenheit im Familienleben. Sie haben mir während meiner Promotionszeit einen starken Rückhalt gegeben und damit zum Abschluss dieser Arbeit maßgeblich beigetragen.

**Forschungszentrum Jülich**  
*in der Helmholtz-Gemeinschaft*



Jül-4225  
August 2006  
ISSN 0944-2952