



Zentralabteilung Technologie

***Sicherheitstechnische Auslegung der
Betriebsumgebung eines Hochleistungs-
Spallationstargetsystems der Megawattklasse
mit Quecksilber als Targetmaterial***

Michael Butzek

***Sicherheitstechnische Auslegung der
Betriebsumgebung eines Hochleistungs-
Spallationstargetsystems der Megawattklasse
mit Quecksilber als Targetmaterial***

Michael Butzek

Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 4175

ISSN 0944-2952

Zentralabteilung Technologie Jül-4175

D 468 (Diss., Wuppertal, Univ., 2004)

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek

D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

☎ 02461 61-5220 · Telefax: 02461 61-6103 · e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de

Inhalt

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der sicherheitstechnischen Auslegung der direkten Betriebsumgebung eines 5 MW-Quecksilber-Spallationstargets unter Berücksichtigung der sicherheitsrelevanten Gesichtspunkte während des Aufbaues, des Betriebs und des später notwendigen Rückbaues sowie des bei einer Anlage dieses Ausmaßes nicht zu unterschätzenden Kostenaspektes. Von einer Spallationsquelle der hier diskutierten Leistungsklasse gehen sowohl vom toxischen und radioaktiven Inventar als auch durch die Art und Intensität der entstehenden Strahlung erhebliche Sicherheitsrisiken sowohl für das Betriebspersonal als auch für die Umgebung der Anlage aus. Aufgrund qualitativer Unterschiede sowohl des Inventars als auch der entstehenden Strahlung kann jedoch bei der Planung einer Spallationsquelle nicht die Sicherheitsphilosophie eines Spaltreaktors unreflektiert übernommen werden. Vielmehr ist eine systematische Untersuchung aller, die Sicherheit beeinflussenden Randbedingungen notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die für diesen Typ der Quelle sicherheitsrelevanten räumlichen Randbedingungen, der Einfluss der verwendeten Medien, die entstehende Strahlung und deren Besonderheiten sowie die grundsätzlichen Randbedingungen aus der Handhabung der Komponenten untersucht. Im Folgenden wird der Grundaufbau der Anlage dargelegt und somit die Grundlage für die Entwicklung aller weiteren Systeme festgelegt. Unter Berücksichtigung des Targetmediums Quecksilber sowie der tritiumhaltigen Wasserkreisläufe in Kombination mit den für die Moderatoren verwendeten brennbaren Medien wurde ein Einschlusskonzept entwickelt, welches einerseits die sichere Durchführung des Strahlbetriebes garantiert andererseits auch die besonderen Belange der Handhabung nicht außer Acht lässt. Für alle sicherheitsrelevanten Komponenten des Einschlusssystems werden Konzepte für eine spätere technische Detailausarbeitung dargelegt.

Für den Aufbau der Abschirmung werden verschiedene in Frage kommende Materialien bezüglich ihrer Eignung diskutiert. Es wird eine Ausarbeitung des Aufbaues der Abschirmung aufgezeigt, die sowohl die sicherheitstechnischen Belange während des Betriebes als auch einen vereinfachten späteren Rückbau berücksichtigt. Die innerhalb der Abschirmungen liegenden Strahlverschlüsse wurden bezüglich der sicheren Handhabung sowie der Positioniergenauigkeit der darin befindlichen Neutronenleiter optimiert. Aufgrund der hohen erwarteten Anzahl sicherheitsrelevanter Handhabungsvorgänge wurden Konzepte zur sicheren und schnellen Handhabung der wichtigsten Komponenten der direkten Targetumgebung erarbeitet. Aufgrund der hier erarbeiteten Konzepte ist sowohl der Bau als auch der Betrieb einer solchen Anlage unter Sicherheits- und Kostengesichtspunkten durchführbar.

Abstract

This thesis is concerning the safety relevant layout of the environment of a mercury based 5-Megawatt-spallation target. All safety relevant aspects related to construction, operation and dismantling as well economical issues were taken into account. Safety concerns are basically driven by the toxic and radioactive inventory as well as the kind and intensity of radiation produced by the spallation process. Due to significant differences in inventory and radiation between a spallation source and a fission reactor, for the design of the spallation source mentioned above the safety philosophy of a fission reactor must not be used unchanged. Rather than this a systematic study of all safety related boundary conditions is necessary.

Within this thesis all safety relevant boundary conditions for this specific type of machine are given. Beside the spatial distribution of different areas inside the target station, influence of medias to be used as well as arising radiation and handling requirements are discussed in detail. A general layout of the target station is presented, serving as a basis for all further component and system development. An enclosure concept for the target station was developed, taking into account the safety relevant issues concerning the mercury used as target materials, the water cooling loops containing massive amounts of tritium as well as the materials used for the moderators potentially forming explosive mixtures. Concept and detailed technical layout of the enclosure system was chosen to guarantee safe operation of the source as well as taking care of requirement arising for handling needs.

For design of the shielding different suitable materials have been discussed. A design for assembling the shielding is shown taking into account the safety relevant requirements during operation as well as during dismantling. The neutron beam shutters, buried inside the shielding were designed to optimize handling and positioning issued of the inner part of the neutron guide system. Due to the high amount of safety relevant handling procedures, concepts for time efficient and safe handling of the major components have been developed. Based on the concepts shown in this thesis, construction and operation of a high power spallation source of the described kind seem to be feasible considering safety and costs.

Résumé

Cette thèse s'intéresse aux questions de sécurité technique posées par l'implantation directe de 5 MW de Mercure. Tous les aspects de la sécurité pendant la construction, le fonctionnement et plus tard le démantèlement, sans perdre de vue le coût y relatif, sont pris en compte. Partant du type de performance de la source de spallation en discussion ici, il est inventorié un certain nombre de risque considérable vis-à-vis du personnel du site et de son environnement, lesquels risques sont également liés aussi bien à la toxicité et la radioactivité qu'à l'intensité de la radiation correspondante. En raison d'une différence significative de la production et de la radiation considérée entre la source de spallation et le réacteur de fission pour le type de la source de spallation dont nous parlons, l'on peut cependant repenser le problème de sécurité de réaction de fission par une nécessité d'étude systématique de toute la sécurité qui touche les conditions limites.

Dans le cadre de ce travail seront mis au point le problème de sécurité des conditions limites pour ce type de source, la question liée à la radiation correspondante et toute sa spécificité ainsi que celui ayant trait aux conditions limites fondamentales dans la manipulation des composantes. Par la suite seront fixées les éléments clés d'une installation de base et, de ce fait, établir le fondement en vue du développement de tous les systèmes futures. Le concept d'isolement de la station en question se trouve développé en considération du volet sécurité associé à l'utilisation de mercure dans le matériel pour le système de refroidissement d'eau contenant un effectif élevé de tritium aussi bien pour le matériel utilisé que pour le modérateur, avec un danger de mélange explosif. Un concept technique avec un plan détaillé du système d'isolement a été choisi pour garantir le fonctionnement sans danger, tout en notant les exigences qui rappellent des précautions à prendre au cours d'une manipulation.

En ce qui concerne l'édification d'un blindage, une discussion a été menée sur l'aptitude de différents matériels. Un plan visant à assembler un minimum de protection est présenté en tenant compte de la sécurité relative au fonctionnement et de celle qui est nécessaire au démontage. L'accélérateur de neutron caché dans la coque a pour raison d'optimiser la

manipulation et le positionnement des parties internes du système de guide de neutron. En raison de la haute sécurité exigible dans la procédure de manipulation, les concepts qui requièrent un temps performant ainsi qu'une manipulation sans danger des principales composantes ont été développés. En se basant sur le concept présenté dans cette thèse, construire une opération d'une source de spallation de puissance élevée du type présenté est faisable sous un bon rapport sécurité prix.

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG.....	1
2.	NUTZUNG VON NEUTRONEN IN DER WISSENSCHAFT.....	3
2.1.	NEUTRONEN ALS SONDE.....	3
2.2.	NEUTRONENQUELLEN.....	3
2.2.1.	<i>Methoden der Neutronenerzeugung.....</i>	<i>3</i>
2.2.2.	<i>Die Europäische Spallationsneutronenquelle (ESS).....</i>	<i>5</i>
3.	SICHERHEIT UND ZUVERLÄSSIGKEIT.....	7
3.1.	SICHERHEIT.....	7
3.2.	AUSLEGUNGSSTÖRFÄLLE.....	10
3.3.	VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT VON KOMPONENTEN UND SYSTEMEN.....	12
3.4.	ANLAGENZUVERLÄSSIGKEIT UND VERFÜGBARKEIT.....	15
4.	ANFORDERUNGEN AN DIE BETRIEBSUMGEBUNG.....	17
4.1.	ANFORDERUNGEN AN DIE ZUGÄNGLICHKEIT EINZELNER BEREICHE.....	17
4.2.	VERWENDETE MEDIEN.....	20
4.2.1.	<i>Quecksilber als Targetmaterial.....</i>	<i>20</i>
4.2.2.	<i>Wasser als Kühlmedium.....</i>	<i>23</i>
4.2.3.	<i>Schutzgassysteme.....</i>	<i>26</i>
4.2.4.	<i>H₂ und CH₄ als Moderatormaterial.....</i>	<i>27</i>
4.3.	EINFLUSS DER ENTSTEHENDEN TEILCHENSTRAHLUNG.....	30
4.3.1.	<i>Strahlung und Strahlenschutz.....</i>	<i>30</i>
4.3.2.	<i>Abschirmung hochenergetischer Neutronen.....</i>	<i>34</i>
4.3.3.	<i>Aktivierung, Strahlenschädigung und Wärmedeposition.....</i>	<i>37</i>
4.3.4.	<i>Neutronenstrahlauskopplung.....</i>	<i>43</i>
4.4.	HANDHABUNG AKTIVierter KOMPONENTEN.....	45
5.	KONZEPTIONELLE UND TECHNISCHE UMSETZUNG.....	49
5.1.	GRUNDKONZEPT UND AUFBAU DER TARGETSTATION.....	49
5.1.1.	<i>Genereller Aufbau der Targetstation.....</i>	<i>50</i>
5.1.2.	<i>Anordnung der Strahlrohre.....</i>	<i>52</i>
5.1.3.	<i>Targetsysteem.....</i>	<i>55</i>
5.1.4.	<i>Aufbau der Protonenstrahlführung.....</i>	<i>60</i>
5.1.5.	<i>Rohrleitungsführung aktivierter Kühlwasserkreisläufe.....</i>	<i>60</i>
5.2.	EINSCHLUSSSYSTEME.....	62
5.2.1.	<i>Randbedingungen.....</i>	<i>62</i>
5.2.2.	<i>Entwicklung des übergeordneten Einschlusskonzeptes.....</i>	<i>67</i>
5.2.3.	<i>Gassysteme.....</i>	<i>73</i>
5.2.4.	<i>Linersystem.....</i>	<i>75</i>
5.2.5.	<i>Top-Platte.....</i>	<i>76</i>
5.2.6.	<i>Strahlrohrdurchführung.....</i>	<i>78</i>
5.2.7.	<i>Protonenstrahlfenster.....</i>	<i>79</i>
5.2.8.	<i>Dichtung Targetwagen-Liner.....</i>	<i>84</i>
5.3.	ABSCHIRMUNG.....	85

5.3.1.	<i>Rechnerische Auslegung</i>	<i>85</i>
5.3.2.	<i>Genereller Aufbau der Abschirmung</i>	<i>91</i>
5.3.3.	<i>Äußere Targetabschirmung.....</i>	<i>96</i>
5.3.4.	<i>Innere Targetblockabschirmung</i>	<i>97</i>
5.3.5.	<i>Abschirmung der Protonenstrahlführung</i>	<i>100</i>
5.4.	STRAHLVERSCHLÜSSE UND NEUTRONENSTRAHLROHRE.....	104
5.4.1.	<i>Wahl der Art der Strahlverschlüsse</i>	<i>104</i>
5.4.2.	<i>Ausführung des Strahlverschlusses</i>	<i>106</i>
5.4.3.	<i>Positionierung der Neutronenstrahlrohreinsätze.....</i>	<i>109</i>
5.5.	HANDHABUNG AKTIVierter KOMPONENTEN.....	112
5.5.1.	<i>Handhabungskonzept.....</i>	<i>112</i>
5.5.2.	<i>Target.....</i>	<i>116</i>
5.5.3.	<i>Reflektor.....</i>	<i>123</i>
5.5.4.	<i>Strahlverschlüsse und innere Strahlrohreinsätze.....</i>	<i>127</i>
5.5.5.	<i>Protonenstrahlfenster.....</i>	<i>130</i>
6.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	133
7.	LITERATURVERZEICHNIS	135
8.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	140
9.	TABELLENVERZEICHNIS	144

1. Einleitung

Zur Zeit wird in den drei großen Wirtschaftsräumen dieser Welt an der Realisierung von Spallationsneutronenquelle der Megawatt-Klasse gearbeitet. Während sich in Japan und den USA Quellen der 1 Megawatt-Leistungsklasse bereits im Bau befinden, wird in Europa an einer technischen Studie für eine 10 MW-Anlage mit zwei Targets zu je 5 MW Protonenstrahlleistung gearbeitet. Im Rahmen dieser Arbeit werden die sicherheitsrelevanten, ingenieurtechnischen Konzepte für die direkte Betriebsumgebung der beiden Targets der europäischen Spallationsneutronenquelle (ESS) erarbeitet. Obwohl der Aufbau und Betrieb einer solchen Anlage auch unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten interessant erscheint, ist der Hauptzweck die Erzeugung und Bereitstellung von Neutronen für die Nutzer. Somit muss bei einer ingenieurtechnischen Auslegung neben der Sicherheit auch die Zuverlässigkeit und somit letztlich die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden. Neben einer inhärenten Sicherheit, die, wo immer möglich, „in die Anlage hinein konstruiert“ werden sollte, sind zum Betrieb auch aktive Überwachungs- und Sicherheitssysteme notwendig. Sicherheitssoftware, Betriebssteuerung oder andere aktive Sicherheitssysteme sollen im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt bleiben.

Neutronen werden schon seit den frühen 50er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts für die Erforschung von Materie eingesetzt. Sie gestatten einen Einblick in den Aufbau und das Verhalten von Atomen und Molekülen. Haben sich die Arbeiten in den Anfängen auf die Untersuchung des Aufbaus kondensierter Materie aus den klassischen Bereichen der Festkörperphysik beschränkt, so erschließen sich mit zunehmender Intensität der verwendeten Neutronenquellen auch die weiteren Felder der Chemie, Biologie und der Ingenieurwissenschaften. Die überwiegende Anzahl der Neutronenquellen bis zum heutigen Tage sind Spaltreaktoren, die sich das Prinzip der Kernspaltung zu Nutze machen. Die erreichbare Neutronenausbeute der Reaktoren ist jedoch technisch begrenzt durch die bei der Kernspaltung auftretende Wärmeerzeugung und damit durch die Kühlbarkeit der Brennelemente. Aus diesem Grunde sind die stärksten, z.Z. verfügbaren reaktor-basierten Neutronenquellen dieser Welt in ihrer Neutronenflussintensität nicht weiter steigerbar.

Nahezu alle heutzutage verwendeten Messmethoden benötigen zeitlich gepulste Neutronenstrahlen. Die in den kontinuierlich arbeitenden Kernreaktoren erzeugten Neutronenstrahlen müssen somit künstlich mittels sog. "Chopper" in kurze Pulse zerhackt werden, wobei über 99 % der erzeugten Neutronen verloren gehen. Hinzu kommt, dass in einigen Ländern Europas, so auch in Deutschland, Kernreaktoren politisch nicht länger erwünscht sind. Der Ausweg aus diesem Dilemma ist eine gänzlich andere Art der Neutronenerzeugung – die Spallation. Hierzu werden Protonen mittels Magnetfeldern beschleunigt und mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf einen Zielkörper (im folgenden Target genannt) geschossen. Die bei diesem Vorgang entstehende Strahlung kann entsprechend dem einfallenden Protonenstrahl sowohl kontinuierlich als auch gepulst erzeugt werden. Art und Energieniveau der erzeugten Strahlung sowie die verwendeten Materialien unterscheiden sich zum Teil erheblich von denen eines Kernreaktors. Um die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit beim Betrieb einer solchen Anlage zu gewährleisten, ist daher eine ingenieurtechnische Auslegung, insbesondere der direkten Betriebsumgebung gefordert.

Diese Arbeit zielt auf die Erarbeitung von neuen sicherheitstechnischen Konzepten in den Bereichen, in denen aufgrund der geforderten Leistungsdaten der Anlage weder der heute übliche Stand der Technik zum Einsatz kommen kann, noch eine einfache Skalierung von bekannten Konzepten laufender Anlagen zulässig erscheint. Insbesondere durch die Art und

Menge der verwendeten Medien sowie durch das, aufgrund der hohen Strahlleistung nicht unerhebliche radioaktive Inventar sind die Sicherheitskonzepte bisher realisierter Spallationsquellen nur begrenzt übertragbar. Eine konstruktive Detailausarbeitung im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf die Verifikation der Umsetzbarkeit der jeweils gewählten Sicherheitskonzepte. Der Aufwand für eine detaillierte konstruktive Ausarbeitung aller zum Aufbau der Targetstation erforderlichen Komponenten und Systeme würde nach jetzigem Kenntnisstand etwa 300 Personenjahre in Anspruch nehmen und übersteigt den Umfang dieser Arbeit bei Weitem.

2. Nutzung von Neutronen in der Wissenschaft

2.1. Neutronen als Sonde

Neutronen eignen sich zur Erforschung atomarer und molekularer Strukturen sowie deren Bewegungen. Mit Hilfe elektromagnetischer Wellen, wie zum Beispiel Röntgenstrahlung, Synchrotronstrahlung oder Licht, lässt sich entweder eine gute Ortsauflösung oder eine gute Zeitauflösung der zu beobachtenden Proben erzielen. Neutronen kombinieren diese Möglichkeiten und erlauben so, Bewegungen auf molekularer und atomarer Ebene sichtbar zu machen. Darüber hinaus gestattet das Neutron aufgrund seiner Eigenschaften auch magnetische Strukturen zu untersuchen. Da das Neutron ein elektrisch neutrales Teilchen ist, dringt es tief in die zu untersuchende Materie ein. Dadurch eignet es sich besonders gut für Forschungen im Bereich der Materialwissenschaften. Mit zunehmender Intensität der Neutronenquellen erschließen sich immer weitere Felder der Ingenieurwissenschaften, der physikalischen Chemie, über die Polymerphysik bis hin zur strukturellen Biologie. Abbildung 2.1-1 zeigt den Anteil der Nutzung von Neutronen, aufgeteilt auf die verschiedenen Wissenschaftsgebiete (Stand: 1997).

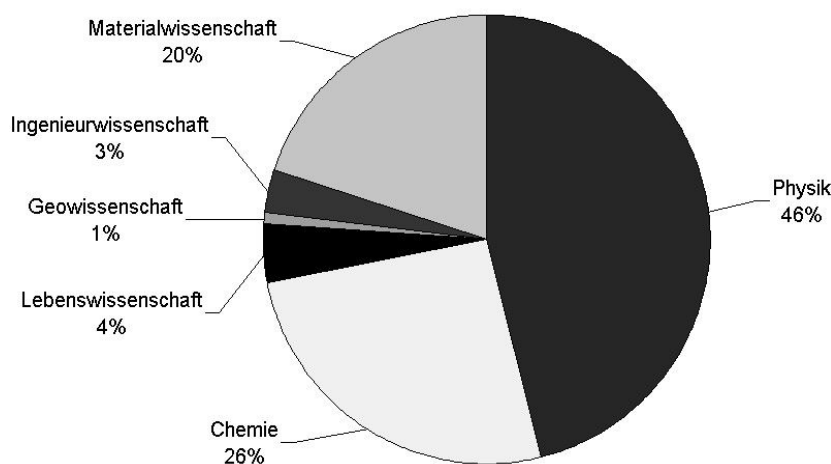


Abb. 2.1-1: Anteil der Nutzung von Neutronen, aufgeteilt auf die verschiedenen Wissenschaftsgebiete /ESI 97/

2.2. Neutronenquellen

2.2.1. Methoden der Neutronenerzeugung

Zur Erzeugung von Neutronen kommen verschiedene Verfahren in Betracht. Neben den für großtechnische Anlagen weniger bedeutenden Verfahren, wie Deuterium-Tritium-Generatoren und das Deuterium Stripping an flüssigem Lithium, stehen als wichtigste Prozesse die Spaltung und die Spallation zur Verfügung. Bei der Spaltung werden pro gespaltenem Kern ca. 2 - 3 Neutronen frei, von denen mindestens eines zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benötigt wird. Die überschüssigen Neutronen können dem Prozess zu Forschungszwecken entnommen werden.

Bei der Spallation werden in einem Beschleuniger Protonen hoher Energien erzeugt und auf ein Schwermetalltarget geschossen. Trifft ein Proton auf einen Atomkern des Targetmaterials, so werden in einer intranuklearen Kaskade hauptsächlich Neutronen, Protonen und Pionen freigesetzt. Während diese Teilchen aufgrund ihrer hohen Energie ihrerseits in einer nuklearen Kaskade Reaktionen an weiteren Kernen des Targetmaterials auslösen können, bleibt der Restkern energetisch hoch angeregt zurück. In der Folge dampft er weitere Nukleonen und schwere Kernfragmente ab, wobei es sich in der Mehrzahl um Neutronen handelt. Je nach Art des Targetmaterials und Energie der auftreffenden Protonen werden so zwischen 20 und 40 Neutronen pro Primärproton frei. Im Gegensatz zu einer Spaltreaktion lässt sich der Spallationsprozess und somit die Produktion von Neutronen jederzeit durch Abschalten des Protonenstrahles beenden. Ein Kritikalitätsproblem, wie bei Spaltreaktoren, existiert bei Spallationsquellen nicht.

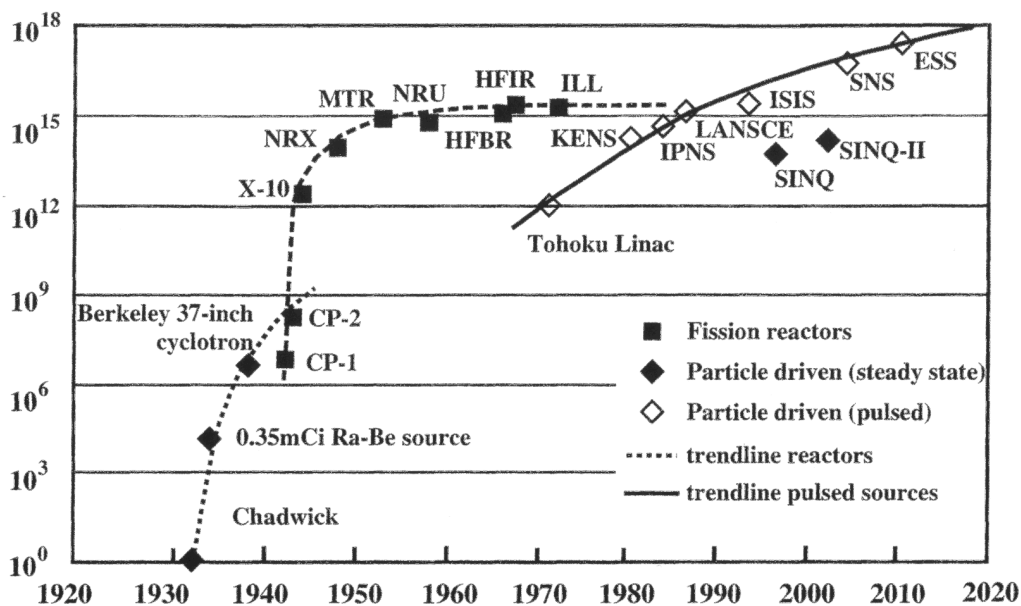


Abb. 2.2-1: Entwicklung der Neutronenquellen seit der Entdeckung des Neutrons /ORNL 97/
(Einheit der Ordinate: Neutronen / cm² s)

Die Geschichte der Neutronennutzung (Abb. 2.2-1) geht bis auf die Entdeckung des Neutrons durch Chadwick Anfang der 30er Jahre zurück. Mit der Einführung der Spaltreaktoren begann die systematische Nutzung von Neutronen in der Forschung. Der Anfang der 70er Jahren in Betrieb gegangene Hochflussreaktor ILL in Grenoble stellt bis heute mit einem Spitzenfluss von 10^{15} Neutronen pro cm² und Sekunde aber gleichzeitig einen Endpunkt dieser Entwicklung dar. Technisch werden höhere Spitzenflüsse und damit höhere Leistungsdichten im Reaktorkern durch die Grenzen der Kühlbarkeit der Brennelemente limitiert.

Seit Anfang der 80er Jahre werden deshalb zunehmend Spallationquellen als Alternative geplant, betrieben und untersucht. In den zur Zeit leistungsstärksten Spallationsquellen ISIS (160 kW Strahlleistung) /GRA 86/ und SINO (1 MW Strahlleistung) /BAU 98a/ werden wassergekühlte Feststofftargets, z.B. aus Tantal oder Wolfram eingesetzt. Sollen höhere Neutronenflüsse und damit verbunden höhere Strahlströme verwendet werden, ist der Übergang zur Flüssigmetallkühlung des Targets notwendig. Alle neuen, projektierten oder im Bau befindlichen Quellen setzen daher Quecksilber als Kühl- und Targetmaterial ein. Die Verwendung von Quecksilber, welches bei dem Spallationsprozess hochgradig aktiviert wird

und zudem bei Raumtemperatur flüssig und damit im Schadensfalle flüchtig ist, setzt neue Maßstäbe für die beim Bau einer solchen Quelle anzuwendende Sicherheitsphilosophie.

2.2.2. Die Europäische Spallationsneutronenquelle (ESS)

In den nächsten 10 bis 20 Jahren ist mit einem Abschalten von Forschungsreaktoren zu rechnen, die das Ende ihrer Betriebsphase erreicht haben. Somit wird weltweit ein Mangel an Neutronenquellen entstehen. Um dem entgegenzuwirken sollen, auf Anraten der OECD, in den drei großen Wirtschaftsräumen USA, Japan und Europa neue Hochleistungs-Spallationsneutronenquellen der Megawatt-Klasse gebaut werden. Während in den USA /DOE 97/ und Japan /IKE 03/ bereits mit dem Bau von Quellen mit jeweils 1 MW Strahlleistung begonnen wurde, wird in Europa an einer Studie zur Errichtung einer Quelle mit 10 MW Strahlleistung, aufgeteilt auf zwei Targets zu je 5 MW, gearbeitet. Die beiden, technisch im Wesentlichen identisch aufgebauten Targetstationen unterscheiden sich lediglich in der Pulsstruktur des Protonenstrahles und somit auch des erzeugten nutzbaren Neutronenflusses. Um neben der Leistungssteigerung durch die höhere Protonenstrahlleistung eine weitere Erhöhung des Spitzenflusses zu erzielen, soll bei dieser Anlage von Anfang an die Möglichkeit der Nutzung von neuartigen Moderatormaterialien, wie z.B. festem Methan mit einbezogen, und bei der (sicherheits-) technischen Auslegung berücksichtigt werden. Abb. 2.2-2 zeigt eine Übersicht über die geplante Anlage. Tabelle 2.2-1 gibt die wichtigsten technisch-physikalischen Parameter wieder.

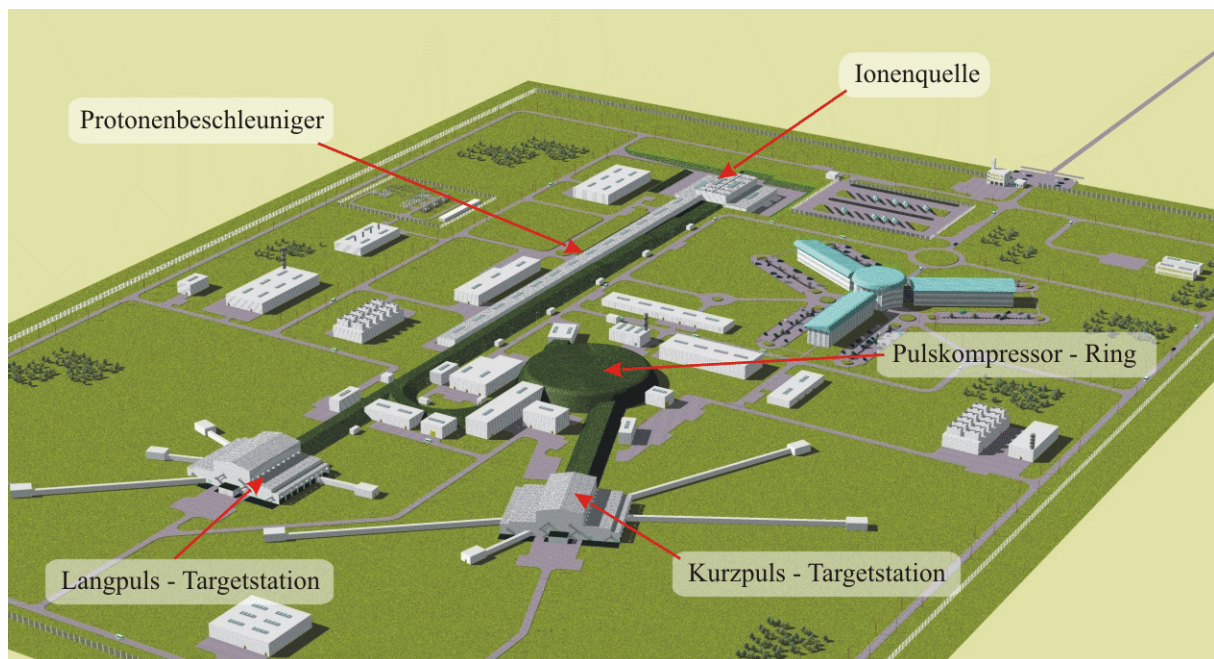


Abb. 2.2-2: Die Spallationsneutronenquelle ESS /ES3 02/

Tabelle 2.2-1: Technisch-physikalische Parameter der Spallationsquelle ESS

Protonenergie	1.334 GeV
Mittlerer Strahlstrom	2 x 3.75 mA
Mittler Strahlleistung (Kurzpuls/Langpuls)	5 MW / 5MW
Querschnitt des Protonenstrahls am Target	Elliptisch 6 x 20 cm ² 2d-parabolische Strahlstromdichtenverteilung
maximale Strahlstromdichte am Target	80 μ A / cm ²
Maximaler Strahlstrom (Kurzpuls/Langpuls)	75 A / 114 mA
Pulsfrequenz (Kurzpuls/Langpuls)	50 Hz / 16 ² / ₃ Hz
Pulsbreite (Kurzpuls/Langpuls)	1,4 μ s / 2 ms
Targetmaterial	Quecksilber; flüssig umgewälzt
Moderatoren (Standard)	H ₂ O bei Raumtemperatur LH ₂ bei 20 K
Moderatoren (Optional)	CH ₄ bei 20 K
Reflektor	Blei in Aluminiumgehäuse, D ₂ O gekühlt
Mittlerer erwarteter Fluss (thermische Neutronen)	3,1 x 10 ¹⁴ Neutronen / (cm ² s)
Maximaler Fluss im Puls (Kurzpulsstation)	1,3 x 10 ¹⁷ Neutronen / (cm ² s)

3. Sicherheit und Zuverlässigkeit

3.1. Sicherheit

Bei jeder technischen Anlage und insbesondere bei Anlagen mit radioaktivem Inventar, wie dies bei einer Spallationsneutronenquelle gegeben ist, stellt sich die Frage nach der Gefahrenabschätzung. Da es in der Technik keine absolute Sicherheit gibt, muss diese Fragestellung differenzierter angegangen werden. Eine Risikoanalyse ist bei einer Anlage dieser Art für ein Genehmigungsverfahren zwingend notwendig. Sie kann nur auf Basis eines technischen Konzeptes der Anlage durchgeführt werden. Daher ist es notwendig, die Anlagensicherheit schon bei der Konzeptfindung mit einzubeziehen.

Wie bei jeder konventionellen Anlage muss auch bei einer Spallationsneutronenquelle, ein möglichst sicherer und zuverlässiger Betrieb jederzeit gewährleistet sein. Beim Spallationsprozess werden durch hochenergetische Protonen und durch schnelle und thermische Neutronen radioaktive Isotope produziert. Neben der Aktivierung von Feststoffen, wie zum Beispiel der Targethülle selbst oder auch von Teilen der Abschirmung, treten auch bei den eingesetzten Fluiden und Gasen Aktivierungen in nicht unerheblichen Umfang auf.

Für den Betrieb von technischen Anlagen, insbesondere wenn von ihnen eine Gefährdung für Betriebspersonal und Umgebung ausgeht, existieren unterschiedliche Regelwerke und Gesetze, welche die Anforderungen an die notwendigen sicherheitstechnischen Einrichtungen definieren. Liegen für einen bestimmten Anlagentyp Regelwerke vor, so sind diese bei Konzeption, Konstruktion und Betrieb der Anlage zwingend anzuwenden. Da mit einer Spallationsquelle der angestrebten Megawattklasse weitgehend sicherheitstechnisches Neuland betreten wird, liegen verständlicherweise keine expliziten Regelwerke für diesen Anlagentyp vor.

Für weite Teile der Spallationsanlage insbesondere für die Beschleunigersysteme wie Linearbeschleuniger, Protonenkompressorring und die den Protonenstrahl leitenden Systeme kommt ohne Zweifel als Regelwerk die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /SSV 01/ in Frage. Durch den gezielten, permanenten Strahlverlust am Quecksilbertarget kommt es hier zu für Beschleunigeranlagen untypisch hohen Aktivierungen. Das radioaktive Gesamtinventar der Anlage liegt aber Größenordnungen unter dem von Kernreaktoren. Durch die Verwendung von nicht spaltbarem Material – hier Quecksilber – werden durch Spallation keine Transurane oder andere, extrem langlebige Radioisotope erzeugt. Eine Kritikalitätsproblematik existiert nicht und eine aktive Notkühlung ist nicht notwendig. Ähnlich wie bei existierenden Hochenergiebeschleunigeranlagen kommt daher nur eine Genehmigung der Anlage nach der Strahlenschutzverordnung in Frage. Die Notwendigkeit der Anwendung des KTA-Regelwerkes schließt sich damit aus.

Trotzdem ist bei Anlagen, bei deren Versagen mit einem Austreten von radioaktiven Substanzen zu rechnen ist, ist ein weit reichendes Sicherheitskonzept notwendig. Für die in der hier vorliegenden Arbeit diskutierte Anlage wird daher ein gestaffeltes Sicherheitskonzept vorgeschlagen (siehe Tab. 3.1-1). Die Einhaltung der Schutzziele und damit die Integrität der Barrieren wird durch ein gestaffeltes Sicherheitskonzept in mehreren Sicherheitsebenen (engl. "defence-in-depth") gewährleistet. Dieses Konzept besteht aus einer ausgewogenen Kombination von Maßnahmen zur Verhinderung von Störungen und Störfällen, Maßnahmen zu deren Beherrschung und schließlich Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von eventuellen Unfällen.

Tabelle 3.1-1: Ebenen eines möglichen, gestaffelten Sicherheitskonzeptes

Sicherheitsebene			Maßnahmen	Ziele
1	Bestimmungsgemäßer Betrieb	Normalbetrieb	Qualität der Betriebssysteme und der betrieblichen Abläufe sowie sicherheitsgerichtetes Handeln	Verhinderung von Betriebsstörungen
2		Anomaler Betrieb	inhärent sicheres Anlagenverhalten, Begrenzungssysteme	Verhinderung von Auslegungsstörfällen
3	Auslegungsstörfälle		inhärent sicheres Anlagenverhalten, passive und aktive Sicherheitseinrichtungen	Beherrschung von Auslegungsstörfällen
4	(Auslegungsüberschreitende) schwere Störfälle		Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes	Begrenzung der Umgebungsauswirkungen

Auf der ersten Ebene - der Betriebsebene - sorgen gute Auslegungs- und Fertigungsqualität sowie Sorgfalt in der Betriebsführung für eine hohe Verfügbarkeit der Anlage; zugleich werden dadurch Störungen vermieden.

Die erste Ebene ist deshalb charakterisiert durch

- ausreichende Sicherheitszuschläge bei der Auslegung der Systeme und Anlagenteile
- sorgfältige Auswahl der Werkstoffe, umfangreiche Werkstoffprüfungen
- umfassende Qualitätssicherung bei Fertigung, Errichtung und Betrieb
- unabhängige Prüfung der erreichten Qualität
- Überwachung der Qualität entsprechend der betrieblichen Belastung durch wiederkehrende Prüfungen
- Instandhaltungsfreundlichkeit der Systeme unter Berücksichtigung möglicher Strahlenexposition des Personals
- sichere Überwachung der Betriebszustände
- Berücksichtigung von Betriebserfahrungen (hier nur sehr begrenzt möglich)
- umfassende Schulung des Betriebspersonals
- Verhinderung von Fehlbedienungen, z.B. durch Verriegelungen

Während es sich bei den letzten Punkten um zum Teil aktive Sicherheitsmaßnahmen handelt, stellen die ersten 4 Punkte passive Sicherheitsmerkmale dar, die bei der Konzeption, der Konstruktion und der Auslegung der Anlage Berücksichtigung finden müssen.

Auf der zweiten Sicherheitsebene werden Betriebsstörungen durch inhärente Sicherheitseigenschaften der Anlage und mit Hilfe von aktiven Systemen so begrenzt, dass die Anlage innerhalb der Auslegungsgrenzen für den bestimmungsgemäßen Betrieb gehalten wird.

Die zweite Ebene ist deshalb charakterisiert durch:

- die Auslegung der Systeme mit dem Ziel, dass auch bei Ausfall von Steuer- oder Regeleinrichtungen stabile Systemzustände erreicht werden, wenn möglich sogar ein Weiterbetrieb gewährleistet ist
- Zustands- und Störungsmeldungen auf der Warte zur Information des Betriebspersonals, um manuelle Gegenmaßnahmen zu ermöglichen
- Regelungs- und Begrenzungseinrichtungen, die die Anlage innerhalb zulässiger Auslegungsgrenzen halten. Durch Strahlschnellabschaltung der Protonenquelle kann so verhindert werden, dass Betriebsstörungen sich zu Störfällen ausweiten

Auf der dritten Sicherheitsebene werden Störfälle durch Sicherheitseinrichtungen so beherrscht, dass die Strahlenbelastung für Bevölkerung und Umgebung unterhalb vorgegebener Werte bleibt. In der hier beschriebenen Anlage ist nur eine Kontrolle der Radioaktivität notwendig. Eine aktive Notkühlung muss nicht vorgehalten werden. Deshalb beschränken sich die Maßnahmen der dritten Ebene hauptsächlich auf Rückhaltesysteme für das radioaktive Inventar.

Die die Auslegung der Sicherheitseinrichtungen bestimmenden Störfälle (Auslegungsstörfälle) werden so definiert, dass sie repräsentativ für eine Gruppe ähnlich verlaufender Ereignisse sind. Im Genehmigungsverfahren muss insbesondere nachgewiesen werden, dass für radiologisch relevante Störfälle die Strahlenbelastung der am stärksten betroffenen Personen, die in § 28 (3) der Strahlenschutzverordnung vorgegeben wurde, nicht überschritten wird.

Die dritte Ebene ist deshalb charakterisiert durch:

- Redundanz; im allgemeinen werden Einzelfehler und Reparaturfall angenommen
- Diversität (unterschiedliche technische Ausführung der redundanten Teilsysteme)
- weitgehende Entmaschung der Stränge
- räumliche Trennung redundanter Stränge
- weitgehende Automatisierung (30-Minuten-Konzept)
- Sicherheitsreserven
- nach Möglichkeit sicherheitsgerichtetes Systemverhalten bei Fehlfunktion ("fail-safe")

Die vierte Sicherheitsebene des gestaffelten Sicherheitskonzeptes erweitert die vorgeschlagene Sicherheitsphilosophie durch Vorkehrungen gegen Ereignisse, die wegen geringer Eintrittswahrscheinlichkeit keine Auslegungsstörfälle sind. In diesem Falle muss mit einer Freisetzung eines großen Teiles des nuklearen Inventars gerechnet werden. Im Gegensatz zum Kernkraftwerk ist jedoch das radioaktive Inventar innerhalb der Targetstation um mehr als 4 Größenordnungen geringer und enthält insbesondere keine Transurane. Im Rahmen dieser Arbeit soll wegen der extrem niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit auf die Betrachtung der vierten Sicherheitsebene verzichtet werden.

3.2. Auslegungsstörfälle

Ein Störfall ist ein nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustand der Anlage, welcher sowohl durch interne (z.B. Komponentenversagen) als auch durch externe (z.B. Erdbeben) Ursachen hervorgerufen werden kann. Aus Erfahrungen anderer Anlagen, insbesondere im kerntechnischen Bereich, aber auch durch Berechnungsverfahren können jedem dieser postulierten Störfälle Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Diese werden als Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses Ereignisses pro Jahr und Anlage angegeben und überstreichen einen weiten Frequenzbereich (f) von mehrmals pro Jahr (z.B. $f = 10 \text{ a}^{-1}$) bis extrem selten (z.B. $f = 10^{-8} \text{ a}^{-1}$). Des weiteren unterscheiden sich Störfälle in der Auswirkung, die sie auf die Anlage selbst bzw. ihr Umfeld haben werden. Man erhält daher ein so genanntes „Störfallspektrum“ an dessen einem Ende sich nahezu folgenlose Störfälle mit hoher Wahrscheinlichkeit und am anderen Ende extrem unwahrscheinliche Störfälle mit gravierenden Folgen finden lassen /MÜN 83/. Grundsätzlich können die Störfälle abhängig von ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in vier Kategorien unterteilt werden:

1. **Zu erwartende Störfälle:** Bei häufig zu erwartenden Störfällen (bis ca. $f \geq 10^{-2} \text{ a}^{-1}$) wird man versuchen, diese in der Auslegung der technischen Systeme der Anlage in soweit zu berücksichtigen, dass ein möglichst störungsfreier, evtl. sogar unterbrechungsfreier Weiterbetrieb der Anlage möglich ist. Ein typisches Beispiel für die technische Umsetzung ist z.B. die redundante Auslegung einer Hauptpumpenanlage. Beim Ausfall einer Pumpe können die weiteren vorhandenen Pumpen diese Aufgabe vollständig übernehmen, so dass ein Weiterbetrieb bis zu nächsten geplanten Wartung evtl. sogar ohne Unterbrechung möglich ist.
2. **Unwahrscheinliche Störfälle:** (typisch $10^{-2} \text{ a}^{-1} \geq f \geq 10^{-4} \text{ a}^{-1}$) Bei selten zu erwartenden Störfällen ist der oben genannte technische Aufwand nicht immer zu rechtfertigen. Ziel der Auslegung ist es daher lediglich, die Auswirkungen des Störfalles soweit zu begrenzen, das ein Folgeschaden für andere Komponenten der Anlage ausgeschlossen wird und sich der eingetretene Schaden mit vertretbarem Aufwand beseitigen lässt. Ein unterbrechungsfreier Weiterbetrieb wird bei Eintreten dieses Störfalles nicht gefordert.
3. **Extrem unwahrscheinliche Störfälle:** (typisch $10^{-4} \text{ a}^{-1} \geq f \geq 10^{-6} \text{ a}^{-1}$) Extrem seltene Störfälle werden mit großer Wahrscheinlichkeit während der gesamten Lebenszeit der Anlage nicht eintreten. Ziel der Auslegung ist es daher lediglich die Auswirkungen des Störfalles zu minimieren. Bei Anlagen mit großem chemisch- und radiologisch-toxischem Inventar wird lediglich ein sicherer Einschluss des Inventars unter den angenommenen Randbedingungen (Störfall) gefordert. Eine teilweise Zerstörung der Anlage und damit die Infragestellung eines wirtschaftlich vertretbaren Weiterbetriebes wird hierbei in Kauf genommen.
4. **Hypothetische Störfälle:** Im Falle extrem seltener Ereignisse ($f < 10^{-6} \text{ a}^{-1}$) ist es meist technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht vertretbar, das Austreten von toxischem Inventar unter allen Umständen zu verhindern. Für diesen Fall muss durch konservative Abschätzungen oder Berechnungen nachgewiesen werden, dass die für solche Fälle geltenden, erhöhten Grenzwerte für die Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage nicht überschritten werden. Gelingt dies nicht, so müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden, die Emission des Inventars aufgrund diese Störfalles zu minimieren.

Nach Abwägen aller denkbaren Störfälle wird letztendlich per Definition festgelegt, welche Störfälle zu den Auslegungsstörfällen (üblicherweise Kategorie 1 bis 3) zu zählen sind, d.h. für welche dieser Störfälle die Sicherheitseinrichtungen der Anlage in der Konzeptions- und Detaillierungsphase auszulegen sind. Beim Betrachten der Auswirkungen der Störfälle nach Kategorie 4 wird berücksichtigt, wie sich deren Folgen auf die in der unmittelbaren Nähe der Anlage lebende Bevölkerung innerhalb deren Lebenszeit auswirkt. Insbesondere bei der Auswirkung auf Kinder muss daher mit einer Einwirkungszeit von 70 Jahren ausgegangen werden. Der große Vorteil einer Spallationsquelle im Gegensatz zu einem Spaltreaktor ist das um viele Größenordnungen kleinere radioaktive Inventar und das noch sehr viel kleinere Inventar an langlebigen Radionukliden.

Tabelle 3.2-1 Beispiele postulierter Störfälle nach PSAR* / SNS

Störfall	Bereich**	Kategorie	Auswirkung***
Feuer in der Heißen Zelle	Heiße Zelle	2	hoch
Fehlsteuerung des Protonenstrahls mit Überhitzung der Targethülle	Target-Nahbereich	1	niedrig
Quecksilberaustritt in den Target-Nahbereich aufgrund von kleineren Leckagen	Target-Nahbereich	1	niedrig
Quecksilberaustritt in die Heiße Zelle aufgrund von kleineren Leckagen	Heiße Zelle	1	niedrig
Quecksilberaustritt in die Heiße Zelle aufgrund von katastrophalen Leckagen	Heiße Zelle / Target-Nahbereich	2	niedrig
Ausfall der Quecksilberumwälzung mit anschließender Zerstörung des Targets	Target-Nahbereich	1	hoch
Ausfall der Wärmesenke des Rückkühlsystems	Target-Nahbereich	1	hoch
Kranunfall in der Heißen Zelle mit Zerstörung des Quecksilberkreislaufes (Quelle aus)	Heiße Zelle	1	mittel bis niedrig
Explosion des kryogenen Moderatorsystems	Target-Nahbereich	2	hoch
Kranunfall im oberen Handhabungsbereich	Oberer Handhabungsbereich	1	niedrig
Kranunfall im oberen Handhabungsbereich mit nachfolgender Wasserstoffexplosion	Oberer Handhabungsbereich	3	hoch
Kranunfall im oberen Handhabungsbereich (Last fällt auf Target Nahbereich)	Oberer Handhabungsbereich	2	niedrig
Anlagenweites Großfeuer	Gebäude Targetstation	3	hoch
Erdbeben mit nachfolgendem Feuer oder Explosion	Gebäude Targetstation	2	hoch

* PSAR/SNS Preliminary Safety Analysis Report

** Bezeichnung der entsprechenden Bereiche siehe Abb. 4.1-1

*** mögl. Auswirkung auf die Umgebung ohne Berücksichtigung der Wirksamkeit von Sicherheitssystemen

Für verschiedene Spallationsquellen wie z.B. SINQ /SIN 97/ oder auch die im Bau befindliche amerikanische Quelle SNS /PSA 00/ sind im Rahmen von Risikostudien die möglichen und denkbaren Störfälle analysiert worden. Berücksichtigt werden bei einer solchen, vorläufigen Studie neben dem generellen Aufbau und Konzept der Anlage auch das Risikopotential des in der Anlage befindlichen Inventars. Tabelle 3.2-1 zeigt Beispiele anzunehmender Störfälle und bewertet die zu erwartenden Auswirkungen /PSA 00/.

Da zum Zeitpunkt der ersten Erstellung einer solchen Auflistung keine detaillierte technische Ausarbeitung der Anlage vorliegt, bleiben bei der Abschätzung der Auswirkungen eines postulierten Störfalles sowohl aktive Sicherheitssysteme als auch die konstruktiv-passive Sicherheit der technischen Ausführung unberücksichtigt. Das Resultat einer solchen Studie kann eine Auflistung der größten für diese Anlage anzunehmenden Störfälle ergeben. Ziel der technischen Auslegung ist es dann, die gefundenen Störfälle bzw. deren Auswirkungen mittels passiver konzeptioneller bzw. aktiver Sicherheitsmerkmale zu berücksichtigen, so dass entweder der Eintritt eines postulierten Störfalles gänzlich verhindert oder zumindest die Auswirkungen minimiert werden können.

3.3. Versagenswahrscheinlichkeit von Komponenten und Systemen

Große Anlagen bestehen je nach Komplexität aus mehreren tausend bis zu einigen Millionen Einzelkomponenten und -systemen. Auch bei noch so gewissenhafter Auslegung, Konstruktion, Material- bzw. Komponentenauswahl sowie Fertigung, Montage und Wartung kann nicht von einer dauerhaften Fehlerfreiheit aller System ausgegangen werden. Bei der Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen, Teilsystem und Systemen muss zunächst zwischen der zu erwartenden und der seitens der Gesamtanlage akzeptablen Versagenswahrscheinlichkeit unterschieden werden. Während erstere eine Eigenschaft der jeweiligen Komponente bzw. des Teilsystems ist, leitet sich die akzeptable Versagenswahrscheinlichkeit aus der Art der Verwendung innerhalb des Gesamtsystems ab.

Die zu erwartende Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteils hängt von vielen Einflussfaktoren ab. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass sie mit zunehmender Komplexität zunimmt. Des weiteren ist meist eine Abhängigkeit von der Belastung zu beobachten. Bei Bauteilen, die im Normalbetrieb an ihrer Auslegungsgrenze betrieben werden, muss mit einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit gerechnet werden als bei niedrig belasteten Bauteilen. Neben der Qualität der Konstruktion und Auslegung des Bauteils spielt nicht zuletzt auch die Qualitätssicherung bei Fertigung und Montage eine entscheidende Rolle. Im Rahmen der in dieser Arbeit vorgenommenen Konzeptfindung ist eine genaue Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten und Teilsysteme nicht möglich. Trotzdem wurde hier bei der Konzeptfindung auf einfache technische Umsetzbarkeit des Konzeptes und damit eine niedrige Versagenswahrscheinlichkeiten der betroffenen Komponenten und Systeme Wert gelegt.

Werden Standardbauteile eingesetzt und innerhalb der vom Hersteller angegebenen Spezifikationen betrieben, so wird für das Bauteil herstellerseitig meist eine Ausfallwahrscheinlichkeit angegeben. Eine Möglichkeit diese anzugeben, ist der so genannte "MTBF Wert" (Mean Time Between Failures). Bei Bauteilen mit konstant anzunehmender Ausfallrate gibt dieser Wert den zu erwartenden Mittelwert der ausfallfreien Zeit an /BIR 91/. Diese Werte leiten sich meist aus einer Kombination von bauteilspezifischem Hintergrundwissen und gesammelter Betriebserfahrung ab. Im Falle von standardisierten Bauteilen, zum Beispiel aus dem Bereich des Maschinenbaus, werden dem jeweiligen Stand der Technik entsprechende

Rechenmodelle zur Ermittlung der Ausfallswahrscheinlichkeit zur Verfügung gestellt. Bei all diesen Werten muss jedoch stets berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um statistische Wahrscheinlichkeiten handelt. Eine Aussage über den Versagenszeitpunkt eines bestimmten Bauteiles lässt sich weder mit diesen Werten noch mittels einer anderen Methode erzielen. Tabelle 3.3-1 zeigt einige Beispiele für die Angabe einer Versagenswahrscheinlichkeiten ausgewählter Bauteile:

Tabelle 3.3-1 Beispiele für die Angabe der Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen

Bauteil	Wert	Definition
Wälzlager	$L_{10} = 5.856$	Nach 5.856×10^6 Umdrehungen sind 10 % einer großen Anzahl gleicher Lager unter gleichen Betriebsbedingungen ausgefallen.
Elektromotor	MTBF = 20.000h	Im statistischen Mittel tritt alle 20.000 Betriebsstunden ein Fehler am Motor auf.
Zahnriemen (KFZ)	alle 90.000 km	Herstellervorgabe: Wird alle 90.000 km Laufleistung der Zahnriemen ausgewechselt, so ist aufgrund von Betriebserfahrung die Ausfallswahrscheinlichkeit wirtschaftlich vertretbar. (Garantie)

Bei der akzeptablen Versagenswahrscheinlichkeit stellt sich zunächst die Frage nach der Sicherheitsrelevanz des Bauteiles oder Teilsystems für die Gesamtanlage. Sicherheitstechnisch nicht relevante Komponenten und Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass aus ihrem Versagen keine direkte Gefahr für die Gesamtanlage ausgeht. Sicherheitsrelevanz ist daher nicht an die Art einer Komponente gebunden, sondern vielmehr an die Auswirkung, die ein Versagen für die Anlage hat. Die Wahl der einzusetzenden Komponente kann in diesem Falle nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen. Sicherheitstechnisch relevante Komponenten hingegen können in zwei Gruppen aufgeteilt werden /BAR 01/.

Zur erste Gruppe gehören Komponenten, bei denen ein Schaden ausgeschlossen sein muss. Es handelt sich hierbei um passive mechanische Komponenten, die einmalig sind, und nicht, oder nur unter wirtschaftlich unververtretbarem Aufwand austauschbar sind, bzw. um Systeme, die zwar redundant ausgeführt sind, deren Versagensfolgen aber aus sicherheitstechnischen und/oder wirtschaftlichen Gründen nicht zumutbar sind. Für die Vorgehensweise, die angewandt wird, um bei derartigen Komponenten einen Schaden auszuschließen, ist die Bezeichnung „Bruchausschluss“, „Basissicherheitskonzept“ oder in letzter Zeit vermehrt „Nachweis der Komponentenintegrität“ üblich.

Grundphilosophie hierbei ist, dass bei der Auslegung eines Bauteils streng konservativ nach einem vorgegebenen bewährtem Regelwerk vorgegangen wird. Im folgenden sei kurz auf die Rahmenspezifikation "Basissicherheit von druckführenden Komponenten" verwiesen /RAH 79/. Bei Einhaltung der in dieser Rahmenspezifikation festgeschriebenen Anforderungen wird eine Basissicherheit der Komponente erreicht, welche ein katastrophales, aufgrund herstellungsbedingter Mängel eintretendes Versagen eines Anlagenteils ausschließt. Grundsätze der Bauteilauslegung hierbei sind:

- hochwertige Werkstoffeigenschaften, insbesondere Zähigkeit
- konservative Begrenzung der Spannung
- Vermeidung von Spannungsspitzen durch optimale Konstruktion
- Gewährleistung der Anwendung optimierter Herstellungs- und Prüftechnologien
- Kenntnis und Beurteilung ggf. vorliegender Fehlerzustände
- Berücksichtigung des Betriebsmediums

Alle diese Bereiche werden innerhalb der Rahmenspezifikation bzw. in Anhängen zu dieser weiter definiert.

In die zweite Gruppe von sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten gehören passive und aktive Komponenten, die redundant vorhanden sind und deren Folgeschäden im Schadensfall beherrscht werden. Bei diesen Komponenten ist im Einzelfall ein Schaden zulässig, da die Auswirkungen eines Komponentenversagens unterhalb der zulässigen Auswirkungen liegt bzw. gehalten werden kann. Bei dieser Gruppe von Komponenten ist die Qualität nachzuweisen und zu erhalten, damit ein „common mode“ Fehler ausgeschlossen werden kann. Durch Instandhaltungsmaßnahmen wird die notwendige Qualität im Betrieb erhalten. Diese Maßnahmen werden als „vorbeugende Instandhaltung“ bezeichnet und als wiederkehrende Prüfungen für den Betrieb vorgeschrieben. Die Frequenz dieser Prüfungen ergibt sich dabei aus der erwarteten Versagenswahrscheinlichkeit der in Frage kommenden Bauteile.

Als ein Beispiel für eine Komponente dieser Gruppe ist der Targetbehälter zu nennen. Dieser wird aufgrund der zu erwarteten Strahlenschädigung durch Protonen und Neutronen regelmäßig getauscht, bevor ein Schaden auftritt. Da in diesem Falle der Wert für die zu erwartenden Versagenswahrscheinlichkeit weder aus Betriebserfahrung ähnlicher Bauteile noch aus Berechnungsverfahren des allgemeinen Stands der Technik ermittelt werden kann, wird konzeptionell eine Redundanz in Form einer zweiten Sicherheitshülle vorgesehen. Die vorgeschriebene Austauschfrequenz wird zu Anfang hoch angesetzt und kann mit zunehmender Betriebserfahrung entsprechend angepasst werden.

Alle restlichen Komponenten fallen in die dritte Gruppe. An sie werden keine sicherheitstechnischen Anforderungen gestellt. Diese Komponenten dürfen ausfallen. Man spricht in diesem Fall von „ausfallorientierter Instandhaltung“.

Bei der Konzeption und Detaillierung der Anlage stellt sich daher die Aufgabe, die vorhandenen Systeme und Komponenten auf eine der drei oben diskutierten Gruppen aufzuteilen.

- Gruppe 1: Gewährleistung der Qualität (Integritätsnachweis)
- Gruppe 2: Erhaltung der Qualität (vorbeugende Instandhaltung)
- Gruppe 3: Wiederherstellung der Qualität (ausfallorientierte Instandhaltung)

Diese Aufteilung wird weitgehend durch die Festlegung des Gesamtkonzeptes der Anlage oder Teilanlage (hier der Targetstation) bestimmt. Daher kommt der Wahl dieses Konzeptes eine zentrale Bedeutung zu. Ziel dieser Überlegung muss es sein, möglichst wenige und klar

definierte sowie überschaubare Systeme zu entwickeln, die der ersten Gruppe zuzuordnen sind.

3.4. Anlagenzuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Die Zuverlässigkeit einer Anlage bzw. deren Teilsysteme bestimmt maßgeblich deren Verfügbarkeit. Bei Produktionsanlagen ist eine hohe Verfügbarkeit gleichbedeutend mit einer hohen Wirtschaftlichkeit und damit niedrigen Ausfallkosten. Obwohl es sich bei einer Spallationsneutronenquelle, vergleichbar einer reaktorbasierten Neutronenquelle, nicht um eine Produktionsanlage im eigentlichen Sinne handelt, können auch hier die Kosten eines Ausfalles bzw. einer unplanmäßigen Stillstandszeit beziffert werden.

Aus Gründen der Wartung und Instandhaltung aber auch der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Anlage ist eine regelmäßige geplante Unterbrechung des Nutzerbetriebs unumgänglich. Aufgrund von Erfahrungen beim Betrieb von Spallationsquellen kleinerer Leistung und unter Berücksichtigung der technischen Besonderheiten der hier besprochenen Anlage sowie Vergleich mit Betriebszyklen eines Forschungsreaktors für Neutronenstreuexperimente sind die folgenden Jahresplanzeiten als Randbedingung für den Betrieb der Targetstation festgelegt worden /TMT 02/:

Nutzerbetrieb (5 Zyklen zu 45 Tagen Neutronenproduktionen):	5400 h (= 61,6%)
4 kurze Abschaltpausen zu je 14 Tagen pro Jahr (Targetwechsel)	1344 h (= 15,4%)
<u>1 lange Abschaltpause pro Jahr (12 Wochen für Wartung/Reparatur)</u>	<u>2016 h (= 23,0%)</u>
Gesamtstunden im Jahr:	8760 h

Die große, jährliche Abschaltpause wird im Wesentlichen durch den Betrieb des Beschleunigers sowie Umbauarbeiten an den Instrumenten vorgegeben und kann mit vertretbarem technischen Aufwand kaum verkürzt werden. Die vier kurzen Abschaltpausen pro Jahr werden zum Wechsel der stark strahlenexponierten Targethülle benötigt und sind aus heutiger Sicht ebenfalls unumgänglich. Daher ergibt sich zwangsläufig die Forderung nach einer möglichst hohen Verfügbarkeit der Targetstation innerhalb der geplanten Nutzungsdauer. Aus Erfahrungen der Quellen ISIS und SINQ kann die Verfügbarkeit des geplanten Nutzerbetriebes zwischen 70% (Betriebsbeginn ISIS /FIN 90/) und 98% (Regelbetrieb SINQ /BAU 98b/) schwanken. Für die hier besprochene Anlage wird eine Verfügbarkeit von mindestens 95% der geplanten Sollbetriebszeit gefordert.

Erste Kostenschätzungen für die Betriebskosten einer Anlage dieser Größenordnung gehen von ca. 142 Mio. Euro pro Jahr aus. Darin sind neben Personal- auch Verbrauchskosten wie Energiekosten des Beschleunigers, auch die Weiterentwicklung von ca. drei neuen Experimentiereinrichtungen pro Jahr mit je 8 Millionen Euro enthalten. Somit können die reinen Betriebskosten zu ca. 100 Mio. Euro pro Jahr abgeschätzt werden. Hinzu kommen die Abschreibung der Investitionskosten, die mit 1,5 Mrd. Euro auf 40 Betriebsjahre und damit hier vereinfacht linear mit ca. 40 Mio. Euro pro Jahr angesetzt werden. Pro geplanter Betriebsstunde der Anlage und damit auch pro ausgefallener Planzeit ergeben sich somit

Kosten von ca. 26 Tausend Euro. Obwohl die Zuverlässigkeit und insbesondere die Verfügbarkeit einer solchen Anlage nicht direkt sicherheitsrelevant sind, wird aufgrund des hier gezeigten Beispiels die Forderung nach einer qualitativ hochwertigen Konzeption und technischen Auslegung der Anlage ersichtlich. Dies schlägt sich neben der Verwendung hochwertiger Bauteile auch in der Forderung nach einfacher Zugänglichkeit und Austauschbarkeit evtl. defekter Komponenten nieder. Dem wird im Rahmen dieser Arbeit sowohl bei der Konzeption der einzelnen Systeme und Komponenten (z.B. durch Redundanz) als auch bei der Definition der Handhabungsvorgänge Rechnung getragen.

4. Anforderungen an die Betriebsumgebung

Die Anforderungen an die direkte Betriebsumgebung eines Hochleistungs- Spallationstargets ergeben sich im Wesentlichen durch die bei der Spallation auftretende Strahlung und deren Folgeeffekte sowie durch die entstehenden Spallationsprodukte. Während die Spallationsprodukte überwiegend im Targetmaterial selber entstehen, ist die strahleninduzierte Bildung von Isotopen auch im Umfeld des Targets zu beobachten. Daher ergibt sich neben der Forderung nach Abschirmung der ionisierenden Strahlung auch die Notwendigkeit des sicheren Einschlusses aller direkt oder indirekt am Prozess beteiligten Medien. Neben der Frage nach Art und Risikopotential der verwendeten Medien ist hier auch deren räumliche Anordnung zu klären. Des weiteren muss die Notwendigkeit und Frequenz des Zuganges durch Personal zu Bereichen, Systemen und Komponenten der Targetstation bzw. eine sinnvolle Zugangsbeschränkung diskutiert werden. Eine weitere, nicht zu vernachlässigende Anforderung ergibt sich aus der Notwendigkeit, Komponenten im Versagensfall oder vorbeugend periodisch auszutauschen oder instand zu setzen. Besonders kritisch sind hier Komponenten, die aufgrund ihrer hohen Aktivierung nicht mehr händisch zu manipulieren sind. Gerade hier wird meist sowohl das Design der Komponente selbst als auch die Auslegung der direkten Umgebung von den Anforderungen aus der Handhabung geprägt. Letztlich ist auch die Rückbaubarkeit nach Ende der prognostizierten Standzeit der Anlage bei der Konzeption zu berücksichtigen.

4.1. Anforderungen an die Zugänglichkeit einzelner Bereiche

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die direkte Betriebsumgebung des Targets betrachtet werden. Für die Entwicklung des Einschluss- und Abschirmkonzeptes ist jedoch die globale Betrachtung der gesamten Targetstation unabdingbar. Im Folgenden wird daher eine Aufteilung der gesamten Targetstation in Einzelbereiche vorgenommen.

Das Gebäude der Targetstation enthält neben dem eigentlichen Targetbereich rechts und links von der Protonenstrahlachse Hallenbereiche zur Unterbringung der Nutzerinstrumentierung (siehe Abb. 4.1-1). Zum sicheren und zuverlässigen Betrieb der Targetstation sind zusätzliche Handhabungsbereiche und Bereiche für Nebenanlagen notwendig. Da die Anforderungen an die Zugänglichkeit durch Personen in diesen Bereichen sehr unterschiedlich sind, macht es Sinn, diese voneinander zu trennen und somit Bereiche unterschiedlicher Sicherheitsanforderungen zu schaffen.

Im Folgenden (Tabelle 4.1-1) sind die Bereiche innerhalb der Targetstation in Reihenfolge aufsteigender Zugänglichkeitsanforderungen aufgelistet. Die Nummerierung korrespondiert mit Abb. 4.1-1.

Tabelle 4.1-1: Bereiche der Targetstation

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	Target-Nahbereich	Nahbereich um die Target-Reflektor-Moderator Anordnung.
2	Heiße Zelle inklusive angrenzender Dekontaminationszelle	In Protonenstrahlrichtung hinter dem Target angeordnete Heiße Handhabungszelle.
3	Protonenstrahlführung	Bereich der Protonenstrahlführung innerhalb des Gebäudes der Targetstation bis zum Protonenstrahlfester (atmosphärische Trennung zwischen Beschleunigervakuum und Target Nahbereich (1)).
4	Unterer Nebenanlagenbereich	Bereich unterhalb der Strahlebene zur Unterbringung von Primär- und Sekundärkreisläufen (mit Ausnahme von Quecksilber) sowie Abwassertanks für kontaminierte Fluide.
5	Transferzellen	Hinter der Handhabungszelle (2) angeordnete weitere Zelle zum Aus- und Einschleusen von Komponenten und Abfällen.
6	Oberer Handhabungsbereich	Handhabungsbereich oberhalb von (4), (1), (2) und (3).
7	Instrumentenhalle	Bereiche über die gesamte Gebäudelänge rechts und links von der Protonenstrahlachse.

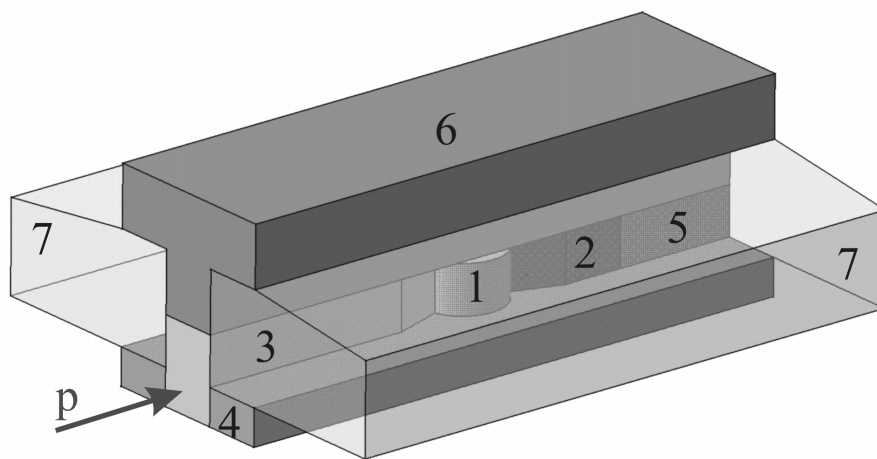


Abb. 4.1-1: Bereiche unterschiedlicher Zugangsanforderungen innerhalb des Gebäudes der Targetstation (schematisch)

Der Target-Nahbereich (1) umfasst neben dem Target, den Moderatoren und dem Reflektor auch den inneren Teil der Abschirmung. Die Grenze dieses Bereiches ist durch die Strahlenbelastung nach Abschalten des Protonenstrahls und Abwarten einer sinnvollen und akzeptablen Abklingzeit gegeben. Dieser Bereich zeichnet sich dadurch aus, dass auch nach längerer Abklingzeit ein Zugang für Personen aus Gründen der zu erwartenden Dosisleistung unmöglich ist. Alle Handhabungen in diesem Bereich müssen fernbedient durchgeführt werden. Im Gegensatz zu allen anderen Bereichen werden medienführende Bauteile sowohl

durch direkten Protonenbeschuss als auch durch extrem hohe Neutronenflüsse einer nicht zu vernachlässigenden Strahlenschädigung ausgesetzt. Daher ist hier von einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit dieser Komponenten auszugehen. Zusätzlich ist in diesem Bereich mit erhöhter Aktivierung von Gasen und Stäuben zu rechnen.

Die Heiße Zelle (2) dient primär zum Wechseln des Targets, dem Bauteil mit der höchsten Aktivität und zu erwartenden Wechselfrequenz. Aus diesem Grunde verbietet sich jeder Zugang während des Wechselvorganges. Alle Handhabungen müssen daher fernbedient erfolgen. Der entscheidende Unterschied zum Target-Nahbereich (1) besteht darin, dass nach einer ausreichenden Abklingzeit und Herstellen einer definierten Zellenkonfiguration (Target in Betriebsposition, Quecksilber in abgeschirmtem Ablasstank) ein Betreten der Zelle unter Vollschutz möglich ist. Dies kann z.B. bei Ausbau oder Reparatur von defekten Handhabungseinrichtungen notwendig werden. Soll die Zelle betreten werden, muss jedoch zuvor mit längeren Wartezeiten und aufwändigen Vorarbeiten gerechnet werden. Aufgrund der häufigen Transportvorgänge von kontaminiertem Material von der Heißen Zelle in die direkt daran anschließende Dekontaminationszelle gelten oben genannte Bedingungen ebenfalls für diese Zelle, wenn auch nur temporär.

Der Bereich um die Protonenstrahlführung (3) umfasst neben den Strahlführungsmagneten auch Kollimatoren und Strahlfänger. Kollimatoren dienen als Blende für den Strahl und schälen im Normalbetrieb fortwährend den äußeren Teil des Strahles (sog. "Halo") ab. Daher können sie bezüglich der von ihnen ausgehenden Strahlung als wassergekühltes Feststofftarget niedriger Leistung angesehen werden. Die Strahlfänger hingegen fungieren als Target für einen defokussierten Strahl beim Testbetrieb des Beschleunigers für den Fall, dass das Haupttarget nicht einsatzbereit ist. Alle diese Komponenten erzeugen eine entsprechend hohe Sekundärstrahlung bei Strahlbetrieb und weisen auch nach Strahlabschaltung eine nicht unerhebliche Aktivität auf. Während einige Teilbereiche begehbar sind, wird in der Nähe anderer Komponenten, insbesondere der Kollimatoren und Strahlfänger, deren Aktivierung dies nicht zulassen.

Innerhalb des unteren Hilfs- und Nebenanlagenbereiches (4) befinden sich hauptsächlich Kühlmittelkreisläufe und Anlagen zur Behandlung aktivierter Fluide. Diese Anlagen sind eher konventioneller Natur und finden sich auch in Kernreaktoren oder auch Spallationsanlagen niedriger Leistung wieder. Bei Betrieb der Anlage ist mit erhöhter Dosisleistung, insbesondere aufgrund kurzlebiger Radionuklide, zu rechnen. Bei entsprechender Auslegung einiger kritischer Komponenten, wie z.B. die lokale Abschirmung der Ionentauscher, ist aber erfahrungsgemäß schon kurze Zeit nach dem Abschalten ein Zugang für strahlenexponiertes Personal zu Wartungszwecken möglich. /BAU 98b/

Der Transferzellenbereich (5) schließt sich an die Heiße Zelle (2) an und dient der Ausschleusung von aktivierten Komponenten aus der Zellenanlage. Die dazu notwendigen Demontage- und Verpackungsarbeiten werden aufgrund der hohen zu erwartenden Aktivität und der unterstellten Kontamination der zu handhabenden Teile innerhalb der Dekontaminationszelle erfolgen. Dort werden diese dann fernbedient dekontaminiert und in die Transferzelle überführt. Für den Ausschleusvorgang müssen sich die Bauteile, die dazu verwendeten Behälter sowie auch die Zelle selber in einem Zustand befinden, der eine Übergabe an die Außenwelt erlaubt. Daher sollte auch eingeschränkt ein Betreten durch das Bedienpersonal zulässig sein.

Der obere Handhabungsbereich (6) bietet vertikalen Zugang zu den Bereichen (3), (1), (2) und (5). Hierzu steht ein Deckenkran mit hoher Traglast sowie Handhabungsflaschen zur

Verfügung. Da dieser Bereich eine beträchtliche räumliche Ausdehnung haben wird, ist eine Nutzung als Heiße Zelle oder sonstige fernbediente Handhabungszelle schon aus ökonomischen Gesichtspunkten zu vermeiden. Aus diesem Grund ist dieser Bereich als bedingt zugänglicher händischer Arbeitsbereich vorgesehen. Die Handhabung von aktivierten Komponenten innerhalb des oberen Handhabungsbereiches erfolgt daher mittels abgeschirmter Handhabungsflaschen. Der Zugang zu diesem Bereich wird allerdings limitiert sein und sich im Wesentlichen auf Handhabungsvorgänge bei abgeschalteter Quelle beschränken.

Die Instrumentenhalle (7) dient zur Aufnahme der Instrumente der Neutronennutzer. Hier wird von einem normalen Arbeitsbetrieb mit 2000 Stunden pro Jahr ausgegangen.

Wie in Abb. 4.1-1 gezeigt, liegen sowohl Bereiche mit ähnlichen als auch mit sehr unterschiedlichen Anforderungen in direkter Nachbarschaft. Dies ist auch bei der konzeptionellen und technischen Ausführung der Trennung zwischen den Bereichen zu berücksichtigen. Daher sind diese Bedingungen sowohl bei der Auslegung der Abschirmung als auch bei der Entwicklung des übergeordneten Einschlusskonzeptes für die Targetstation von weitreichender Bedeutung.

4.2. Verwendete Medien

Den verwendeten Medien kommt bei der Umsetzung der Sicherheitsphilosophie eine besondere Bedeutung zu. Ihre chemische und radiologische Toxizität bestimmen maßgeblich das notwendige Einschluss- sowie Handhabungskonzept der betroffenen Komponenten und haben somit weitreichende Auswirkung auf eine sichere Auslegung und Konstruktion der Anlage.

4.2.1. Quecksilber als Targetmaterial

Verwendung

Während bei Spallationsanlagen niedriger Leistung wassergekühlte Feststofftargets aus Wolfram oder Tantal möglich sind, würde ein Feststofftarget für eine Strahlleistung von 5 MW überwiegend aus Kühlwasserkanälen bestehen. Diese Verdünnung des eigentlichen Targetbereiches mit Kühlwasser hätte aber eine wesentlich schlechtere Neutronenproduktionsrate zur Folge.

Daher wird in der hier besprochenen Spallationsquelle Quecksilber als Targetmaterial eingesetzt. Da es in einem weiten Temperaturbereich in flüssiger Form vorliegt, lässt es sich umwälzen und erlaubt somit den Abtransport der bei der Spallation entstehenden Wärme aus dem Targetbehälter. Das Targetmaterial Quecksilber wird hierbei in einem geschlossenen Kreislauf umgewälzt, wobei die ca. 2,2 MW Wärmeleistung, die bei der Spallation entstehen, mittels doppelwandigem Wärmetauscher an einen Sekundärkühlkreislauf mit Wasser als Rückkühlmedium abgegeben werden. Das gesamte Quecksilberinventar einer Targetstation wird bedingt durch die Auslegung des Kreislaufes ca. 1,5 m³ oder 20 t betragen. Der Vorteil dieses relativ großen Inventars liegt in der Verdünnung der bei der Spallation entstehenden radioaktiven Fremdatome und somit einer niedrigeren spezifischen Aktivität des Targetmaterials. Analog hierzu wird auch die nach Abschalten des Protonenstrahls anfallende Nachwärme (Abb. 4.2-1) auf ein größeres Volumen verteilt, was eine aufwändige aktive Nachwärmeabfuhr inklusive der dazu notwendigen Systemtechnik sowie einer eventuellen sicherheitsrelevanten Notstromversorgung überflüssig macht. Abbildung 4.2-1 zeigt die zu

erwartende Aktivität und Nachwärme nach 5000 h Strahlbetrieb für die Zeit nach Strahlabschaltung

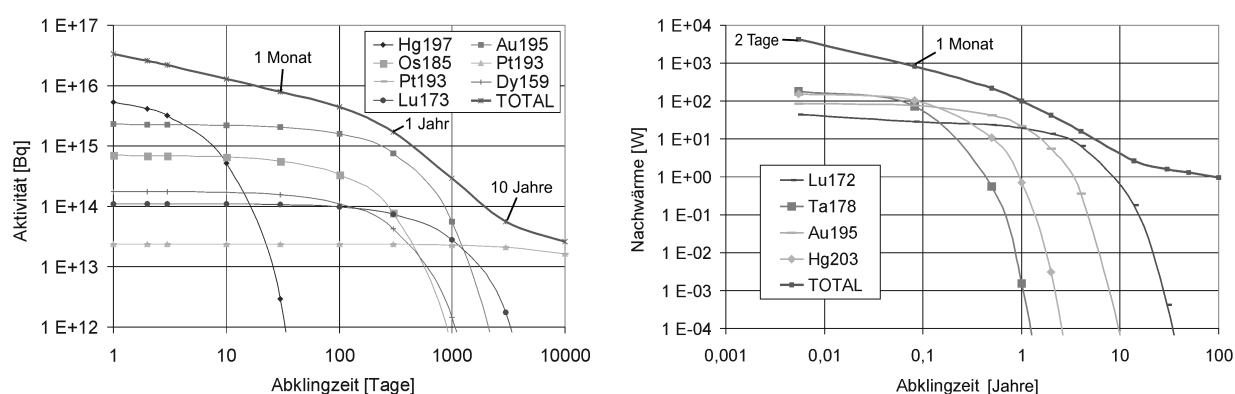


Abb. 4.2-1: Aktivität und Nachwärme im Quecksilber nach Strahlabschaltung /FIL 03/

Physikalische und chemische Eigenschaften

Tabelle 4.2-1 zeigt die wichtigsten physikalischen Eigenschaften des Quecksilbers (Hg) im Vergleich zu anderen als Spallationstargetmaterial in Frage kommenden Flüssigmetallen.

Tabelle 4.2-1: Physikalischen Eigenschaften verschiedener Flüssigmetalle /ES3 02/

	Blei (Pb)	Wismut (Bi)	LBE*	Hg
Atomare Masse [g/mol]	207,2	209	208,2	200,6
Dichte (flüssig) [g/cm ³]	10,7	10,07	10,57	13,55
Schmelzpunkt [°C]	327,5	271,3	125	-38,87
Siedepunkt [°C]	1740	1560	1670	356,58
spez. Wärmekapazität [J/gK]	0,14	0,15	0,146	0,12
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁵ K ⁻¹]	4	4	12	6
Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen [barn]	0,17	0,034	0,11	389

(*Blei-Wismut-Eutektikum /KNE 02/)

Neben diesen physikalischen Eigenschaften weist Quecksilber noch einige bemerkenswerte chemische Eigenarten auf. Mit vielen Metallen bildet es Amalgame, die flüssig, teigig oder fest sein können. Darunter befinden sich zum Beispiel auch Blei, Zinn, Zink, Cadmium, Aluminium und Kupfer aber auch Edelmetalle wie Gold und Silber. In Eisen ist Quecksilber dagegen nicht löslich, weshalb üblicherweise Transportbehälter aus Reineisen oder niedriglegiertem Eisenbasismetall benutzt werden /ROE 02/. Die Korrosions- und Erosionseigenschaften von Quecksilber in Bezug auf übliche Behälterwerkstoffe sind in /KIN 03/ hinreichend untersucht worden. Demnach ist bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s innerhalb der anvisierten Standzeit der Gesamtanlage von 40 Jahren mit einem Erosionsabtrag von weniger als 1 mm zu rechnen. Nach /PAW 01/ ist die Korrosionsbeständigkeit von üblichen austenitischen Werkstoffen auch bei erhöhten Temperaturen ausreichend gut. Quecksilber oxidiert bei Kontakt mit feuchter Luft und bildet eine Oxydhaut

aus. Schon bei niedrigen Temperaturen weist Quecksilber einen nicht unerheblichen Dampfdruck auf. Im Gleichgewichtszustand ergeben sich schon bei Raumtemperatur (20°C) Konzentrationen in Luft von 15,2 mg/m³. Selbst bei 0°C werden noch Werte von 2,0 mg/m³ und bei 40°C schon über 70 mg/m³ erreicht. Da Quecksilberdämpfe im Gegensatz zu flüssigem, metallischem Quecksilber äußerst giftig sind, liegt die zulässige Raumluftkonzentration am Arbeitsplatz bei nur 0,1 mg/m³. Des weiteren besitzt Quecksilber eine sehr hohe Oberflächenspannung von bis zu 0,00465 N/cm bei 20°C. Dies führt dazu, dass verschüttetes oder kondensiertes Quecksilber kleine Kugeln statt eines Filmes ausbildet. Die Reinigung quecksilberkontaminierter Oberflächen durch Wischen gestaltet sich daher schwierig. Verwendung finden hier üblicherweise schwefelsäurehaltige Tücher, was zu einer Reduktion der Oberflächenspannung aufgrund Quecksilbersulfidbildung führt.

Radiologische Eigenschaften

Mit einer Kernladungszahl von 80 und einem mittleren Atomgewicht von 200,6 g/mol besteht Quecksilber aus sieben stabilen, natürlichen und einer Reihe bei Bestrahlung entstehender radioaktiver Isotope mit Halbwertszeiten zwischen wenigen Sekunden und, mit Ausnahme von Hg-194, einigen 10-Tagen. Des weiteren entstehen durch den Spallationsprozess weitere instabile Isotope anderer Elemente. Tabelle 4.2-2 zeigt eine Aufstellung der natürlichen Quecksilberisotope und sicherheitsrelevanter Spallationsprodukte.

Tabelle 4.2-2: Isotope des Quecksilbers und sicherheitsrelevante Spallationsprodukte im ESS Target /ES3 02/

Nuklid	Inventar ESS Target [GBq]*	Halbwertszeit [Tagen]	Häufigkeit in natürlichem Hg	Flüchtigkeit
H-3	5,6 10 ⁵	4500		hoch
I-124	3100	4,2		hoch
I-125	1,4 10 ⁴	59,4		hoch
I-126	630	13		hoch
Gd-148	3,5 10 ⁴	2,72 10 ⁵		niedrig
Hf-172	7,3 10 ⁵	683		niedrig
Au-195	4,2 10 ⁶	183		niedrig
Hg-193	1,9 10 ⁶	0,16		mittel
Hg-194	2,1 10 ⁵	1,9 10 ⁵		mittel
Hg-195	3,2 10 ⁶	0,42		mittel
Hg-196			0,146 %	mittel
Hg-197	2,2 10 ⁷	2,67		mittel
Hg-198			10,02 %	mittel
Hg-199			16,84 %	mittel
Hg-200			23,13 %	mittel
Hg-201			13,22 %	mittel
Hg-202			29,80 %	mittel
Hg-203	1,5 10 ⁷	46,6		mittel
Hg-204			6,85 %	mittel

* Inventar nach 30 Volllastjahren direkt nach Strahlabschaltung

Berücksichtigt man das Gesamtinventar von bis zu 10^8 GBq und dessen Flüchtigkeit und vergleicht dieses mit den in Deutschland für Auslegungsstörfälle zulässigen Freisetzung, so dürfen im Störfalle maximal entweder 0,25% der hoch flüchtigen oder 0,02% der mittel flüchtigen bzw. 0,03% der niedrig flüchtigen Nuklide entweichen. Diese Werte reduzieren sich im Falle einer angenommenen gleichzeitigen Freisetzung aller Stoffklassen. /ES3 02/

4.2.2. Wasser als Kühlmedium

Verwendung

Neben der Moderation von schnellen zu thermischen Neutronen wird Wasser innerhalb der Targetstation hauptsächlich als Kühlmedium eingesetzt. Je nach neutronischen Anforderungen kommt Leicht- bzw. Schwerwasser zum Einsatz. Die Verwendung von Schwerwasser (D_2O) ist überall dort notwendig, wo eine niedrige Absorption von thermischen Neutronen gefordert wird. Im vorliegenden Falle beschränkt sich der Schwerwassereinsatz auf die Kühlung des Reflektors. Die Kühlung von weiter vom Spallationsmittelpunkt entfernt angeordneten Komponenten, wie der inneren Abschirmung sowie der Rückkühlung des Quecksilberkreislaufes, kann mit Leichtwasser erfolgen. Obwohl in direkter Nähe des Spallationsmittelpunktes befindlich, kann auch für die Kühlung der doppelwandigen Sicherheitshülle H_2O eingesetzt werden, da hier die Schichtdicke des Wassers mit einigen Millimetern bis zu maximal einem Zentimeter zu klein für eine effektive Neutronenabsorption ist. Ebenfalls mit Leichtwasser gekühlt wird das Protonenstrahlfenster. Die beiden letztgenannten Komponenten zeichnen sich dadurch aus, dass neben hochenergetischen Neutronen zusätzlich die direkte Protonenbestrahlung berücksichtigt werden muss. Weiterhin wird Wasser als Kühlmedium in vielen anderen Bereichen der Targetstation eingesetzt, wie z.B. bei der Kühlung der Strahlführungsmagnete der Protonenstrahlführung. Da diese nicht zur direkten Targetumgebung gehören, bleiben sie jedoch im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt.

Physikalische und chemische Eigenschaften

Tabelle 4.2-3 zeigt die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Leicht- und Schwerwasser.

Tabelle 4.2-3: Physikalischen Eigenschaften von H_2O und D_2O

	H_2O	D_2O
Dichte (4°C) [g/cm ³]	1,0	1,105
Schmelzpunkt [°C] bei 1013 mbar	0°	3,8°
Siedepunkt [°C] bei 1013 mbar	100°	101,4°
Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen [barn]	0,17	0,034

In ihrem chemischen Verhalten unterscheiden sich H_2O und D_2O nicht. Die Wasserchemie und insbesondere die Korrosionsproblematik in Kühlwasserkreisläufen sowohl in nuklearen als auch in nicht-nuklearen Anlagen ist weithin bekannt und soll hier nicht weiter diskutiert werden.

Radiologische Eigenschaften

Während bei der Kernspaltung vorwiegend das Problem der Radiolyse und des Einfangs von Neutronen bekannt ist, kommt bei Spallationsquellen ein weiterer Effekt hinzu. Auch im Wasser kommt es aufgrund der hochenergetischen Neutronen und insbesondere der Protonen zu Spallationsprozessen überwiegend am Sauerstoff und damit zur Bildung einer Vielzahl von Isotopen, welche so bei Spaltreaktoren nicht beobachtet werden.

Radiolyse ist die strahleninduzierte chemische Aufspaltung eines Moleküls (hier des Wassers) in sowohl oxidierende als auch reduzierende Bestandteile. Dieser Vorgang kann sowohl durch Protonen-, Neutronen- als auch durch Gammastrahlung ausgelöst werden. Die Produktionsraten der Radiolyseprodukte sind dabei proportional zur Dosisleistung der einwirkenden Strahlung und zum strahlenbeeinflussten Volumen. Radiolyseprodukte des Leichtwassers sind z.B.: H_2 , O_2 , H_2O_2 , OH , H , e^-_{aq} , HO_2 , O_2^- , $\text{HO}_2^\cdot$, OH^- und H^+ /LIL 99/. Da die Lebensdauer der meisten dieser Produkte im Bereich von wenigen Millisekunden liegt, ist auch ihre oxidierende und damit korrosive Wirkung auf die strahlenbelastete Zone beschränkt. H_2 , O_2 und H_2O_2 dagegen haben in unbehandelten Wasserkreisläufen Lebensdauern von mehreren Tagen und müssen daher entweder kontinuierlich separiert und abgelassen oder gezielt rekombiniert werden. Zusätzlich werden Ionentauscher zur Stabilisierung der Wasserqualität eingesetzt.

Während bei der Kernspaltung der Effekt des Neutroneneinfangs bei der Bildung von Fremdisotopen überwiegt, dominiert bei höheren Neutronen- und Protonenenergien die Isotopenbildung durch Spallation. Rechnungen und Betriebserfahrungen der Spallationsquellen ISIS /EAT 86/ und SINQ /HEY 98/ /BAU 98b/ zeigen C-11, N-13 und O-15 als dominante, kurzlebige Spallationsprodukte des Sauerstoffs mit Halbwertszeiten im Bereich von einigen Minuten. Diese werden zu einer Dosisleistung von einigen Sv/h in der Nähe der Kühlwasserleitungen im Betrieb führen, die aber innerhalb von wenigen Stunden nach Abschalten der Quelle auf vertretbare Werte abklingt. Zusätzlich werden eine Reihe kurzlebiger Isotope mit Halbwertszeiten bis zu einer Minute gebildet. In diesen Bereich fallen die Neutronenstrahler C-16 und N-17 sowie der hochenergetische γ -Strahler N-16. Neben Abschirmproblemen der 7,1 MeV Gammas des N-16 führen insbesondere die Neutronenstrahler zu einer Aktivierung der Kreislaufkomponenten. Hier kann durch eine entsprechend dimensionierte Verzögerungsstrecke von ca. 10 Halbwertszeiten (HWZ) ein wirksamer Schutz von Kreislaufkomponenten und Messtechnik im Rücklauf erreicht werden.

Die verbleibende Aktivität wird durch die längerlebigen Spallationsprodukte des Wassers, Be-7 und Tritium (H-3) bestimmt. Tabelle 4.2-4 zeigt die wichtigsten Isotope mit ihren Halbwertszeiten und Zerfallsarten /SIN 97/. Nuklide mit längeren Halbwertszeiten tragen im Wesentlichen zur Kontaminationsproblematik des Kühlwassers bei, da durch sie auch nach längeren Abschaltphasen noch die Notwendigkeit des sicheren Einschlusses des Kühlwassers gefordert werden muss. Während im Kühlmedium befindliches Tritium als β -Emitter nicht zur Dosisleistung außerhalb der Rohrleitungen beiträgt, neigt Be-7 dazu, sich als Belag innen auf den Rohrleitungen abzusetzen und daher auch nach Entleeren der Kühlwassersysteme eine nicht unerhebliche Dosisleistung zu verursachen. Die kontinuierliche Filterung des Be-7 im Hauptstrom der Kühlmittelkreisläufe und damit die Verhinderung der Bildung von Be-7-Belägen in den Rohrleitungen ist aufgrund der damit verbundenen hohen Druckverluste technisch aufwendig. Aufgrund der moderaten Halbwertszeit von nur 53 Tagen ist bei längeren Betriebsunterbrechungen, insbesondere bei einem späteren Rückbau mit einer deutlich reduzierten Aktivität zu rechnen. Tritium wird dagegen wegen seiner Halbwertszeit

von ca. 12,3 Jahren im System akkumuliert. Neben dem tritiiertem Wasser (HTO) liegt Tritium aufgrund der Radiolyse auch in gasförmigem Zustand vor. Betriebserfahrungen der Kühlwassersysteme der Quelle SINQ haben gezeigt, dass durch entsprechende Auslegung der kombinierten Expansions- und Rekombinationsbehälter eine Radiolysegasabgabe über den Schornstein durch vollständige Rekombination im Betriebs nahezu vermieden werden kann.

Tabelle 4.2-4: Im Kühlwassersystem zu erwartende Nuklide /SIN 97/

Nuklid	Halbwertszeit	Relevante Strahlung
Li-9	0,17 sec	β^-
N-18	0,63 sec	β^- , γ (max. 2,47 MeV)
C-16	0,74 sec	β^- , n
Li-8	0,9 sec	β^-
C-15	2,4 sec	β^- , γ (5,3 MeV)
N-17	4,2 sec	β^- , γ (max. 96 MeV), n
N-16	7,2 sec	β^- , γ (max. 7,11 MeV)
Be-11	13,6 sec	β^- , γ (max. 8 MeV)
C-10	19,5 sec	β^+ , γ (max. 72 MeV)
O-14	71 sec	β^+ , γ (max. 2,3 MeV)
O-15	123 sec	β^+
N-13	10 min	β^+
C-11	20,4 min	β^+
Be-7	53,4 Tage	ϵ , γ (max. 0,48 MeV)
H-3	12,3 Jahre	β^-
C-14	5740 Jahre	β^-

Genaue Berechnungen der zu erwartenden Aktivität in den Kühlkreisläufen der hier besprochenen Targetumgebung liegen zur Zeit noch nicht vor. Bei einer Extrapolation der bei ISIS und SINQ gemessenen Aktivitäten muss berücksichtigt werden, dass die Schwerwasserkühlkreisläufe der dort verwendeten Feststofftargets aufgrund ihres großen direkt vom Protonenstrahl beaufschlagten Wasservolumens innerhalb des Targets über 90% der gesamten Wasseraktivierung ausmachen /BAU 98c/. Aufgrund des bei ESS verwendeten Flüssigmetalltargets ist, bezogen auf die Strahlleistung, mit einer ca. 10-fach kleineren Aktivierung des Kühlwassers und insbesondere Tritiumproduktion zu rechnen. Berücksichtigt man die 5-(SINQ) bis 20-(ISIS) fache Strahlleistung, so ist mit einer Aktivität von ca. 10^1 bis 10^3 TBq im Betrieb und ca. 1 bis 10 TBq einige Stunden nach Strahlabschaltung zu rechnen. Ein Beispiel für den Verlauf der Dosisleistung innerhalb der Kühlzentrale von SINQ (Abb. 4.2-2) zeigt einen Abfall um ca. vier Größenordnungen einige Stunden nach Strahlabschaltung. Die hier verzeichnete Na-24 Aktivität ist auf die Aluminiumwandungen des Strahlfensters zurückzuführen und damit kein Spallationsprodukt des Wassers.

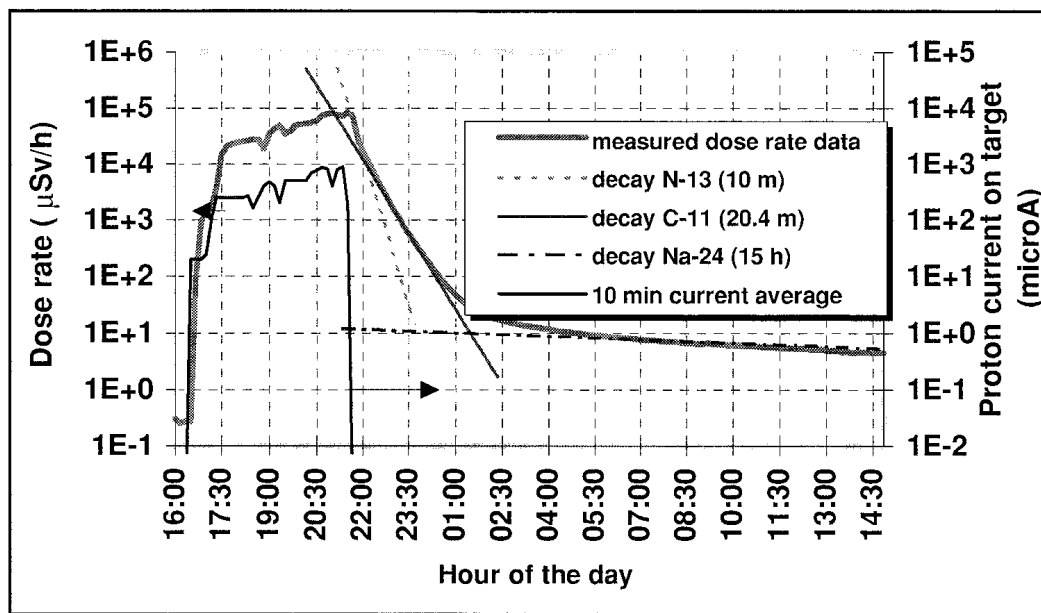


Abb. 4.2-2 Dosisleistung innerhalb der Kühlzentrale während der ersten 2 mAh Betrieb an SINQ am 04.12.1996

4.2.3. Schutzgassysteme

Alle nicht evakuierbaren Bereiche der Targetstation und insbesondere die Volumina der verschiedenen Einschlüsse sind mit Gasen gefüllt. Folgende Kriterien sind bei der Wahl der Gase zu berücksichtigen /SIN 97/:

- Im Bereich hoher Strahlung ist mit strahleninduziert erhöhter Korrosion zu rechnen. Hier sollen Inertgase eine sauerstofffreie bzw. -arme Atmosphäre gewährleisten. Schon bei einem Sauerstoffgehalt von nur 0,5 % wurden beim Betrieb der Quelle ISIS innerhalb kurzer Zeit erhebliche Korrosionsschäden beobachtet /BRO 01/. Aus praktischen Gründen kommen hier nur He und N₂ in Frage.
- Im Bereich der Neutronenstrahlen sollen die Neutronen so wenig als möglich gestreut werden. Helium bietet hier die niedrigste mögliche Wechselwirkung und damit höchste Neutronentransparenz.
- Im Bereich hoher und mittlerer Strahlung ist mit Aktivierung von Gasen zu rechnen. Hier sollte Helium aufgrund seiner geringen Wechselwirkung und damit niedrigen Aktivierung verwendet werden.
- In Bereichen, in denen beim unterstellten Versagen von brenngasführenden Leitungen die Entstehung von explosiven Gemischen möglich wäre, muss durch Inertgasfüllung der Sauerstoffgehalt sicher unterhalb der Explosionsgrenze gehalten werden.
- Wird in Bereichen mittlerer oder niedriger Strahlung Luft als Füllgas für einen Einschluss verwendet, so muss die Ansammlung von NO_x durch gezielte Lüftung vermieden werden. Diese würde bei vorhandener Luftfeuchtigkeit zur Bildung der extrem korrosiven Säure NHO führen /FUJ 02/.
- Die Gaszusammensetzung bzw. Druckabstufung von benachbarten Einschlüssen ist so zu wählen, dass die Leckdetektion eines Einschlusses einfach und sicher möglich ist.

4.2.4. H_2 und CH_4 als Moderatormaterial

Verwendung

Da die im Spallationsprozess entstehenden schnellen Neutronen nicht zur Messung an den Instrumenten verwendet werden können, werden sie in so genannten Moderatoren auf die gewünschten Geschwindigkeiten herabgebremst. Dieser Abbremsvorgang findet hauptsächlich durch elastische Stossvorgänge der Neutronen mit Atomkernen möglichst gleicher Masse statt. Ein besonders gutes Moderatormaterial enthält daher eine hohe Dichte an Wasserstoffatomen. Als klassischer und einfach zu handhabender Moderator wird daher Wasser bei Raumtemperatur an nahezu allen Neutronenquellen dieser Welt verwendet. Die zunehmende Forderung nach noch langsameren und damit „kälteren“ Neutronen im Bereich unterhalb 10 meV lässt sich mit diesen Wassermoderatoren aber nicht abdecken. Da bei diesen Neutronenenergien die thermische Eigenbewegung der Wasserstoffatome eine entscheidende Rolle spielt, benutzen so genannte „kalte Quellen“ Moderatormaterialien bei möglichst niedrigen Temperaturen. Während flüssiger Wasserstoff bei ca. 20 K mittlerweile weite Verbreitung an bestehenden Neutronenquellen gefunden hat, soll bei der ESS auch der Einsatz von festem Methan bis hinunter zu 20 K möglich werden (roter Kurvenverlauf in Abb. 4.2-3). Da sich dieses nicht zu Kühlzwecken umpumpen lässt, wird es von tiefkalttem Wasserstoff als Wärmeträgermedium mit guten Moderationseigenschaften umspült. Bei den bei einer 5-Megawatt-Spallationsquelle zu erwartenden Wärmeeinträgen und der gleichzeitig schlechten Wärmeleitfähigkeit von festem Methan wird als aussichtsreichster Methanmoderator z.Z. eine wasserstoffgekühlte Kugelschüttung diskutiert.

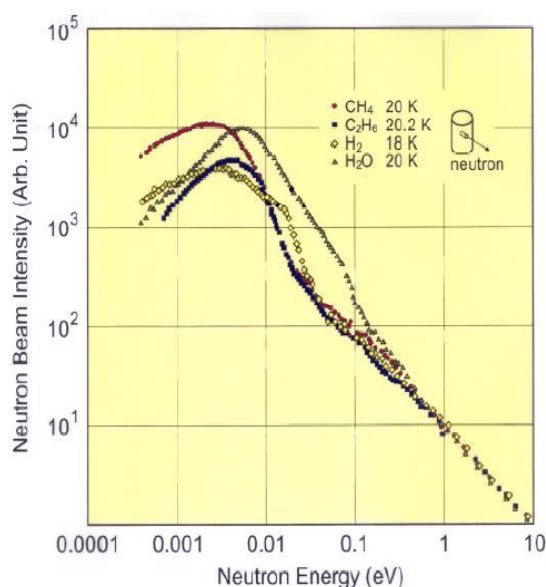


Abb. 4.2-3 Neutronenspektrum von verschiedenen tiefkalten Moderatormaterialien /INO 79 /

Physikalische und chemische Eigenschaften

Tabelle 4.2-5 zeigt die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff und Methan bei den zu betrachtenden Temperaturen.

Tabelle 4.2-5: Physikalischen Eigenschaften von H_2 und CH_4 /ROE 02/

	H_2	CH_4
Dichte (gasförmig; 20°C) [g/dm ³]	0,0899	0,72
Dichte (20 K) [g/cm ³]	0,0708 (fl.)	0,162 (fest)
Siedepunkt [K]	21	111
Schmelzpunkt [K]	14	91
Volumenzunahme bei Erwärmung von 20 K auf 20 °C (Faktor)	788-fach	225-fach

Sowohl Wasserstoff also auch Methan neigen in Verbindung mit Luftsauerstoff zur Bildung brennbarer und explosiver Gemische. Da bei der Verwendung eines Methanmoderators immer auch Wasserstoff entweder als Kühlmedium für das Methan oder auch als weiterer reiner Wasserstoffmoderator im Gesamtsystem vorhanden ist, wird auch die Mischung beider Gase mit Luft in Betracht gezogen. Abbildung 4.2-4 zeigt die Explosionsgrenzen für ein Wasserstoff-Methan Gemisch in Luft /BAR 93/.

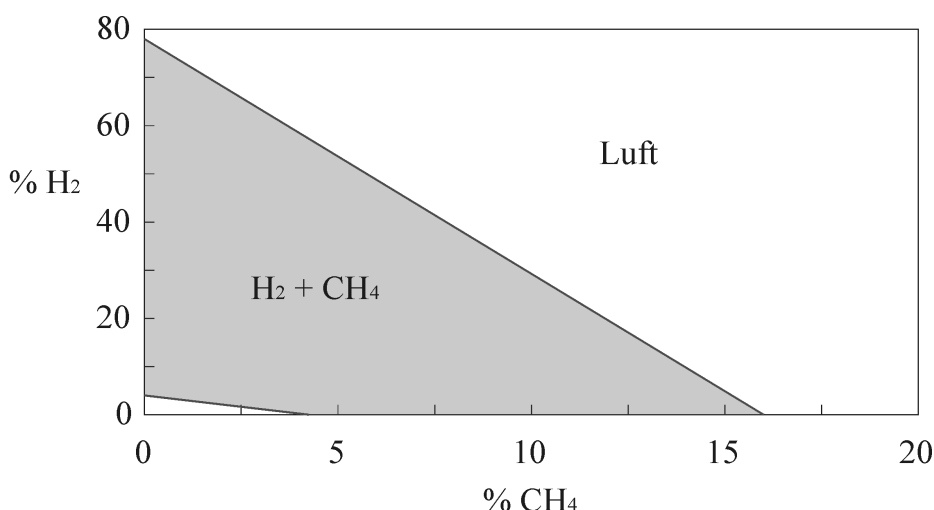


Abb. 4.2-4 Explosionsgrenzen für ein Wasserstoff- Methan Gemisch an Luft /BAW 01/

Eine besondere Problematik aller tiefkalten Stoffe entsteht durch die Eigenschaft, Luft und hier speziell den Luftsauerstoff auszufrieren und somit an- bzw. einzulagern. Tiefkalte Medien werden in mehrfach coaxialen Rohrleitungssystemen transportiert, wobei sich in den inneren Rohren die Medien selber und im äußeren Ringspalt das Isoliervakuum befindet. Tritt ein Leck in der äußeren Hülle auf, würde Luft in das Vakuumsystem eindringen und an der weiter innen liegenden kalten Wand ausfrieren. Aufgrund dieser Pumpwirkung ist daher ein kleineres Leck nicht durch Druckanstieg oder Fremdgasbestimmung im Vakuum detektierbar. Wird durch den wachsenden Eisansatz nun auch der innere Mantel zerstört, ist eine unkontrollierte Mischung von Brenngas (H_2 oder CH_4) nicht mehr vermeidbar. Aus diesem Grund werden diese Medien, wo immer notwendig, mit einem weiteren Heliummantel umgeben. Aus Platzgründen und um das rücklaufende Medium als Vorkühlung für den Mantel des Vorlaufrohres zu nutzen sind daher die Flüssig-Wasserstoff führenden Leitungen zumindest im Ex-Schutzbereich vierfach coaxial ausgelegt (Abb. 4.2-5).

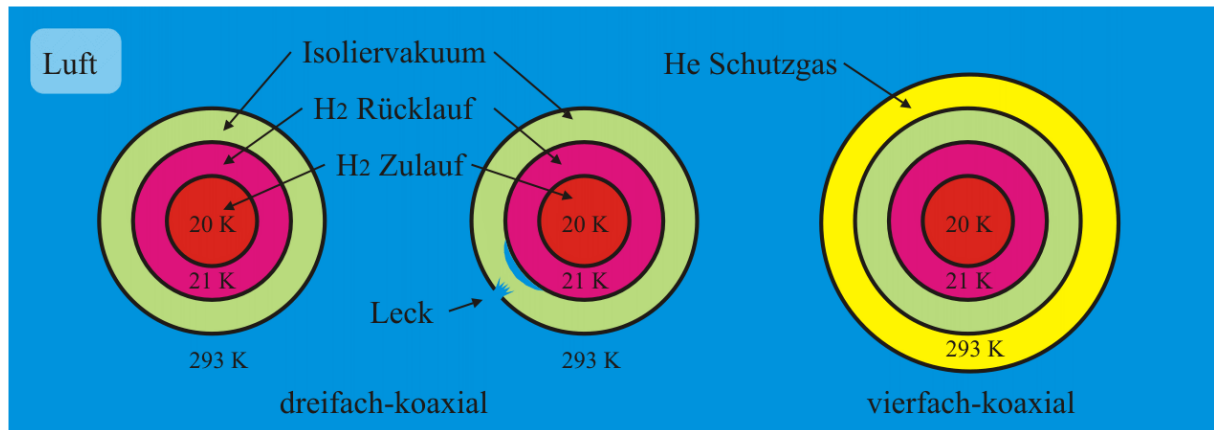


Abb. 4.2-5: Sicherheitsrelevanter vierfach koaxialer Einschluss von tiefkalten brennbaren Medien

Ein weiteres sicherheitsrelevantes Merkmal kryogener Medien stellt die Volumenzunahme bei Erwärmung auf Raumtemperatur dar. Treten bei einem Bruch einer solchen Leitung größere Mengen tiefkalter Gase in einen geschlossenen Raum aus, kommt es aufgrund der großen Dichtedifferenz zwischen fester bzw. flüssiger und gasförmiger Phase zu einer nicht unerheblichen Volumenvergrößerung und damit zu einem Druckaufbau. Geschlossene Räume, durch die tiefkalte Medien geführt werden, müssen daher immer entweder für den zu erwartenden Druckanstieg ausgelegt werden oder über ein Sicherheitsventil bzw. eine Berstscheibe abgesichert werden.

Radiologische Eigenschaften

Während die Bestrahlung von Wasserstoff lediglich zur Produktion von Deuterium und in geringen Spuren auch Tritium führt, neigt festes Methan nach einer gewissen Bestrahlungsdauer zu teilweise heftigen exothermen Reaktionen, die bis zur Zerstörung des Moderatorbehälters führen können [BEL 93]. Gleichzeitig lässt sich eine strahlungsinduzierte Produktion von Wasserstoffatomen feststellen. Als wahrscheinlichste Ursache für diese exotherme Reaktion wird z.Z. die Bildung von Radikale diskutiert. Durch die bei den tiefen Temperaturen verlangsamten Molekülbewegungen wird eine Rekombination der Radikale solange verhindert, bis eine ausreichende Radikaldichte für eine wieder ansteigende Rekombinationswahrscheinlichkeit sorgt. Die dann einsetzenden vereinzelt Rekombinationen laufen exotherm ab und haben eine lokale Temperaturerhöhung im Methan und damit eine erhöhte Molekülbeweglichkeit zu Folge, welche ihrerseits eine höhere Rekombinationswahrscheinlichkeit bewirkt. Die Rekombination der über einen längeren Zeitraum gebildeten Radikale läuft somit in einer Kettenreaktion ab und führt zu einer spontanen Freisetzung großer Mengen Energie. Erste Bestrahlungsversuche lassen für eine 5-Megawatt-Spallationsquelle eine maximal zulässige Standzeit von Methan im Strahlenfeld von weniger als 30 Minuten erwarten. In einem Feststoff-Methan-Moderator wird das feste Methan daher in regelmäßigen Abständen aus dem Moderatorbehälter entnommen und entsorgt oder aufbereitet und diesem wieder zugeführt. Die z.Z. laufenden Entwicklungen an einem Feststoff-Methan-Moderator sehen daher einen weitgehend horizontalen Transportweg für die Methan-Kugelschüttung als einzig sinnvolle Transportachse vor.

4.3. Einfluss der entstehenden Teilchenstrahlung

Die Art und Energie, und damit die Dosisleistung der entstehenden Strahlung hat Auswirkungen auf alle Materialien, die im Strahlenfeld benutzt werden sollen. Zudem müssen alle Bereiche, in denen mit Aufenthalt von Personen gerechnet werden muss, ausreichend im Sinne der geltenden Regeln und Verordnungen, abgeschirmt sein. Speziell die zulässigen Grenzwerte sind zum Teil deutlich von lokalen Gesetzen und Vorschriften des gewählten Standortes (Staat) sowie dem Errichtungszeitpunkt abhängig. Für die Auslegung soll in der hier vorliegenden Arbeit eine Errichtung der Quelle innerhalb Deutschlands gemäß den z.Z. gültigen Regelungen angenommen werden.

4.3.1. Strahlung und Strahlenschutz

Bei der Betrachtung der entstehenden und daher abzuschirmenden Strahlung muss zunächst zwischen den einzelnen Strahlungsarten unterschieden werden. Durch den Einschuss von hochenergetischen Protonen wird ein Spallationsprozess ausgelöst bei dem eine Vielzahl von Mesonen, Leptonen, Baryonen und Gamma-Quanten, aber auch Neutronen und schwerere Kernfragmente entstehen. In Rechnungen zur Optimierung der Neutronenausbeute sowie der notwendigen Abschirmdicken müssen nahezu alle bekannten Teilchenstrahlen berücksichtigt werden. Viele dieser Teilchen spielen aber aus der Sicht des Strahlenschutzes eine untergeordnete Rolle und können daher bei der ingenieurtechnischen Auslegung der Anlage unberücksichtigt bleiben. Im Folgenden werden die einzelnen Strahlungsarten, deren Auswirkungen auf die durch sie durchdrungene Materie sowie deren biologische Wirkung vereinfacht erläutert. Für weitergehende Informationen sei auf /KRI 98/ und /FIL 92/ verwiesen.

Alphateilchen

Alphastrahlen sind die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Heliumkerne. Im Gegensatz zum spontanen Zerfall nichtstabiler Nuklide weisen durch Spallation entstandene Alphateilchen ein breites Energiespektrum mit Energien bis über 100 MeV auf. Aufgrund seiner hohen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit ist die Reichweite eines Alphateilchens in Materie sehr gering. In Luft beträgt sie lediglich etwa 4 – 7 cm. Als Abschirmung für eine Alphastrahlung genügt daher meist schon ein Blatt Papier. Alphastrahler deponieren hohe Energiedosen innerhalb kleiner Volumina des durchstrahlten Materiales. Hauptproblem ist daher weniger die Abschirmung von Alphastrahlung als vielmehr die Unterbindung der Verschleppung von Alphastrahler enthaltender Kontamination und damit die Vermeidung der Aufnahme von Alphastrahlern in den menschlichen Körper (Inkorporation).

Betateilchen

Beim Betazerfall wird aus dem Kern eines Radionuklids ein Elektron abgegeben, welches bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton entsteht. Diese Elektronen mit einer Geschwindigkeitsverteilung von null bis nahezu Lichtgeschwindigkeit bilden dann die Betastrahlung. Die wichtigsten Wechselwirkungen von Betateilchen mit Materie sind die Ionisierung und die Erzeugung von Bremsstrahlung. Die Anzahl der erzeugten Ionenpaare pro Weglänge ist dabei 100 bis 1000 mal geringer als bei Alphateilchen. Die Reichweite von Betastrahlung in Materie ist deshalb größer und beträgt in Luft von einigen Zentimetern bis hin zu einigen Metern.

Gammastrahlung

Wird ein Energiequant aufgrund eines angeregten Kernzustandes ausgestrahlt, so handelt es sich um Gammastrahlung, welche abgesehen von der Art der Entstehung mit Röntgenstrahlung identisch ist. Bei der Gammastrahlung handelt es sich um eine energiereiche Wellenstrahlung in einem Wellenlängenbereich von etwa 10^{-9} bis 10^{-13} Meter. Dies entspricht einer Energie pro Gammaquant von etwa 3 KeV bis 17 MeV /VOL 03/. Im Gegensatz zu den Teilchenstrahlern kann für Gammastrahlung keine maximale Reichweite angegeben werden. Die Entfernung, nach der sich die Intensität der Gammastrahlung jeweils halbiert, beträgt in Luft ca. 30 bis 100 m, in menschlichem Gewebe immerhin noch 5 bis 15 cm.

Neutronen- und Protonenstrahlung

Abhängig von der Entstehungsart haben die bei Kernprozessen erzeugten Neutronen eine einheitliche Energie oder eine Energieverteilung zwischen Null und einem Höchstwert. Bei der Spallation entstehende Neutronen weisen eine Energieverteilung mit Energien bis zur Energie des eintreffenden Protons auf. Entsprechend ihrer Energie und damit Geschwindigkeit lassen sich die Teilchen grob in subthermische ($< 0,02$ eV), thermische ($0,0252$ eV / 2200 m/s), epithermische ($< 0,5$ eV), mittelschnelle ($0,5$ eV bis 10 keV) und schnelle (> 10 keV / > 1400 km/s) Neutronen einstufen. Neutronen mit Energien oberhalb von etwa 5 MeV werden aufgrund ihrer Geschwindigkeit ($> 10\%$ der Lichtgeschwindigkeit) als "relativistisch" bezeichnet /KRI 98/. Neutronen sind elektrisch neutral und können deshalb nicht mit den Atomhüllen des durchdrungenen Materials wechselwirken. Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Materie beruhen auf Zusammenstößen mit den Atomkernen. Die jeweilige Wechselwirkung ist abhängig von der Energie und damit der Geschwindigkeit der Neutronen. Schnelle und relativistische Neutronen führen meist zur Zertrümmerung (Spallation) des Targetkerns, wobei dieser in verschiedene kleine Bruchstücke zerfällt. Speziell langsame Neutronen können von Atomkernen des Wechselwirkungsmaterials eingefangen und damit absorbiert werden.

Ähnlich wie bei Gammaquanten kann auch für schnelle Neutronen keine endliche Reichweite in einem Wechselwirkungsmaterial angegeben werden. Protonen besitzen etwa dieselbe Masse wie Neutronen, verfügen zusätzlich jedoch eine elektrisch positive Ladung. Daher führen sie zusätzlich zu o.g. hadronischen Wechselwirkungen auch Interaktionen mit der Hülle der Atome des Wechselwirkungsmaterials aus. Verglichen mit Neutronen gleicher Energie ist ihre Reichweite daher klein. Da nahezu alle aus dem Beschleuniger stammenden Primärprotonen innerhalb des Target vollkommen gestoppt werden, können sie bei ingenieurtechnischen Auslegung der Targetumgebung vernachlässigt werden.

Biologische Wirkung und Strahlenschutz

Entscheidend für den Menschen und damit auch für den Strahlenschutz ist die biologische Wirkung, die die ionisierenden Strahlungen im menschlichen Organismus hervorrufen. Eine wichtige Größe im Strahlenschutz ist die Äquivalentdosis. Die in der durchstrahlten Materie deponierte Energie wird dabei mittels eines Wichtungsfaktors abhängig von der biologischen Wirksamkeit der Art und Energie der auftreffenden Strahlung bewertet. Die Äquivalentdosis ergibt sich daher aus dem Produkt der Energiedosis mit einem Strahlungswichtungsfaktor w_R . In Tabelle 4.3-1 sind die jeweiligen Strahlungswichtungsfaktoren w_R aufgelistet, wie sie von der Internationalen Strahlenschutz Kommission ICRP /ICRP 91/ veröffentlicht wurden.

Tabelle 4.3-1: Strahlungswichtungsfaktoren für verschiedene Strahlungsarten

Strahlenart und Energiebereich		Strahlungswichtungsfaktor w_R
Photonen (Gammaquanten), alle Energien		1
Elektronen (Betastrahlung), alle Energien		1
Neutronen	< 10 keV	5
	10 keV bis 100 keV	10
	100 keV bis 2 MeV	20
	2 MeV bis 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonen > 2MeV		5
Alphateilchen, schwere Kernfragmente		20

Während es über die Auswirkungen von höheren Äquivalentdosen (ab ca. 500 mSv) auf menschliches Gewebe gesicherte Erkenntnisse gibt, wird über die Wirkungen niedriger Äquivalentdosen noch wissenschaftlich diskutiert. In der Praxis des Strahlenschutzes geht man davon aus, dass auch eine geringe Dosis im Prinzip zu einer Schädigung führen kann. Allerdings ist das Risiko hierfür sicher umso kleiner, je kleiner die Dosis ist. Der Strahlenschutz geht daher weltweit nach dem "ALARA-Prinzip" vor. ALARA steht für "As Low As Reasonably Achievable". Das bedeutet: Maßnahmen, die ergriffen werden, um die Strahlenexposition so gering wie möglich zu halten, müssen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Faktoren vernünftig und sinnvoll sein. Insbesondere bedeutet dies, dass vorgegebene Strahlungsgrenzwerte nur ausgeschöpft werden dürfen, wenn eine weitere Reduzierung wirtschaftlich nicht vertretbar erscheint.

In der Praxis wird eine Optimierung durch drei Grundregeln des Strahlenschutzes erreicht. Im Einzelnen sind das:

1. Abschirmung der Strahlung durch geeignete Materialien,
2. Beschränkung der Aufenthaltsdauer in einem Strahlungsfeld,
3. Einhaltung eines sicheren Abstandes zur Strahlenquelle,

Grenzwerte

Für die Festlegung von Dosisgrenzwerten geht die ICRP (Internationale Strahlenschutzkommission) von drei Arten der Exposition aus:

- die berufliche Exposition, die auf Grund der Berufstätigkeit zustande kommt,
- die medizinische Exposition als Folge einer Diagnosestellung (Röntgendiagnostik, nuklearmedizinische Maßnahmen etc.) oder einer Strahlentherapie,
- die Exposition der Bevölkerung, die alle anderen Strahlenexpositionen (Kerntechnik, natürliche Strahlung etc.) umfasst.

Grundsätzlich gelten verschiedene Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und für Personen der Bevölkerung. Für die medizinische Strahlenanwendung gibt es keine Dosisgrenzwerte. Als beruflich strahlenexponiert gelten alle Personen, die bei ihrer Berufsausübung im Kalenderjahr eine höhere effektive Dosis als 1 mSv erhalten können. Für die Bevölkerung ist die zulässige Jahresdosis generell auf 1 mSv beschränkt. Der Grenzwert der effektiven Dosis beträgt für beruflich strahlenexponierte Personen 20 mSv im Kalenderjahr. Je nach der Dosis, die eine Person in einem Bereich durch äußere oder innere Strahlenexposition im Kalenderjahr erhalten kann, sind bestimmte Strahlenschutzbereiche festzulegen: Überwachungsbereich, Kontrollbereich oder Sperrbereich. Dabei wird üblicherweise aus der zulässigen Jahresdosis und der anzunehmenden maximalen Aufenthaltsdauer eine maximal zulässige Dosisleistung festgelegt. Bei der Festlegung von Überwachungs- und Kontrollbereich ist allgemein von einer Aufenthaltsdauer von Personen von 2000 Stunden im Jahr auszugehen, da hier der Zugang administrativ auf diese Dauer beschränkt werden kann. Bei der zulässigen effektiven Dosisleistung für die Bevölkerung ist hingegen von einer unbeschränkten Aufenthaltsdauer von 8760 Stunden pro Jahr auszugehen.

Kontrollbereiche dürfen nur zur Durchführung oder Aufrechterhaltung der vorgesehenen Betriebsvorgänge betreten werden. Bei Personen, die sich in Kontrollbereichen aufhalten, sind die Körperdosen - üblicherweise mit einem amtlichen Dosimeter - zu bestimmen. Sperrbereiche sind Bereiche innerhalb eines Kontrollbereichs, in denen die Ortsdosisleistung höher als 3 mSv/h sein kann. Personen darf der Aufenthalt in einem Sperrbereich nur erlaubt werden, wenn sie unter der Aufsicht einer beauftragten fachkundigen Person zur Durchführung vorgesehener Betriebsvorgänge oder aus zwingendem Grund tätig werden müssen. Tabelle 4.3-2 zeigt die einzelnen Strahlenschutzbereiche im Überblick.

Tabelle 4.3-2: Strahlenschutzbereiche gemäß Strahlenschutzverordnung /SSV 01/

Strahlenschutzbereiche	Grenzwerte für effektive Dosis	Betrachtungszeitraum	max. zulässige Dosisleistung	gemäß StrlSchV /SSV 01/
Kein Schutzbereich Außerhalb des Betriebsgeländes	effektive Dosis $\leq 1 \text{ mSv/a}$	8760h / a	$\leq 0,1 \text{ }\mu\text{Sv/h}$	
Betriebsgelände, allgemeines Staatsgebiet	effektive Dosis $\leq 1 \text{ mSv/a}$	2000h / a	$\leq 0,5 \text{ }\mu\text{Sv/h}$	Abschnitt 3 § 36-§ 41
Überwachungsbereich	effektive Dosis $> 1 \text{ mSv/a}$ $\leq 6 \text{ mSv/a}$	2000h / a	$\leq 3,0 \text{ }\mu\text{Sv/h}$	Abschnitt 3 § 36-§ 41
Kontrollbereich	effektive Dosis $> 6 \text{ mSv/a}$ $\leq 20 \text{ mSv/a}$	2000h / a	$\leq 10 \text{ }\mu\text{Sv/h}$	Abschnitt 3 § 36-§ 41
Sperrbereich	Ortsdosisleistung $> 3 \text{ mSv/h}$	entfällt	nicht festgelegt	Abschnitt 3 § 36-§ 41

4.3.2. Abschirmung hochenergetischer Neutronen

Je nach Art der Entstehung der Neutronen weisen unterschiedliche Quellen gänzlich verschiedene Neutronenspektren auf. Im Gegensatz zum konventionellen Spaltreaktor ist bei Spallationsquellen mit Neutronenenergien bis zur Energie der eintreffenden Protonen und damit bei der hier diskutierten Anlage bis zu 1,3 GeV zu rechnen. Abb. 4.3-1 zeigt einen Vergleich verschiedener Neutronenspektren, wie sie bei der Spaltung, bei der Fusion und bei der Spallation zu erwarten sind. Während sowohl niederenergetisch ungeladene Teilchen als auch hochenergetische, geladene Teilchen nur kurze Reichweiten besitzen, stellt der Schutz vor hochenergetischen Neutronen die größte Herausforderung bei der Auslegung der Abschirmung dar.

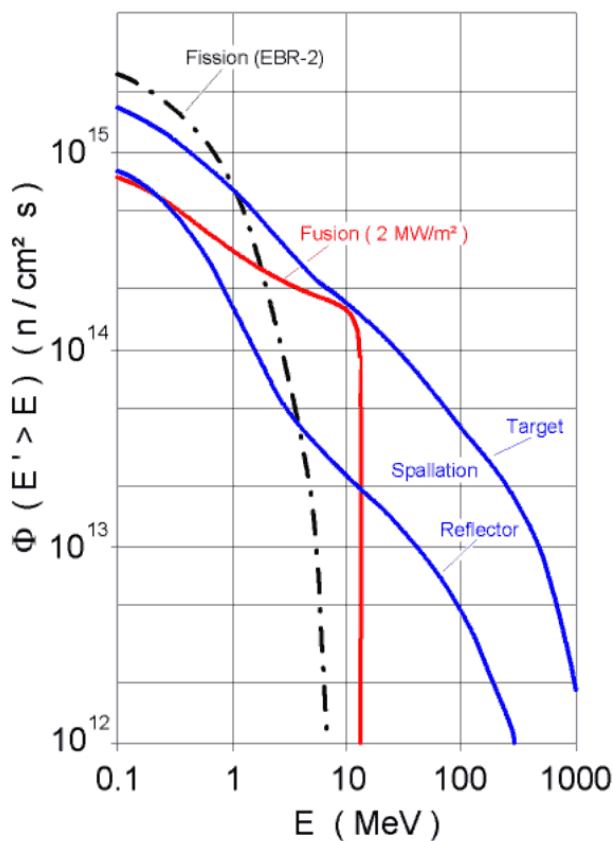


Abb. 4.3-1: Neutronenspektren verschiedener Quellen /GAS 02/

Neutronen mit Energien bis etwa 20 MeV lassen sich effektiv mit wasserstoffhaltigen Substanzen (z.B. Wasser, Polyäthylen, Paraffin) streuen und abbremsen (moderieren). Durch elastische Stoßvorgänge mit den praktisch massengleichen Wasserstoffkernen verlieren die Neutronen dabei innerhalb weniger Stoßvorgänge einen Großteil ihrer Energie. Diese niederenergetischen Neutronen werden in einer nachfolgenden Schicht durch Neutroneneinfang unter Entstehung von Gammastrahlung vernichtet. Eine dritte Schicht aus hochschweren Materialien wie Blei oder Eisen dient dann zur weitgehenden Reduktion dieser Sekundär-gammastrahlung. Die für typische Spaltungsspektren und -intensitäten benötigten Moderator-dicken liegen bei der Verwendung von Wasser bei etwa 1 bis 2 m. Alternativ werden für diese Energiebereiche auch Betonabschirmungen verwendet, in denen das Wasser, und damit der Wasserstoff in chemisch gebundener Form vorliegt.

Neutronen mit Energien über 100 MeV, wie sie beim Hochenergiebeschleuniger durch Strahlverluste sowie bei Spallationsquellen vorkommen, verlieren dagegen nur sehr wenig Energie und ändern bei Stoßvorgängen ihre Bewegungsrichtung kaum. Eine Moderation mittels elastischer Streuung an Wasserstoff würde daher zu technisch wenig sinnvollen Abschirmdicken führen. Extrem schnelle Neutronen können daher effektiv nur durch inelastische Stoßvorgänge mit schweren Atomkernen gestoppt werden. Dieser inelastische Stoßvorgang resultiert jedoch in einer Kaskade von weiteren Teilchen und Gammaquanten niedriger Energie. Dies führt dazu, dass in jedem Punkt der Abschirmung durch die neu entstandene Sekundärstrahlung bei gleich bleibendem Abschirmmaterial in etwa das gleiche Gleichgewichtsspektrum vorherrscht /FIL 00/. Für Energiebereiche oberhalb von 20 MeV liegen jedoch nur wenige experimentelle Daten zur Validierung von Berechnungsmethoden vor /NAK 00/. Deshalb werden zur Auslegung von Abschirmungen für hochenergetische Neutronen komplexe Rechenmodelle eingesetzt /WOL 96/ /MOL 91/.

Während langsame Neutronen längs ihres Flugweges durch elastische und inelastische Stoßvorgänge sukzessive an Energie verlieren, nimmt die Neutronenpopulation relativistischer Neutronen beim Durchgang durch das Wechselwirkungsmaterial exponentiell ab, wobei das Energiespektrum in etwa erhalten bleibt. In Abhängigkeit vom Material kann somit eine Wegstrecke angegeben werden, nach der die Neutronenpopulation um den Faktor e abgenommen hat. Diese wird allgemein als Abschwächungslänge bezeichnet und ist für Abschirmungen mit Dicken oberhalb 3 Meter nahezu konstant und nur vom verwendeten Abschirmmaterial abhängig. Die Abnahme der Anzahl der Neutronen beim Durchgang durch Materie erfolgt damit für den eindimensionalen Fall gemäß folgender Formel:

$$N(x) = N_o \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (\text{mit } \lambda = \text{Abschwächungslänge}) \quad [1]$$

Der Neutronenfluss in einer zylindrischen bzw. kugelförmigen Abschirmung kann daher vereinfacht nach

$$F(r, x) = \frac{S \cdot B \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}}{r^2} \quad \text{für Punktquellen} \quad [2]$$

und

$$F(r, x) = \frac{S \cdot B \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}}{r} \quad \text{für Linienquellen} \quad [3]$$

berechnet werden, wobei S die Intensität der Neutronenquelle, B den Aufbaufaktor, x die Dicke der betrachteten Abschirmung und r den Radius zwischen Messpunkt und Quelle darstellt. Der Aufbaufaktor berücksichtigt dabei den Umstand, dass sich der Neutronenfluss in der Abschirmung in direkter Quellnähe zunächst aufbaut, bis ein Gleichgewichtsspektrum erreicht ist, bevor es zu einem exponentiellen Abfall kommt, der sich durch die Abschwächungslänge beschreiben lässt. Für Gesamtabschirmdicken von mehreren Metern spielt der

Aufbaufaktor eine untergeordnete Rolle und kann für erste Abschätzungen vernachlässigt werden.

Für ESS-relevante Energien ergeben sich Werte für die Abschwächungslänge von etwa 18-20 cm für Eisen, 50 cm für Beton und 60 cm für Erdreich /SCH 96/. Eine Betonabschirmung wäre also bei gleicher Abschirmwirkung etwa 2,5 mal dicker als eine Eisenabschirmung. Gerade für die Abschirmung von hochenergetischen Neutronen sind daher schwere, hochdichte und bedingt durch die großen zu verwendenden Massen trotzdem preiswerte Materialien gefragt. Spielt die räumliche Ausdehnung der Abschirmung keine Rolle, stellen Beton oder Schwerbeton (versetzt mit Stahlgranulat) die preisgünstigste Lösung dar. Besteht jedoch die Forderung nach einer möglichst kompakten, wenig Platz beanspruchenden Abschirmung, empfiehlt sich die Verwendung von Fe-basierten Materialien.

Ausgerechnet die Kurve für den Wirkungsquerschnitt von Reineisen zeigt einen deutlichen Einbruch im Bereich von ca. 25 keV (Abb. 4.3-2). Dieses Phänomen bezeichnete man auch als 25-keV Eisen-Fenster. In der unmittelbaren Nähe dieser Energie wechselwirken Neutronen weit weniger mit dem Abschirmmaterial als dies die zuvor genannten Richtwerte für die Abschwächungslänge erwarten lassen. Gemessene Werte des aus der Reineisenabschirmung austretenden Neutronenflusses der Spallationsquelle IPNS-I in Argonne/USA bestätigen dieses Verhalten /CAR 81/. Da sich dieses Phänomen aber auf einen sehr schmalen Energiebereich beschränkt, sind schon kleine Verunreinigungen anderer Elemente, wie sie im normalen Stahl als Legierungsbestandteile ohnehin vorkommen, ausreichend, um diesen Effekt signifikant zu unterdrücken und so das Eisen-Fenster zu schließen.

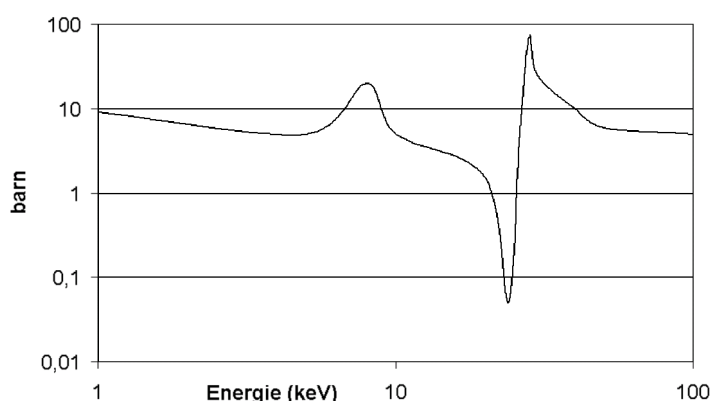


Abb. 4.3-2: Wirkungsquerschnitt für die Wechselwirkung von Neutronen mit Fe (/GAR 76/)

Hauptproblem bei der rechnerischen Auslegung der Abschirmungen einer Hochleistungs-spallationsquelle ist neben der teilweise fehlenden Datenbasis für das Verhalten relativistischer Neutronen auch die große geforderte Abschirmwirkung mit einer Reduktion des Neutronenflusses um mehr als 13 Größenordnungen. Kleine Ungenauigkeiten führen somit zu großen Fehlern im Gesamtergebnis. Zur Berechnung der Abschirmung werden verschiedene Computermodelle eingesetzt. Die Monte-Carlo-Methode verfolgt jedes einzelne Teilchen anhand seiner statistischer Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit dem Abschirmmaterial unter Nutzung von kernphysikalischen Gesetzmäßigkeiten anstatt experimentell ermittelter Wirkungsquerschnitte. Vergleichbar mit Finite-Element-Methoden lässt sich dabei die dreidimensionale Geometrie der Abschirmung theoretisch beliebig genau berücksichtigen. Hauptproblem dieser Methode ist, dass bei den geforderten hohen Abschirmwirkungen in den

Außenbereichen der Abschirmung, auch im Computermodell wenige Teilchen vorhanden sind und damit nur schlechte statistische Aussagen vorliegen.

Ein anderer Weg ist die Berechnung der Abschwächung der Strahlung unter Ausnutzung deterministischer Methoden. Hierfür sind jedoch die experimentell ermittelten Wirkungsquerschnitte für hohe Teilchenenergien zumindest für die eingesetzten Abschirmmaterialien notwendig. Zudem ist die Ermittlung der bei der Spallation erzeugten richtungsabhängigen Neutronenspektren und -intensitäten mit diesem Verfahren nicht möglich. Einen Ausweg stellt hierbei die sog. Kopplungsmethode dar (CASL – Computer Aided Shielding Layout) /WOL 96/. Hierbei wird nur der innere (quellnahe) Bereich mittels der Monte-Carlo-Methode behandelt. Die dabei gewonnenen Daten werden in einem zweiten Schritt an den deterministischen Code übergeben, in dem dann mit vertretbarem Rechenaufwand auch die weiter von der Quelle entfernten Strukturen behandelt werden können /FIL 00/.

4.3.3. Aktivierung, Strahlenschädigung und Wärmedeposition

Die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie kann abhängig von Intensität und Art der Strahlung sowie der Art des verwendeten Materials zu mehr oder weniger ausgeprägter Aktivierung, Strahlenschädigung und Wärmedeposition führen. Während die Aktivierung der verwendeten Materialien für die Handhabung und Entsorgung relevant ist, führt die Strahlenschädigung zur Verkürzung der Lebensdauer der betroffenen Komponenten. Die Wärmedeposition ist im Wesentlichen für die quellnahen Bereiche von Bedeutung. Bei sehr hohen Quellintensitäten, wie es bei einer Spallationsquelle der Megawattklasse in direkter Targetnähe der Fall ist, führt dies zu teilweise nicht unerheblichen Kühlproblemen.

Aktivierung

Aktivierung ist die strahlungsinduzierte Erzeugung von radioaktiven Nukliden im nicht radioaktiven Ausgangsmaterial. Die in Spallationsquellen auftretenden hohen Teilchenflüsse und -energien führen zu Aktivierungen, wie sie zum Teil aus Beschleunigeranlagen bekannt sind. Neben der Teilchenenergie hängt die Art der erzeugten Nuklide und deren Produktionsrate von der Zusammensetzung bzw. Verunreinigung des Ausgangsmaterial ab. Tabelle 4.3-3 listet eine Reihe üblicher Konstruktionsmaterialien auf und nennt die typischerweise entstehenden Nuklide mit Halbwertszeiten zwischen 10 Minuten und mehreren Jahren.

Nuklide mit kürzeren Halbwertszeiten können z.B. für die Betrachtung von Handhabungsvorgängen vernachlässigt werden, da ihre Aktivität schon wenige Stunden nach Abschalten der Quelle auf einen Bruchteil abgeklungen ist. Die Aktivität von wesentlich längerlebigen Nukliden dagegen trägt üblicherweise nicht mehr nennenswert zur Dosisleistung bei. Reine β -Emitter in Festkörpern spielen ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da aufgrund der Selbstabschirmung nur die oberflächennahen Atome zur messbaren Dosisleistung beitragen. Die meisten der unten aufgeführten Nuklide sind Endprodukte einfacher Kernreaktionen wie z.B. (γ, xn) , (p, xn) , (n, xp) oder (p, pn) . Mit steigender Teilchenenergie erhöht sich aber auch die Produktionsrate von Spallationsprodukten wie z.B. Na-22 in rostfreiem Stahl. Die hier beschriebenen Aktivierungsprodukte beziehen sich auf die verwendeten Konstruktionsmaterialien. Für Aktivierungen der benutzten Fluide Quecksilber, Wasser sowie Luft und andere Gase sei auf Kap. 4.2 verwiesen.

Tabelle 4.3-3: Typische Aktivierungen bei Beschleunigeranlagen /PAT 73/

Ausgangsmaterial	Nuklid	Halbwertszeit
Kunststoffe und andere organische Materialien	Be-7	53,6 Tage
	C-11	20,4 Minuten
Aluminiumlegierungen (zusätzlich alle weiter oben genannten)	F-18	110 Minuten
	Na-22	2,6 Jahre
	Na-24	15 Stunden
Stahl (zusätzlich alle weiter oben genannten)	K-42	12,47 Stunden
	K-43	22,4 Stunden
	Sc-44	3,92 Stunden
	Sc-44m	2,44 Tage
	Sc-46	84 Tage
	Sc-47	3,43 Tage
	Sc-48	1,83 Tage
	V-48	16 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	45,1 Tage
Rostfreier Stahl (wie Stahl, zusätzlich)	Co-60	5,27 Jahre
	Ni-57	37 Stunden
	Cu-60	24 Minuten
Kupfer (zusätzlich alle weiter oben genannten)	Ni-65	2,56 Stunden
	Cu-61	3,33 Stunden
	Cu-62	9,8 Minuten
	Cu-64	12,82 Stunden
	Zn-63	38,3 Minuten
	Zn-65	245 Tage

Rechnungen zeigen, dass die dominierenden langlebigen Aktivitäten in Stahlkomponenten, die nicht direkt dem Protonenstrahl ausgesetzt sind, durch Mn-54, Fe-55 und einige Kobaltisotope hervorgerufen werden, wobei als relevante Gammaemitter Mn-54 und Co-56 zu nennen sind. Sowohl Co-56 als auch Mn-54 sind Spallationsprodukte. Das dominierende kurzlebige Radionuklid ist Mn-56, welches durch Neutroneneinfang aus Mn-55 entsteht /GAL 03/. Damit bleibt als einzige wirtschaftlich vertretbare Maßnahme zur Reduzierung der Aktivierung von Strukturmaterialien die Reduktion der Kobaltverunreinigungen. Für üblichen Stahlguss ist eine Limitierung auf unter 100 ppm erreichbar, bei der Verwendung von Recyclingmaterial (siehe Kap 5.3) liegt die wirtschaftlich sinnvolle erreichbare Grenze bei ca. 200 ppm /SIM 02/.

Strahlenschädigung

Durch die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie wird diese nicht unerheblich in ihrem Aufbau geschädigt. Verschiedenartige Materialien weisen unterschiedliche Schädigungsraten unter Bestrahlung auf. Grundsätzlich sind anorganische Materialien und insbesondere Metalle wesentlich unempfindlicher als organischen Materialien. Daher werden in direkter Targetnähe aufgrund der dort vorherrschenden hohen Strahlungsintensitäten ausschließlich Metalle

eingesetzt, wogegen in den Außenbereichen der Abschirmung sowie in der Heißen Zelle durchaus ausgesuchte organische Materialien zum Einsatz kommen können. Die Art der verwendeten Materialien und deren Verhalten unter der vorherrschenden Strahlung beeinflussen daher die Lebensdauer der daraus gefertigten Komponenten und damit die Wechsel- bzw. Prüfintervalle und somit in nicht unerheblichem Maße die Betriebskosten der Anlage. Daher ist es wichtig bei der Auswahl der Konstruktionsmaterialien diesem Umstand Rechnung zu tragen.

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Mechanismen der Strahlenschädigungen /ES3 02/. Im ersten Fall überträgt das Strahlungsteilchen seine Energie auf ein Atom der Materie, welches dadurch aus seiner ursprünglichen Lage an einen anderen Ort verschoben wird und eine Lücke in der betroffenen Materie hinterlässt. Hierzu ist eine Mindestanregungsenergie nötig von typischerweise einigen 10 eV nötig. Bei höheren Energien kommt es zu einer Kaskade von Verschiebungen innerhalb des betroffenen Bereiches. Als Maß für die Schädigung wird die Anzahl der verschobenen Atome bezogen auf deren Gesamtzahl verwendet (dpa – displacements per atom). Ein Wert von 1 dpa bedeutet, dass statistisch gesehen jedes Atom der Materie einmal von seinem ursprünglichen Platz verschoben wurde.

Die zweite Auswirkung von Strahlung auf Materie ist die Bildung von Fremdatomen durch inelastische Wechselwirkungen, die zu einer Änderung der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials führt. Die Wirkungsquerschnitte für diese Reaktionen erreichen oberhalb einiger MeV signifikante Werte. Änderungen in den Materialeigenschaften werden dabei durch verschiedene Effekte ausgelöst. Die Erzeugung von Fremdatomen führt u.a. zur Änderung der Mikrostruktur des Materials. Insbesondere werden durch (n, α)- und (p, α)-Reaktionen Heliumblasen gebildet, die sich bevorzugt an den Korngrenzen von Metallen ansammeln und damit zur Versprödung beitragen. Die dabei entstehenden Reaktionsprodukte haben üblicherweise Energien im MeV-Bereich und führen daher ihrerseits zu Verschiebungen von Atomen im Material (dpa).

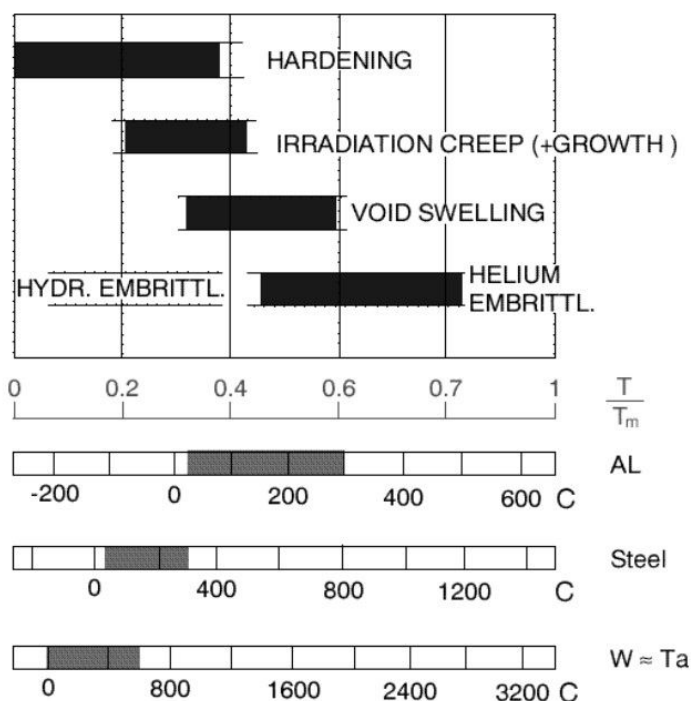


Abb. 4.3-3: Arten der Materialschädigung in Abhängigkeit von der Temperatur /ES3 97/

Auswirkungen von Strahlenschäden in Strukturmaterialien können Versprödung, strahleninduziertes Kriechen oder Volumenzunahme (Schwellen) sein (Abb. 4.3-3). Bei den gängigen technisch genutzten Metallen nimmt üblicherweise die Bruchfestigkeit bei gleichzeitig verringerter Bruchdehnung zu. Unterhalb einer bestimmten Bruchdehnung kann ein Material aber nicht mehr als ausreichend duktil angesehen werden und ist somit trotz der erhöhten Bruchfestigkeit technisch nicht mehr einsetzbar. Aufgrund der Beweglichkeit der Atome in ihrem Verband treten bei erhöhter Temperatur zum Teil Ausheilungserscheinungen auf. Bei einigen Materialien wird beobachtet, dass ein Anlassvorgang nach erfolgter Strahlenschädigung die Bruchdehnung ohne Verminderung der Bruchfestigkeit wieder heraufsetzt. Das Material wird daher sogar „besser“ als in seinem unbestrahlten Zustand.

Da diese Untersuchungen z.Z. noch nicht abgeschlossen sind, wird im weiteren jedoch von der Notwendigkeit ausgegangen eine Komponente zu ersetzen, wenn die Strahlenschädigung einen nicht mehr zu tolerierenden Wert überschreitet. Die Reaktion eines Materials auf eine Strahlendosis ist daher eine Funktion der Art des Materials, der Art der Strahlung, der Strahlungsintensität, der Temperatur (Abb. 4.3-4) und zum Teil der Belastungshistorie und ist daher komplex und wird vorwiegend durch entsprechende Experimente bestimmt.

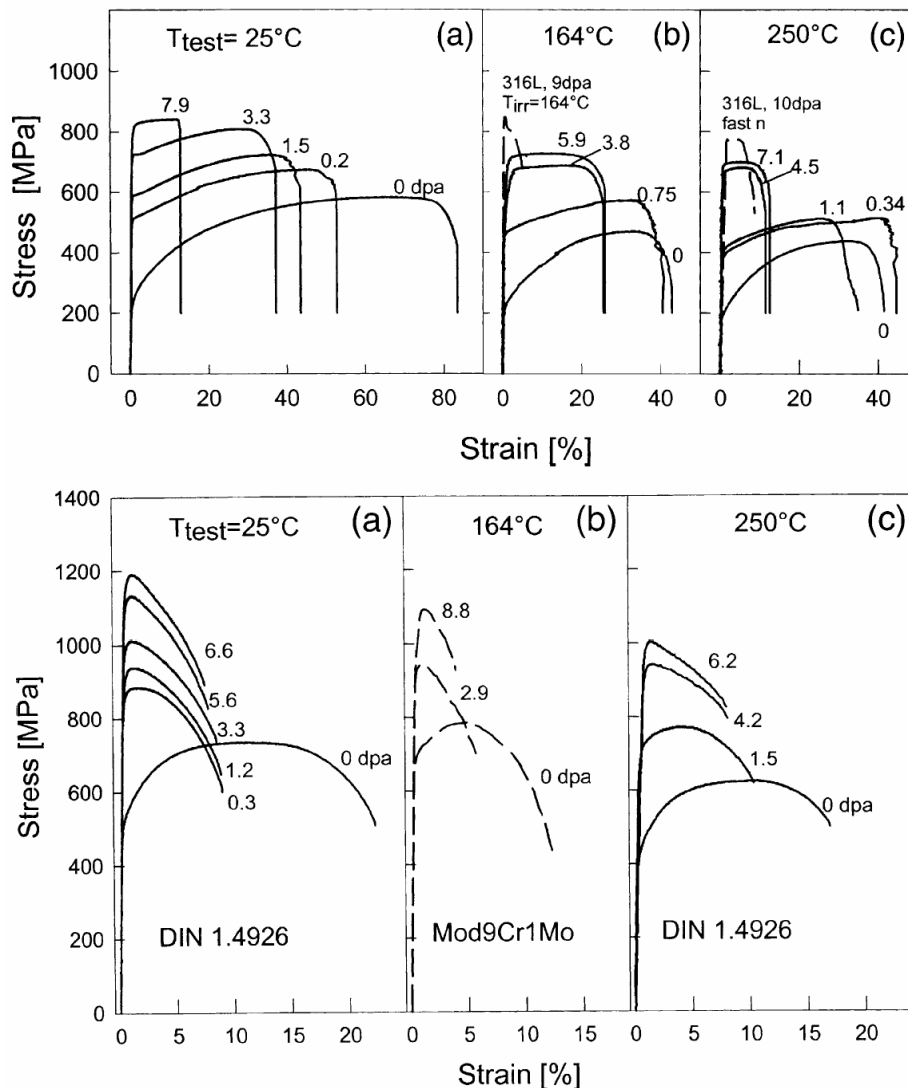


Abb. 4.3-4: Strahlenschädigung von Inconel 718 und 1.4926 /CHE 03/

Als Vergleichswerte werden die mittlere Atomverschiebung (dpa) sowie die Produktionsraten von He und H herangezogen. Für viele Materialien wurden und werden Daten über die Veränderung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit diese Werte in Bestrahlungsversuchen ermittelt. Abb. 4.3-4 zeigt beispielhaft die Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Inconel 718 und 1.4926 unter Bestrahlung. Für weitere Informationen sei auf /FIL 96/ verwiesen.

Typische Strahlenschädigungsraten für Strukturmaterialien in unmittelbarer Nähe des Spallationstargets sind in Tabelle 4.3-4 angeben. Bei der Bewertung der Strahlenschädigungsraten ist jedoch zu beachten, dass die zulässige Schädigung vom Material abhängig ist. Während bei handelsüblichen rostfreien Stählen eine Schädigung im Bereich von 1 bis 5 dpa nicht überschritten werden sollte, können speziell für den Einsatz im Strahlenfeld entwickelte Stähle durchaus bis zu 20 dpa eingesetzt werden. Für Aluminium liegen positive Erfahrungswerte bis in den Bereich von 100 dpa vor. Wie in Abb. 4.3-4 zu sehen ist, nimmt typischerweise die Zugfestigkeit des Materiales mit zunehmender Schädigung zu, während die Bruchdehnung abnimmt. Die Entscheidung, bis zu welchen Schädigungswerten ein Material genutzt werden kann, hängt daher stark von der Art der Belastung sowie von der Sicherheitsrelevanz der betrachteten Komponente ab.

Tabelle 4.3-4: Strahlenschädigung für Strukturmaterialien in unmittelbarer Nähe des Spallationstargets /FIL 03/

Komponente	Material	Schädigungsrate	
Target Fenster	Stahl	3,2 E-01 dpa / Tag	57,6 dpa / Jahr*
Moderator (Strukturmaterial)	Aluminium	1,1 E-01 dpa / Tag	19,8 dpa / Jahr*
Reflektor	Blei	2,9 E-03 dpa / Tag	0,52 dpa / Jahr*

*1 Betriebsjahr entspricht 180 Tagen Strahlzeit

Organische Materialien werden typischerweise in weniger strahlenbelasteten Bereichen eingesetzt. Für diese Materialien existieren eine Reihe von experimentell ermittelten Daten /CER 82/ über die zulässige akkumulierte Dosis bis zu der mit einem problemfreien Betrieb, für das entsprechende Material und die geforderte Funktion gerechnet werden kann. Diese zulässigen Dosen reichen von ca. 10^3 Gray für Teflon (PTFE) über 10^8 Gray für Polyethylen, bis zu 5×10^9 Gray für Kapton (PI). Kommerziell erhältliche, so genannte „strahlenharte“ Komponenten (z.B. Kameras, Messwertgeber, etc.) hingegen sind von Seiten des Herstellers für eine bestimmte akkumulierte Dosis zertifiziert.

Wärmedeposition

Durch Wechselwirkung von Strahlung mit Materie gibt die Strahlung einen Teil ihrer Energie an die Materie ab. Insbesondere aufgrund der sehr hohen Neutronenflüsse mit hohen Energien im inneren Teil der Abschirmung ist mit einer nicht unerheblichen spezifischen Wärmedeposition zu rechnen. Abb. 4.3-5 zeigt die mittels Teilchentransportsimulation ermittelten Wärmedepositionen für den Bereich bis zu einem Radius von 130 cm um das Target.

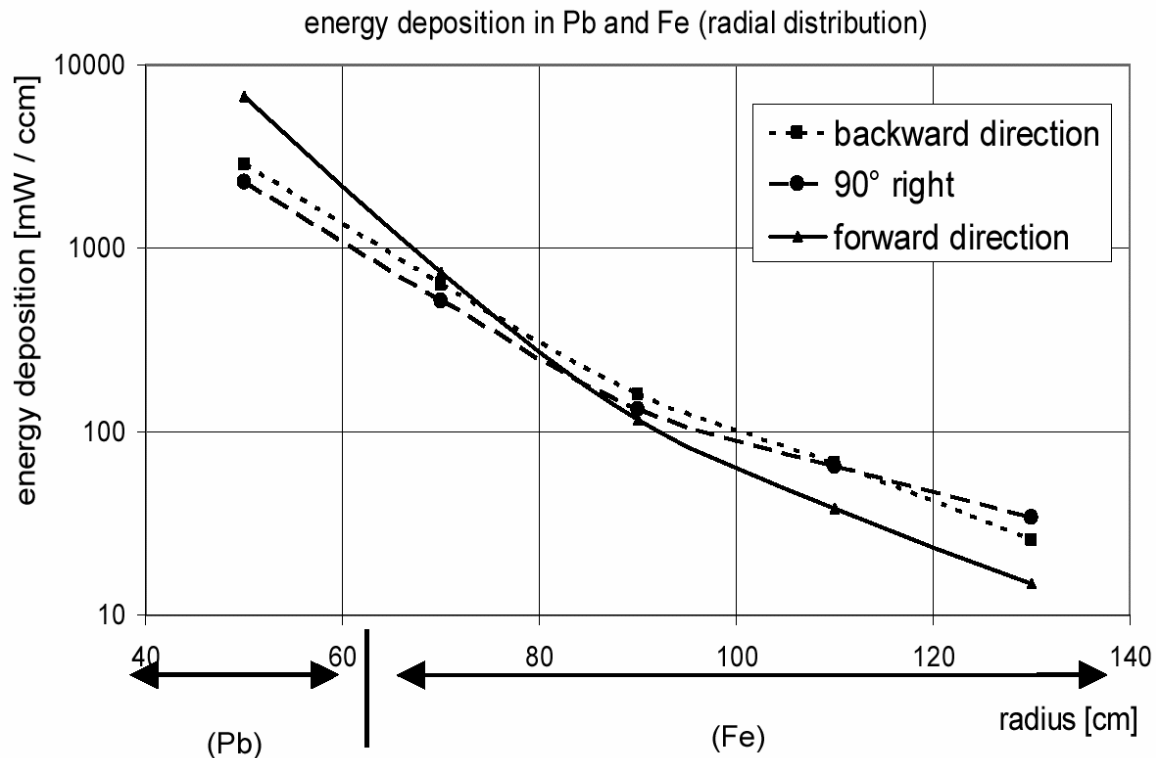


Abb. 4.3-5: Wärmedeposition in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle /FIL 03/

Mit Ausnahme eines sehr targetnahen Bereiches kann die Wärmedeposition innerhalb der Abschirmung vereinfacht für erste ingenieurtechnische Vorauslegungen als exponentiell, mit der Entfernung von der Quelle abnehmend angenommen werden. Damit gilt für die spezifische Wärmedeposition im Abstand r zur Quelle annähernd:

$$q(r) = 6,3 \text{ (W / cm}^3\text{)} \cdot e^{-0,046 \cdot r} \quad (r \text{ in cm}) \quad [4]$$

für die Vorwärtsrichtung und

$$q(r) = 5 \text{ W / cm}^3 \cdot e^{-0,04 \cdot r} \quad (r \text{ in cm}) \quad [5]$$

für die 90°- und Rückwärtsrichtung, jeweils bezogen auf den eintreffenden Protonenstrahl. Für die endgültigen thermodynamischen Auslegungen ist jedoch eine genauere Berechnung unter Berücksichtigung der realen Geometrien notwendig. Tabelle 4.3-5 zeigt die ermittelten Wärmeeinträge für relevante Bauteile und Systeme /FIL 03/.

Tabelle 4.3-5: Wärmedeposition im Target, den targetnahen Komponenten sowie der Abschirmung /FIL 03/

Komponente	Wärmeeintrag	Berechnet durch
Targetmaterial (Quecksilber)	2260 kW	HETC-Jül MC4
Targethülle (Stahl)	118,2 kW	HETC-Jül MC4
Moderatorbehälter (Aluminium)	2,9 kW	HETC-Jül MC4
Moderatormaterial (H ₂ O)	7,2 kW	HETC-Jül MC4
Reflektor (Blei)	871 kW	HETC-Jül MC4
Innere Abschirmung (Stahl 0,6 m < r < 1,6 m)	~1400 kW	Num. Integr. Formel [4] , [5]
Äußere Abschirmung (Stahl 1,6 m < r < 5 m)	~100 kW	Num. Integr. Formel [4] , [5]
Äußere Abschirmung (Stahl r > 5 m)	~10 W	Num. Integr. Formel [4] , [5]

4.3.4. Neutronenstrahlauskopplung

Die in den Moderatoren auf die gewünschte Nutzenergie heruntermoderierten Neutronen verlassen die massive Abschirmung bzw. das Einschussystem des Targets durch geeignete Neutronenstrahlrohre und gelangen so zum jeweiligen Instrument bzw. der dort zu untersuchenden Probe. Diese Neutronenstrahlrohre können zum einen entweder als Kollimatoren (Blenden) oder geeignete Neutronenleiter, bzw. als Kombination beider Möglichkeiten jeweils mit direktem Sichtkontakt zum Moderator (line-of-sight) ausgeführt werden. Zum anderen können gebogene Neutronenleiter mit extrem großen Biegeradien von einigen 10 bis 100 m eingesetzt werden, die einen direkten Sichtkontakt zwischen Moderator und Probe verhindern. Da der Totalreflektionswinkel für Neutronen an der Wand eines Neutronenleiters unter anderem von der Wellenlänge und damit der Energie der Neutronen abhängig ist, leiten die gebogenen Neutronenleiter, abhängig von ihrem Biegeradius, nur langsame Neutronen oberhalb einer bestimmten Wellenlänge. Neutronen höherer Energie verlassen den Leiter ohne reflektiert zu werden und werden in der den Leiter umgebenden Abschirmung absorbiert. Gebogene Leiter benötigen daher auf der gesamten Länge eine massive Abschirmung. Da sich erfahrungsgemäß auch nach der Erstinbetriebnahme der Quelle die Forderung nach anderen, neu entwickelten Strahlauskopplungsmethoden ergeben wird und ein nachträglicher grundsätzlicher Umbau im Bereich der massiven Targetabschirmung kaum möglich ist, sollte bei der Konzeption des Abschirmblockes im Bereich der Strahlrohre eine möglichst große Flexibilität bezüglich verschiedener Strahlauskopplungsmethoden vorgesehen werden.

Neutronenleiter (Abb. 4.3-6) sind aus technischen Gründen aus mehreren Segmenten aufgebaut. Bestehen beim Übergang von einem auf den nächsten Leiterabschnitt Lateral- oder Winkelversätze, entstehen zum einen hohe Strahlverluste und damit Intensitätsverluste an der Probe, zum anderen bewirken die nicht weiter geleiteten Neutronen eine nicht unerhebliche Streustrahlung. Bei innerhalb der Instrumenthalle frei aufgebauten, segmentierten Neutronenstrahlrohren werden daher typische maximale Lateralversätze von ca. 0,02 mm angestrebt. Innerhalb einer massiven Abschirmung sind dagegen größere Versätze zulässig, wenn auch unerwünscht.

Auch im Bereich der Strahlrohre muss der sichere Einschluss jederzeit gewährleistet sein. Hierzu werden üblicherweise doppelwandige, dünne Aluminiumfenster eingesetzt, die

einerseits wenig der nutzbaren Neutronen absorbieren oder streuen und andererseits einen überwachbaren Zwischenraum zur Verfügung stellen.

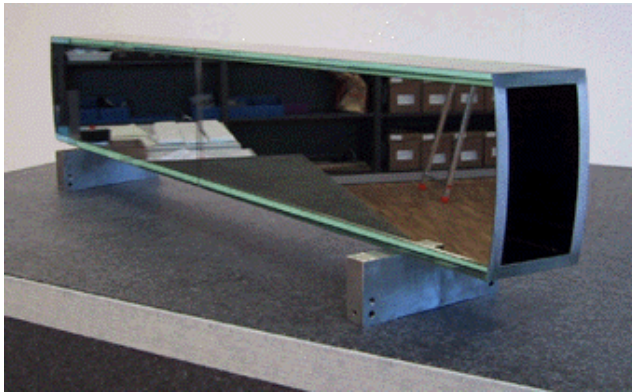


Abb. 4.3-6: Neutronenleiter

Um einen Wechsel der Proben am Instrument oder gar den Umbau bzw. Änderungen am Instrument vornehmen zu können, sollte sich der Neutronenfluss an jedem Instrument unabhängig vom Betrieb der Gesamtanlage an- und abschalten lassen. Daher stellt sich die Forderung nach je einem unabhängigen Verschluss pro Strahlrohr. Bei geschlossenem Strahlrohr sollte die Dosisleistung am Ort der Probe auf einen Wert reduziert werden, der einen möglichst unlimitierten Zugriff auf selbige zulässt. Des weiteren sollte sich bei einem unbenutzten Strahlrohr durch den Aufbau zusätzlicher mobiler Abschirmung der von diesem Strahlrohr ausgehende Strahlungsuntergrund in der Instrumenthalle auf zulässige Werte reduzieren lassen. Als akzeptabler Wert für die Auslegung der Strahlverschlüsse hat sich hier $10 \mu\text{S/h}$ in 10 m Abstand vom Moderator erwiesen [ES3 97]. Um einen schnellen Probenwechsel zu ermöglichen, sollte sowohl der Öffnen- als auch der Schließvorgang nicht länger als jeweils ein bis zwei Minuten dauern.

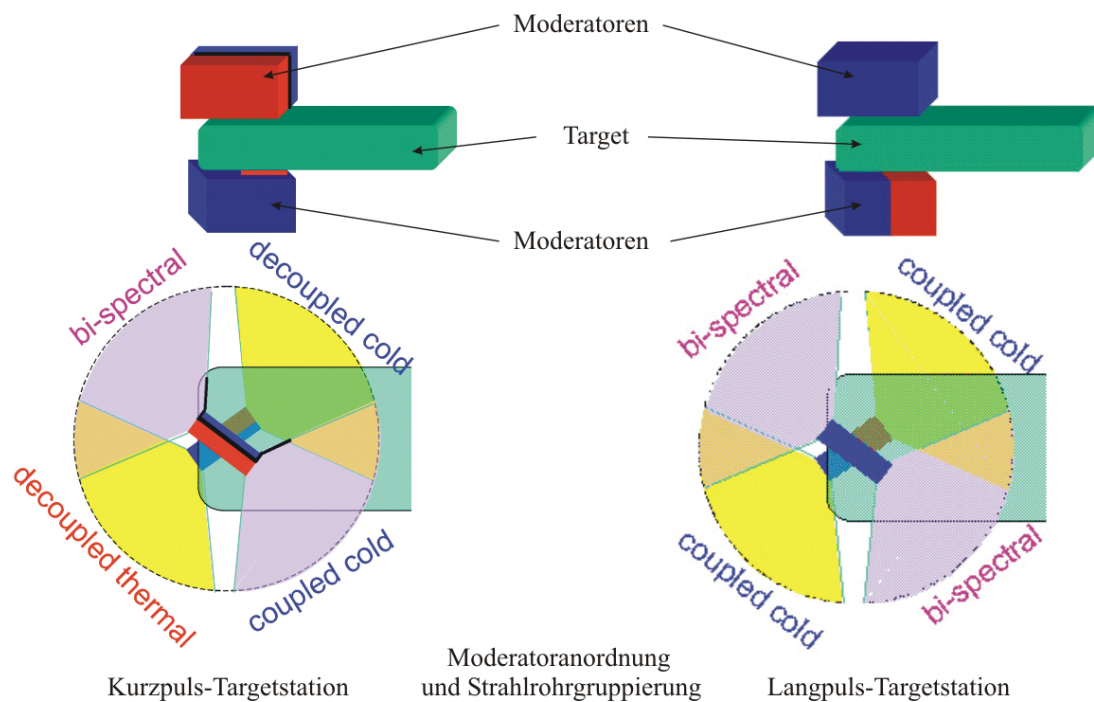


Abb. 4.3-7: Prinzip der Moderatoranordnung für Kurzpuls- (SPTS) und Langpulsstation (LPTS) /TIE 03/

Die Spallationsquelle ESS soll mit einer Langpuls- und einer Kurzpuls-Targetstation ausgestattet werden. Jede Targetstation soll 22 Strahlrohre und damit 22 unterschiedliche und simultan zu betreibende Instrumente unterstützen. Verschiedene Instrumente haben unterschiedliche Anforderung an die neutronische Auslegung des Moderators. Daher sind alle in Frage kommenden Instrumente in Klassen aufgeteilt und jeweils einer für diese Klasse optimaler Moderatorkonfiguration zugeordnet worden /TIE 03/. Als bester Kompromiss ergibt sich daher eine Anordnung von je zwei Moderatoren pro Targetstation, die jeweils ober- und unterhalb des Targets an der Position des maximalen Neutronenausflusses angeordnet sind. Das Prinzip dieser Anordnung ist in Abb. 4.3-7 dargestellt. Um die geforderte Zahl von 6 Strahlrohren pro Moderatorfläche zu gewährleisten, wird ein Winkelabstand der Strahlrohre untereinander von nicht mehr als 11° gefordert.

4.4. Handhabung aktivierter Komponenten

Für alle Komponenten und Systeme innerhalb der Targetstation ist neben der reinen Funktionalität auch der Handhabungsfall zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch nur auf die Ausarbeitung der grundlegenden Handhabungsabläufe für aktivierte und kontaminierte Komponenten eingegangen werden, da diese in nicht unerheblichem Maße den konzeptionellen Aufbau der Gesamtanlage beeinflussen. Innerhalb der Targetstation ist sowohl mit Aktivierung als auch Kontamination von Komponenten und Systemen zu rechnen. Einige dieser Komponenten müssen in mehr oder weniger kurzen Abständen gewartet, repariert oder ausgetauscht werden. Übergeordnetes Ziel muss es sein, alle damit verbundenen Handhabungsvorgänge so sicher und effizient wie möglich zu gestalten. Die Grundanforderungen an die Planung der Handhabungsabläufe sind daher /DES 88/:

- Minimierung der Strahlenexposition sowohl des Handhabungspersonals als auch der nicht direkt an der Handhabung beteiligten Personen (ALARA).
- Minimierung der Kosten unter Berücksichtigung des Planungs-, Herstellungs-, Handhabungs- und Entsorgungsaufwandes für die jeweilige Komponente.
- Berücksichtigung der erwarteten Lebensdauer der jeweiligen Komponenten und deren Auswirkung auf die geforderte Verfügbarkeit der Gesamtanlage.

Daher ist es notwendig, die aus der Handhabung der jeweiligen Komponenten resultierenden Anforderungen schon in der Konzeptionsphase der Gesamtanlage zu berücksichtigen. Die Konstruktion einer Komponente muss neben der reinen Funktion auch deren Handhabbarkeit zum Ziel haben. Dies um so mehr, je häufiger gehandhabt werden muss und je widriger die zu erwartenden Umstände während der Handhabung sind. Es scheint somit sinnvoll, sich zunächst mit den grundsätzlichen Einflussgrößen auf die Handhabung einer Komponente auseinanderzusetzen. In wieweit die Handhabbarkeit bei der Konstruktion einer Komponente, eines Systems, der direkt benachbarten Systeme oder sogar der Konzeption eines gesamten Anlagenteiles zu berücksichtigen ist, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab.

Zunächst stellt sich die Frage nach dem Grund der Handhabung einer Komponente und damit verbunden, mit welcher Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit der Handhabungsvorgang zu erwarten ist. Hier lassen sich grundsätzlich zwei Fälle unterscheiden, der Austausch einer Komponente aufgrund des Erreichens ihres Lebensdauerendes sowie der Austausch einer oder

mehrerer Komponenten oder Systeme aufgrund einer geforderten Änderung der Anlage (Weiterentwicklung, Leistungserhöhung, etc.). Gerade bei einer Anlage, die zu Forschungszwecken dient, ist eine Änderung bzw. Anpassung auf geänderte Forschungsaufgaben während einer anvisierten Lebensdauer von 40 Jahren nicht unwahrscheinlich. Bei einem Umbau oder Teilumbau der Anlage sind Art und Umfang der Handhabungsvorgänge während der Konzeptions- und Konstruktionsphase noch nicht abschätzbar. Daher kann hierfür nur die Forderung nach größtmöglicher Flexibilität des Gesamtaufbaus abgeleitet werden.

Im Falle eines lebenszeitbedingten Komponententausches ist eine weitere Unterteilung aufgrund der zu erwartenden Austauschfrequenz einer Komponente, bzw. eines System sinnvoll. Hat eine Komponente eine erwartete Lebensdauer von deutlich mehr als 40 Jahren, so ist es wenig wirtschaftlich den Handhabungsvorgang für diese Komponente mit großem konstruktiven Aufwand zu vereinfachen. Bei einer Komponente mit einer sehr hohen erwarteten Wechselfrequenz ist hingegen ein hoher Aufwand bei der handhabungsgerechten Konzeption und Konstruktion der Komponente selber, bei der Konzeption benachbarter Komponenten und Systeme, sowie die Bereitstellung geeigneter spezieller Handhabungsvorrichtungen durchaus gerechtfertigt. (Abb. 4.4-1)

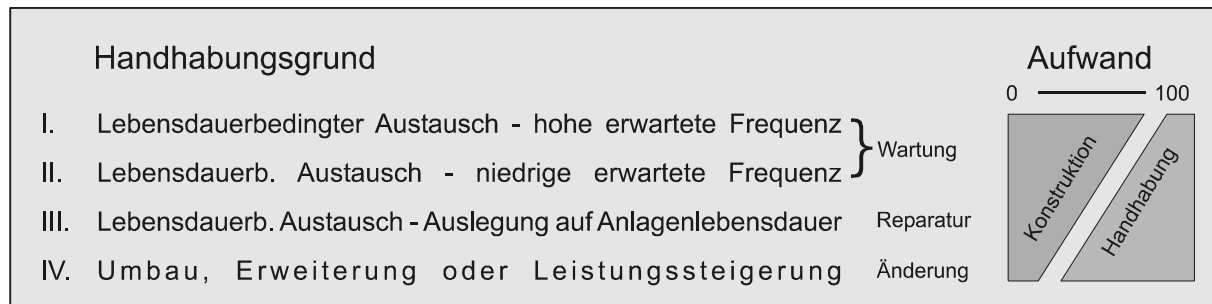


Abb. 4.4-1: Handhabungsgruppen - Austauschfrequenz und deren Auswirkung auf die Handhabungsphilosophie

Die Gruppen I und II stellen hierbei den Wartungsfall dar. Dieser betrifft Komponenten, deren erwartete Lebensdauer deutlich unterhalb der Gesamtanlage liegt. Diese müssen in mehr oder weniger kurzen Abständen gewartet, ausgetauscht, repariert oder inspiziert werden. Je nach Sicherheitsrelevanz des betreffenden Bauteiles wird diese Wartung vorbeugend, d.h. vor Erreichen des erwarteten Lebensdauerendes durchgeführt. Die Unterscheidung zwischen hoher und niedriger zu erwartender Austauschfrequenz kann dabei an Hand des vorgegebenen Betriebsmodus der Anlage getroffen werden. Wie in Kap. 3.4 beschrieben, sind pro Jahr vier kurze (14-Tage) und eine lange (12 Wochen) Abschaltpause geplant. Als niedrig frequent können daher alle Vorgänge angesehen werden, die sich planmäßig in die lange jährliche Abschaltpause verlegen lassen.

In der Gruppe III (Reparaturfall) finden sich Komponenten, die auf die Lebensdauer der Gesamtanlage ausgelegt werden, mit deren Versagen aber trotzdem gerechnet werden muss. Bei Komponenten, deren Ausfall weitreichende, sicherheitsrelevante Folgen haben kann, ist trotz einer Auslegung auf die Lebensdauer der Gesamtanlage in regelmäßigen Abständen eine wiederkehrende Prüfung notwendig, um einem unerwarteten Ausfall vorzubeugen. Diese Komponenten sind daher, abhängig von der Frequenz der wiederkehrenden Prüfung, trotz Lebensdauer-Auslegung der Gruppe I oder II zuzuordnen.

Neben der Häufigkeit spielen auch die zu erwartenden Umstände während eines Handhabungsvorganges eine entscheidende Rolle. Von Bedeutung sind dabei:

- Aktivierung der Komponente und des direkten Umfeldes,
- radiologische und chemische Kontamination der Komponente und des direkten Umfeldes,
- Komplexität der Komponente sowie der Komponenteneinbindung in die Umgebung (Rohrleitungen/Anschlüsse),
- Zugänglichkeit der Komponente,
- Größe und Gewicht der Komponente,
- Betriebsmodus der Anlage während des Handhabungsvorganges (z.B. Strahlbetrieb).

Hauptproblem bei der Handhabung aktivierter Komponenten ist die von der Komponente ausgehende Strahlung. Daher muss zwischen der Komponente bzw. der evtl. ebenfalls aktivierten Umgebung und der handhabenden Person eine ausreichende Barriere gewährleistet sein. Dies kann durch Einhalten eines Mindestabstandes von der Komponente oder bei höheren emittierten Dosisleistungen durch eine lokale Abschirmung verwirklicht werden. Je nach Strahlungsintensität und –art der Quelle muss neben dem direkten Weg auch die evtl. gestreute Strahlung berücksichtigt werden (Abb. 4.4-2). Die Handhabung aktivierter Komponenten erfolgt daher zumeist fernbedient.

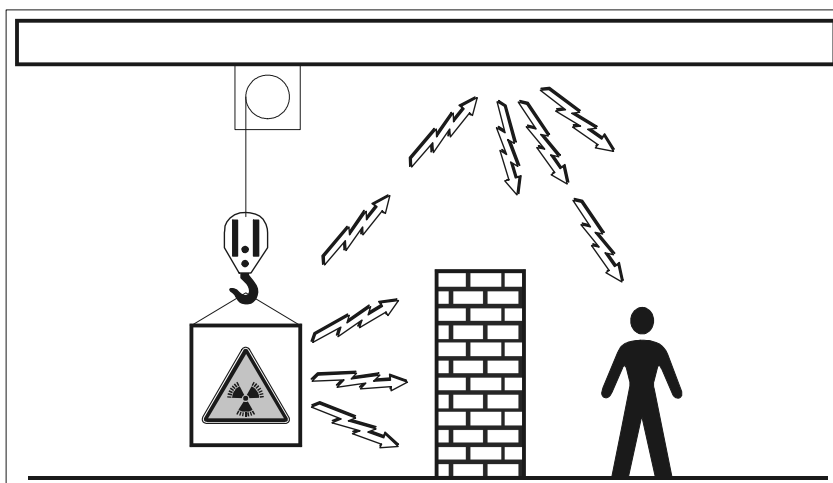


Abb. 4.4-2: Direkte und indirekte Strahlung bei der Handhabung aktivierter Komponenten

Muss bei einer Komponente mit Kontamination gerechnet werden, so ist sowohl die unkontrollierte Ausbreitung (Verschleppung) der Kontamination als auch der direkte Kontakt zwischen kontaminierter Komponente und handhabenden Personen zu verhindern. Je nach Art und Umfang der Kontamination können die zu treffenden Maßnahmen von der Erzeugung einer gezielten Luftströmung (weg vom sauberen, hin zum kontaminierten Bereich) bis zum hermetischen Einschluss aller beteiligten Komponenten und Werkzeuge während des gesamten Handhabungsvorganges reichen (Abb. 4.4-3 links).

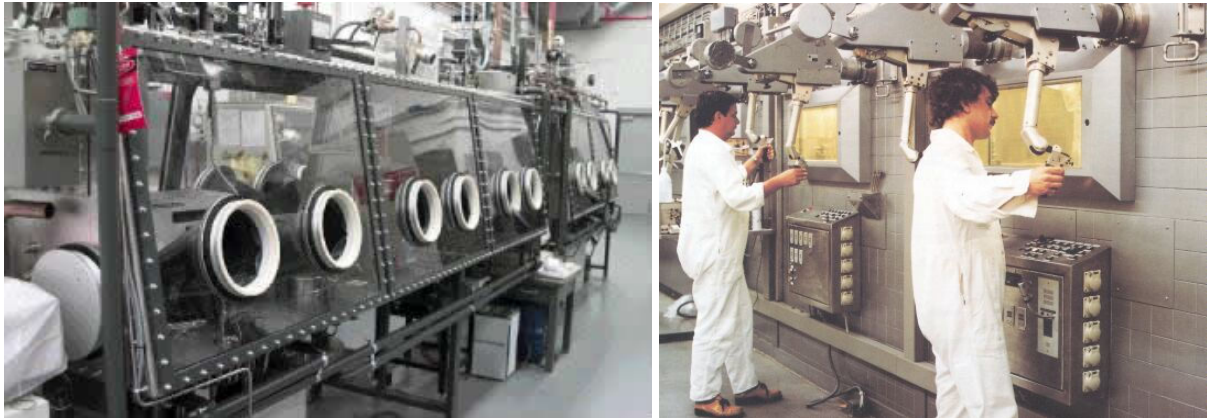


Abb. 4.4-3: Handhabung kontaminierter Komponenten (Handschuhbox / Heiße Zelle)

Liegen sowohl hohe Aktivierung als auch Kontamination vor, ist ggf. die Handhabung in sog. Heißen Zellen notwendig (Abb. 4.4-3 rechts). Dies sind je nach Ausführung hermetisch dichte Räumlichkeiten, in denen die Handhabungsvorgänge mit Hilfe von extern gesteuerten Manipulatoren im Inneren durchgeführt werden können.

Weisen Komponenten einen hohen Grad an Komplexität auf oder sind diese nur schwer zugänglich, so bietet sich die Modulbauweise an. Die entsprechende Komponente wird dabei mit anderen, meist einfacheren Bauteilen, die die Zugänglichkeit behindern, zu einem Modul zusammengefasst und als eine Einheit gehandhabt. Nachteilig kann sich hierbei das höhere zu handhabende Gewicht, bzw. die Abmaße solcher Module erweisen.

Bei der Handhabung von Komponenten aus der direkten Targetumgebung müssen meist sicherheitsrelevante Einschlussbarrieren durchbrochen werden. Für bestimmte Betriebszustände der Anlage (Strahl abgeschaltet / nach ausreichender Abklingzeit) ist dies tolerierbar. Ist dies nicht der Fall oder lässt sich ein geeigneter Betriebszustand der Anlage, der eine offene Handhabung durch eine Einschlussbarriere zulässt, nicht herstellen, wird die Verwendung von hermetisch schließenden Wechselflaschen notwendig.

5. Konzeptionelle und technische Umsetzung

5.1. Grundkonzept und Aufbau der Targetstation

Bei dem Grundkonzept für die generelle Anordnung der Hauptsysteme Protonenstrahlführung, Handhabungsräume und Neutronenstrahlkanäle handelt es sich im Wesentlichen um eine Adaption der ISIS Targetstation (Abb. 5.1-1). Der grundsätzliche Aufbau der Targetstation ist im Rahmen einer Machbarkeitsstudie von 1994 bis 1997 /ES3 97/ und einer weiteren Studie bis 2002 /ES3 02/ erarbeitet worden. Innerhalb dieser Studien lag der Fokus der Arbeiten neben der Optimierung der Neutronenausbeute im Wesentlichen auf der technischen Realisierbarkeit eines Hochstromtargets für eine zeitlich gemittelte Strahlleistung von 5 MW. Die Targetumgebung wurde nur grob skizziert und dient daher in der hier vorliegenden Arbeit als Ausgangspunkt für die technische Auslegung. Zudem wurden nach Beendigung der Studien, weitere nicht unerhebliche Forderungen seitens der Nutzer gestellt, die mit dem ursprünglichen Konzept der Targetumgebung der Studie nicht vereinbar waren.

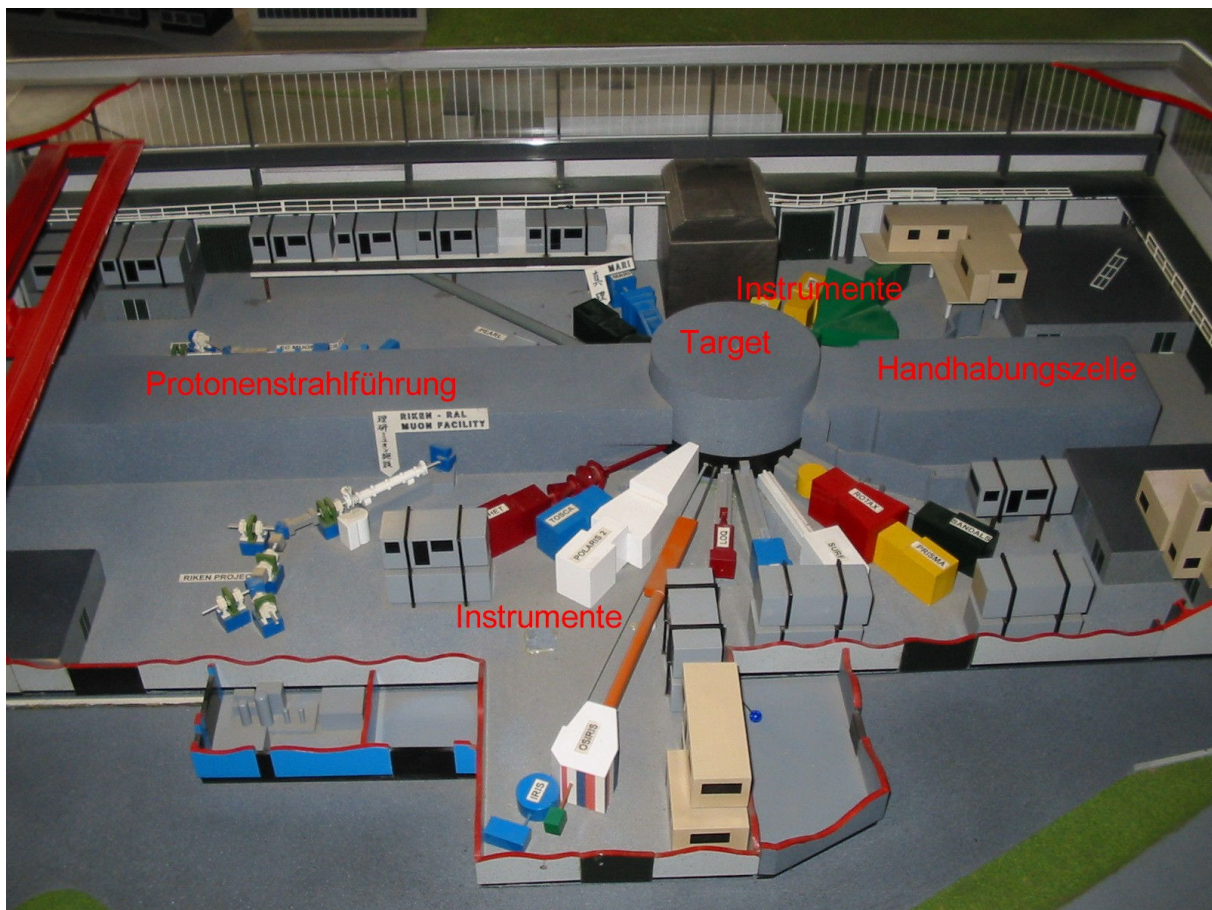


Abb. 5.1-1 Modell der Targetstation ISIS

Im Folgenden werden die gewählten technischen Konzepte und wo nötig teilweise Detaillierungen dargelegt und begründet. Die Entwicklung dieser Konzepte verlief iterativ, da Festlegungen für Konzepte in einem Teilbereich in den meisten Fällen gleichzeitig nicht unerhebliche Randbedingungen für die Konzeptfindung in anderen Teilbereichen darstellen. Die hier präsentierten Lösungen stellen den vorläufigen Endpunkt einer stark iterativen Arbeit

dar. Trotz des Versuches, die Begründung so chronologisch wie möglich darzustellen, war es unvermeidbar, Randbedingungen aus weiter hinten beschriebene Teilbereichen im Vorgriff zu verwenden. Dies wird jeweils durch Verweis auf das entsprechende Kapitel kenntlich gemacht.

5.1.1. Genereller Aufbau der Targetstation

Die Targetstation zeichnet sich primär durch einen horizontalen Protoneneinschuss auf das ebenfalls horizontal angeordnete Target aus. Die atmosphärische Trennung zwischen dem Hochvakuum innerhalb der Strahlführung und dem Target-Nahbereich erfolgt durch ein wechselbares Protonenstrahlfenster. In Protonenstrahlrichtung hinter dem Target ist eine Handhabungszelle angeordnet, die im Wesentlichen der Handhabung des Targets dient (Abb. 5.1-2). Aufgrund der hohen Aktivität des Targets ist diese Zelle als Heiße Zelle mit ausschließlich fernbedientem Betrieb vorgesehen. Rechts und links der Protonenstrahlachse befinden sich die Neutronenstrahlrohre mit den Instrumenten, aufgeteilt auf einen Winkelbereich von je ca. 120° (Abb. 5.1-3). Jedes Strahlrohr ist mit einem eigenen Strahlverschluss ausgestattet. Oberhalb und unterhalb des Targets befindet sich je ein Kombinations-Moderator, in welchem Wasser bei Raumtemperatur sowie Flüssigwasserstoff bei ca. 20 K parallel zum Einsatz kommen (Abb. 5.1-4). Diese Moderatoren sind am vorderen Ende eines Moderatoreinschubes nach Vorbild der Kalten D_2 -Quelle an der Spallationsquelle SINQ angeordnet und werden horizontal unter Verwendung geeigneter Flaschensysteme in Richtung der Instrumentenhalle gehandhabt.

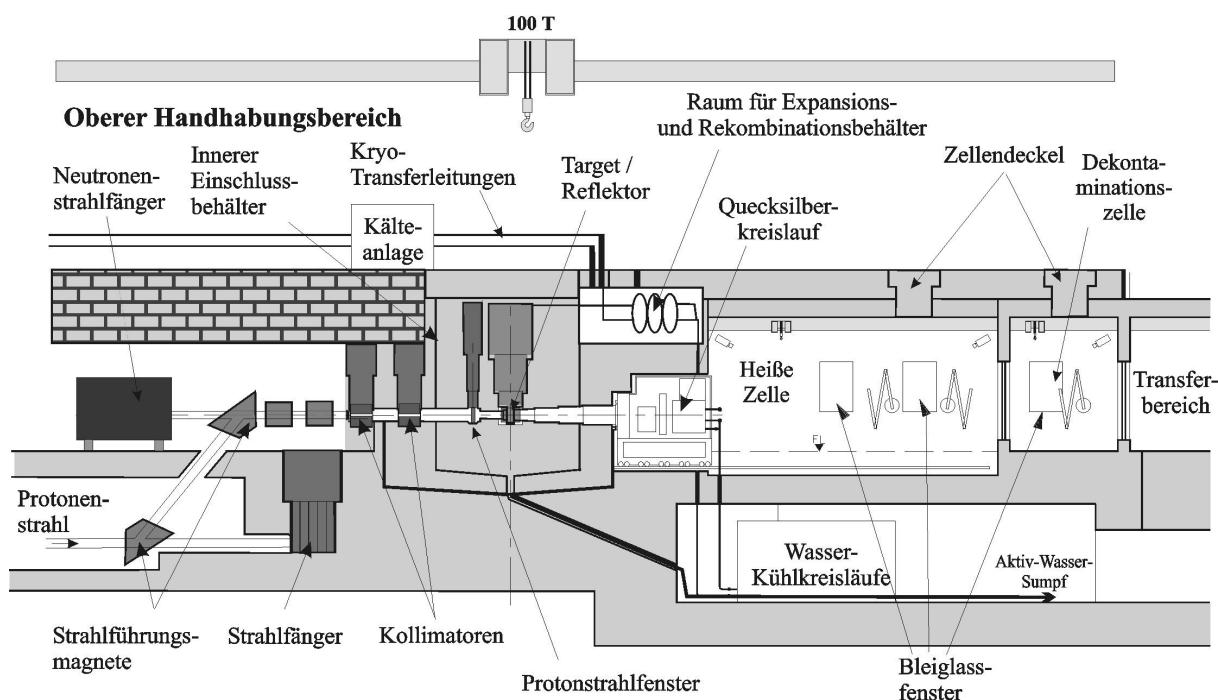


Abb. 5.1-2 Grundsätzlicher Aufbau der Targetstation / Längsschnitt /BUT 03c/

Oberhalb von Protonenstrahlführung, Targetbereich sowie Heiße Zelle ist der Obere Handhabungsbereich angeordnet. Dieser ist, vergleichbar mit dem Bereich oberhalb der Top-Platte eines Reaktors, während der Handhabungsvorgänge durch Personal begehbar. Im Keller der Anlage befindet sich die Kühlzentrale, in der alle radioaktiv belasteten Kühlwasserkreisläufe zusammengefasst sind.

Um eine Aktivierung weiter Teile der Protonenstrahlführung zu minimieren, tritt der Protonenstrahl unterhalb des Bodenniveaus der Instrumentenhalle in das Targetgebäude ein und wird erst hier durch eine Kombination von Biegemagneten auf die Höhe des Targets angehoben. Zusätzlich werden im letzten Teil der Strahlführung Kollimatoren eingesetzt, die den freien Querschnitt für rückwärts gestreute Neutronen möglichst minimieren. Für die verbleibenden rückwärtig gestreuten Neutronen ist ein Neutronenstrahlfänger vorgesehen. Der Strahl wird dabei von den letzten Strahlführungsmagneten durch Kollimatoren analog einer Lochblende fokussiert, so dass er am Ort des Targets wieder den gewünschten Querschnitt von ca. 200 mm x 60 mm aufweist. Somit verhindern die Kollimatoren ohne weitere aktive Maßnahmen die Möglichkeit einer ungewollten Strahlfokussierung auf die Targethülle und damit ein Schmelzen eben dieser. Ein Protonenstrahlfänger dient als Strahlstopper für den Fall, dass bei nicht betriebsbereitem Target, Tests der Beschleuniger, Ringe und Strahlführungen bis zu den Targetstationen durchgeführt werden sollen.

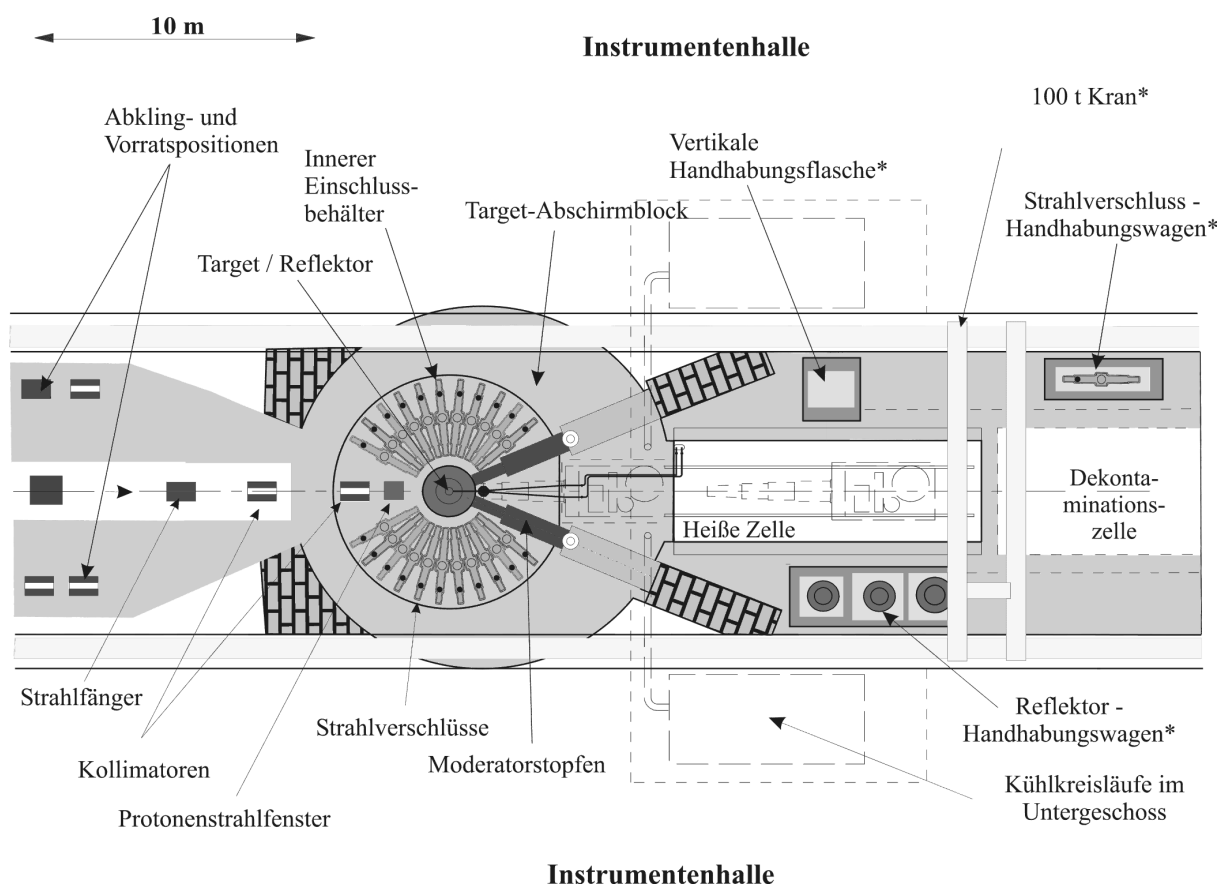


Abb. 5.1-3 Grundsätzlicher Aufbau der Targetstation / Aufsicht /BUT 03c/

* innerhalb des Oberen Handhabungsbereiches

Die Zugänglichkeit im Wartungsfall ist für den Reflektor, die Strahlverschlüsse, das Protonenstrahlfenster sowie die Komponenten der Protonenstrahlführung vom oberen Handhabungsbereich aus gegeben. Dort steht für die Handhabung mittels abgeschirmter Flaschen ein Kran mit einer Tragkraft von 100 Tonnen zur Verfügung. Für das Bauteil mit der größten Wechselfrequenz und höchsten Aktivität steht eine eigene Handhabungszelle zur Verfügung. Hierzu wird das Target zusammen mit dem gesamten Quecksilberkreislauf und einem Teil weiterer Systemtechnik horizontal von der Betriebsposition in die Heiße Zelle

verfahren. Die Moderatoren sind jeweils links und rechts von der Heißen Zelle angeordnet und von der Instrumentenhalle aus zugänglich.

Das Target, inklusive der beiden Moderatoren, wird vollständig von einem aktiv zu kühlenden, bleigefüllten Reflektor umgeben (Abb. 5.1-4). Diese zylinderförmige Struktur mit einem Durchmesser von 1200 mm und einer Höhe von ebenfalls 1200 mm ist nur in den Bereichen der Neutronenstrahlauskopplung ausgespart. Sowohl die Größe und Form des Reflektors als auch die Anordnung und Wahl der Moderatoren wurde in weiteren Arbeiten /HAF 03/ optimiert und sollen hier nicht weiter diskutiert werden.

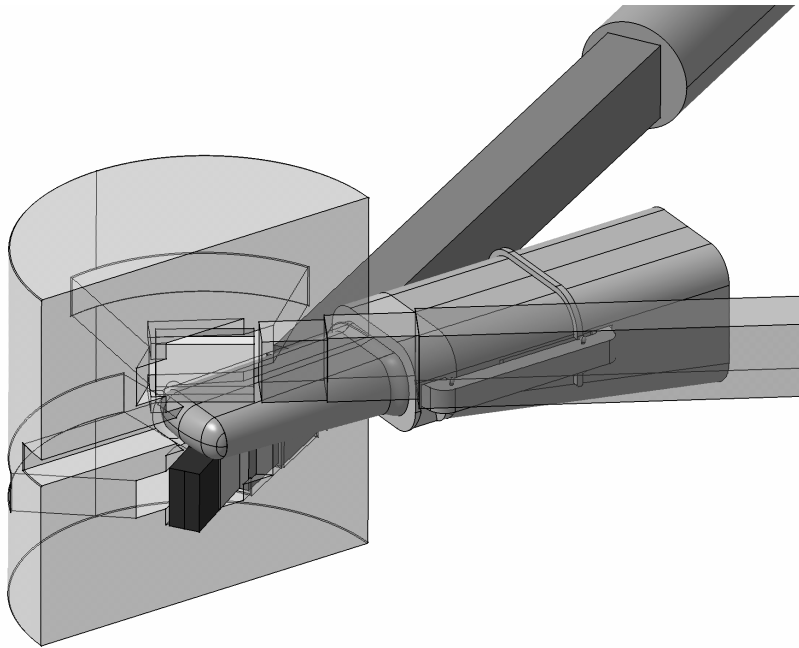


Abb. 5.1-4 Anordnung von Target, Moderatoren und Reflektor

5.1.2. Anordnung der Strahlrohre

Die größte Herausforderung an die Anordnung und Aufteilung der Strahlrohre ergibt sich aus der Forderung der Nutzer /MEZ 02/, eine sog. multispektrale Extraktion sowohl der kalten als auch der thermischen Neutronen in einem Strahlrohr zu ermöglichen (Abb. 5.1-5). Gleichzeitig ist dies mit der Forderung verbunden, ab einer Entfernung von maximal 1,6 Meter vom Moderator Neutronenleiter zu verwenden, die vom Öffnungsquerschnitt her beide nebeneinander liegende Teile des Kombimoderators (vergl. Abb. 4.3-7) gleichzeitig abdecken. Um eine ausreichende Flexibilität für die teilweise sehr unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Nutzer zu erreichen, werden Strahlrohreinschübe verwendet, die eine Öffnung von 230 mm Breite und 170 mm Höhe aufweisen. Innerhalb dieser Einschübe können die Neutronenleiter so eingebaut werden, dass wahlweise entweder kalte, thermische oder multispektrale Neutronen ausgekoppelt werden können. Somit ist durch die Wahl eines geeigneten Strahlrohreinschubes das Neutronenspektrum an jedem Strahlrohr individuell an die Anforderung des jeweiligen Instrumentes anpassbar.

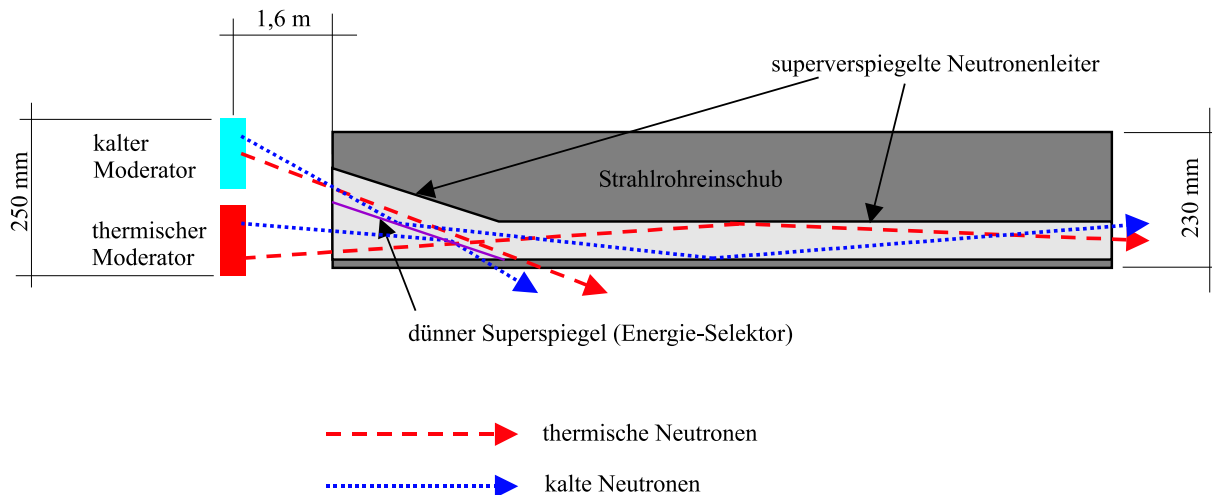


Abb. 5.1-5 Prinzip der multi-spektralen Extraktion

Zusätzlich wird eine Anzahl von 22 nutzbaren Strahlrohren sowie ein Winkel zwischen benachbarten Strahlrohren von nur 11° gefordert. Abb. 5.1-6 veranschaulicht die Platzverhältnisse im Inneren des Targetabschirmblockes. Ebenfalls innerhalb des Abschirmblockes ist je Neutronenstrahlrohr ein Strahlverschluss vorzusehen, der ein möglichst vollständiges Verschließen des Neutronenstrahles und damit einen Probenwechsel am Instrument während des Betriebs der Quelle gestattet. Eine maximale Dosisleistung von $10 \mu\text{Sv/h}$ an der Probe bei geschlossenem Strahlverschluss führt zu einer geforderten Verschlusslänge von ca. 2,8 m bei Verwendung von Stahl als Strahlverschlussmaterial /ES3 97/.

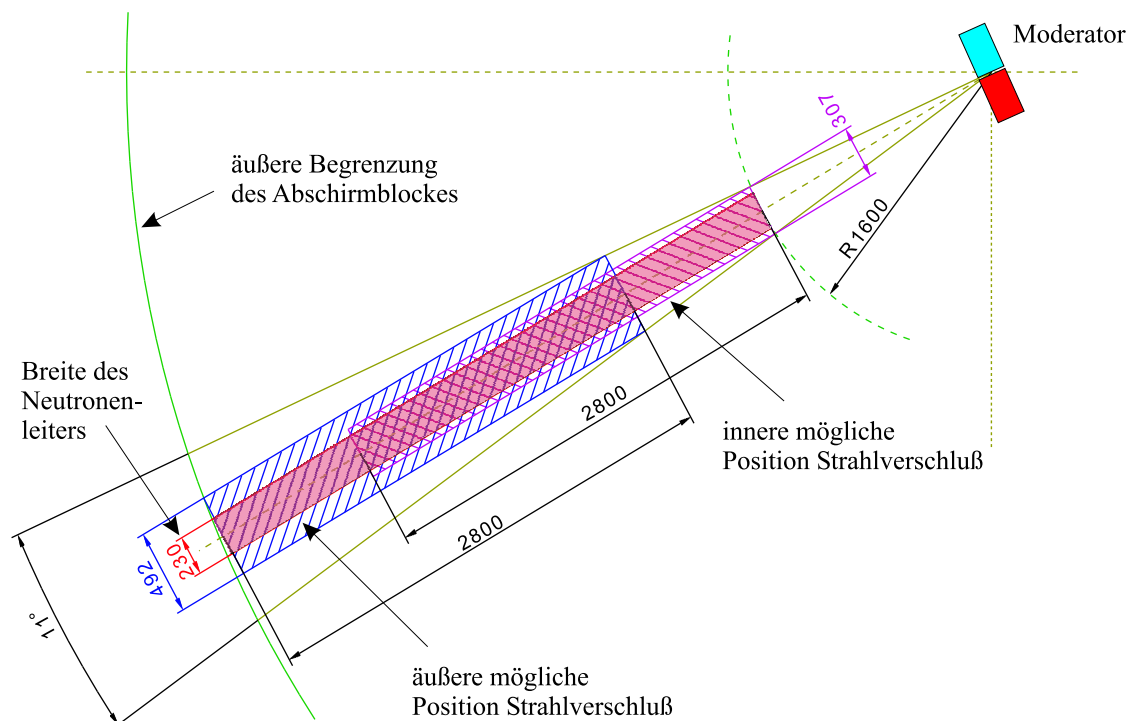


Abb. 5.1-6 Platzverhältnisse für ein Strahlrohr innerhalb des Target-Abschirmblockes unter Berücksichtigung der Position des Strahlverschlusses

Nachdem der Winkel zwischen den Strahlrohren mit 11° festgelegt wurde, ist die maximal mögliche Breite des Strahlverschlusses lediglich von seiner Position längs des Neutronen-

strahls innerhalb des Abschirmblockes abhängig (Abb. 5.1-6). Eine Positionierung des Strahlverschlusses am äußerst möglichen Ende der innerhalb des Abschirmblockes befindlichen Strahlführung führt zu einer maximal möglichen Breite von ca. 492 mm. Das innere Ende der Strahlführung wird durch den geforderten maximalen Abstand zwischen Moderator und Anfang der Strahloptiken mit 1,6 m festgelegt. Eine Positionierung des Strahlverschlusses direkt am Anfang der Strahlführung führt daher zu einer maximal möglichen Breite von nur 307 mm.

Eine Positionierung zwischen diesen beiden Extrema hätte den Nachteil einer Dreiteilung des Neutronenleiters innerhalb des Abschirmblockes. Da die Toleranzanforderungen für die Positionierung der einzelnen Neutronenleiterabschnitte zueinander sehr hoch sind (vergl. Kap. 5.3), wurde die dreiteilige Option nicht weiter verfolgt /BUT 02/. Anzumerken sei in diesem Zusammenhang, dass bei der Konstruktion der Quelle SNS trotzdem diese dreigeteilte Option gewählt wurde. Bei der weiteren Detaillierung der Konstruktion der Strahlrohranordnung der im Bau befindlichen Spallationsquelle SNS zeigte sich zusätzlich ein weiterer Nachteil dieser Option. Der Austausch des innersten Neutronenleiterabschnittes, wie er sowohl bei Änderung der Anforderung durch das an diesem Strahlrohr betriebene Instrument als auch durch die hohen Strahlungsschädigung dieses Bauteils notwendig wird, gestaltet sich äußerst schwierig. Die im Gegensatz zu SNS hier eingesetzten Drehverschlüsse bieten den Vorteil, einen in diesem Verschluss befindlichen Einschub nach Drehung um 90° mit vertretbarem Aufwand von oben auszuwechseln, ohne den gesamten Strahlverschluss demontieren zu müssen. Befindet sich bei einem zweigeteilten Neutronenleiter der prinzipiell schwerer zugängliche, dem Moderator zugewandte Teil des Leiters innerhalb des Strahlverschlusses, ist es möglich, genau diesen Vorteil der Drehverschlüsse zu nutzen.

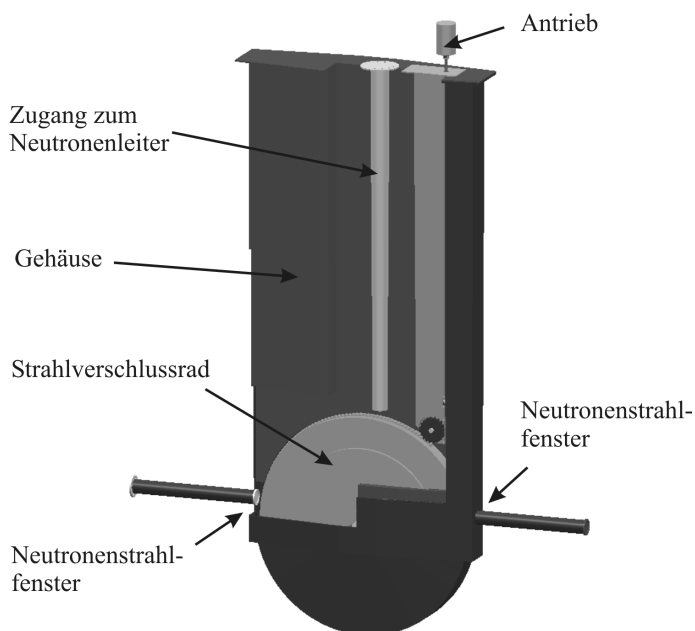


Abb. 5.1-7 Strahlverschluss mit separaterem Gehäuse

Sowohl in der ersten Machbarkeitsstudie /ES3 97/ als auch bei der Quelle ISIS und der Projektstudie SNQ /KLO 80/ sind die Strahlverschlüsse jeweils einzeln in einem eigenen, atmosphärisch getrennten Gehäuse untergebracht (Abb. 5.1-7). Vorteil dieser Konstruktion ist, dass bei Versagen der Strahlverschlüsse diese als eine Einheit gehandhabt werden können. Als Nachteil ergibt sich hierbei jedoch ein quer zur Strahlrichtung erheblich höherer

Platzbedarf sowie aufgrund der zusätzlichen Gehäuse und damit unterschiedlichen Atmosphären die Notwendigkeit, vier zusätzliche Neutronenstrahlfenster (je zwei in Strahlverschlussgehäuse und in der Aufnahmebucht) je Strahlrohr innerhalb des Abschirmblockes zu verwenden. Die Wahl, gekapselter Strahlverschlüsse mit separater Atmosphäre und der damit verbunden minimal möglichen Gesamtbreite von ca. 550 mm, würde bei den hier vorliegenden Platzverhältnissen (Abb. 5.1-6) zu einer Positionierung außerhalb des Abschirmblockes führen. Daher reduziert sich die Frage nach der Position der Strahlverschlüsse nunmehr auf die Frage, ob es gelingt diese so schmal zu bauen, dass ein Einsatz an der inneren, dem Moderator zugewandten Position, möglich wird. Wie in Kap. 5.4 gezeigt wird, ist dies durch geeignete Formgebung der Verschlussradgeometrie möglich geworden.

5.1.3. Targetsystem

Das als Targetmaterial und Kühlmedium genutzte Quecksilber wird zur konvektiven Abfuhr der beim Spallationsprozess erzeugten Wärme kontinuierlich durch den Targetbehälter (im Folgenden „Target“ genannt) gepumpt. Die wichtigsten, dafür erforderlichen Versorgungssysteme sind auf einem Targetwagen (Abb. 5.1-8) montiert, welcher für Wartungszwecke zwischen der Betriebsposition und der in Protonenstrahlrichtung hinter dem Target angeordneten Heißen Zelle verfahren werden kann. Da auch der Teil des Targetabschirmblockes, welcher für den Zugang zum Target entfernt werden müsste, Teil des Targetwagens ist, wird durch diese Konfiguration ein schneller Zugang zum Targetbehälter und damit ein Austausch innerhalb der geforderten kurzen Zeit erst möglich. Das hierzu notwendige Flanschsystem, welches nicht unwesentlich zu dieser kurzen Wechselzeit beiträgt, wird in Kap. 5.5 detaillierter beschrieben. Das Gesamtgewicht des Targetwagens liegt bei ca. 250 t und wird hauptsächlich durch die Masse der mobilen Abschirmung bestimmt. Verfahren wird der Targetwagen über ein autark arbeitendes kommerziell erhältliches Luftkissensystem, welches aus Gründen der hohen erwarteten Strahlungsdosis während des Strahlbetriebes im hinteren Bereich der Heißen Zelle geparkt wird. Der dabei freiwerdende Spalt unterhalb des Targetwagens wird für den Betrieb mittels einer mobilen Abschirmung ausgefüllt.

Hauptmerkmale für die Auslegung des Targetsystems sind:

- Verfahrbarkeit des gesamten Targetwagens, um das Target in eine geeignete Handhabungsposition zu bringen.
- Beschränkung des Quecksilberinventars auf die Bereiche Heiße Zelle und Target-Nahbereich (Vereinfachung des Einschlusskonzeptes).
- Alle quecksilberführenden Leitungen sind mit einer durchgehenden Auffangwanne als Ablaufsystem für den Fall der Leckage ausgestattet.
- Alle Systeme, die direkt oder indirekt der Abfuhr der beim Spallationsprozess erzeugten Wärme dienen, sind entweder auf die Lebensdauer der Anlage auszulegen oder mittels vorbeugender Instandhaltung rechtzeitig auszutauschen.
- Minimierung der Flanschverbindungen und damit potentieller Undichtigkeiten, insbesondere beim Quecksilberkreislauf.
- Verzicht auf dynamische Dichtsysteme (Drehdurchführungen) im Quecksilbersystem.
- Alle Handhabungen innerhalb der Zelle und damit auch alle Handhabungen am Targetwagen werden fernbedient ausgeführt.

- Innerhalb der Zelle werden im Rahmen der normalen Wartung nur ganze Komponenten oder Module getauscht. Spanabhebende Verfahren sowie Schweißen sind für alle regulären Handhabungen innerhalb der Heißen Zelle nicht vorgesehen.
- Der Verlust der Funktion „Wärmeabtransport aus dem Targetbehälter“ muss mit Sicherheit innerhalb von wenigen Sekunden diagnostizierbar sein und zur Schnellabschaltung des Protonenstrahls führen.

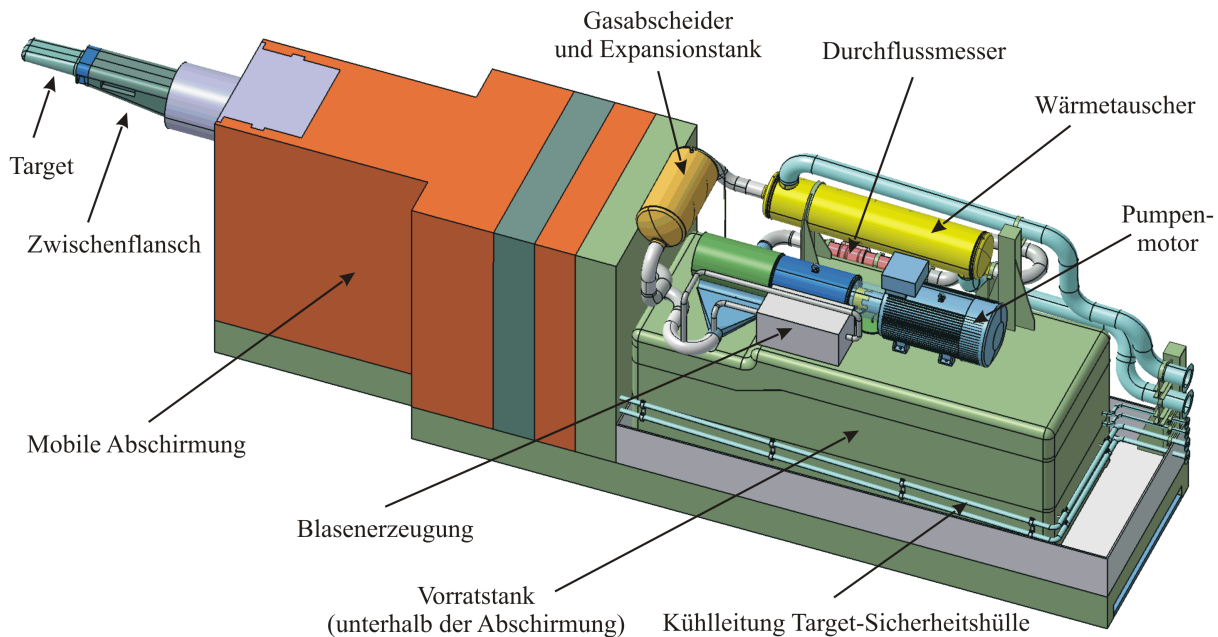


Abb. 5.1-8 Targetwagen

Der Quecksilberkreislauf (Tabelle 5.1-1) besteht aus den Hauptkomponenten Targetbehälter, Gasabscheider, Wärmetauscher und Pumpe (Abb. 5.1-9). Im Bypass ist eine Vorrichtung zur Erzeugung kleinster Helium-Blasen vorgesehen, welche zur Erhöhung der Kompressibilität des Quecksilbers und damit zur Minderung der durch den gepulsten Strahlbetrieb im Target entstehenden Druckpulse benötigt werden. Über den Gasabscheider werden neben den gasförmigen Spallationsprodukten hauptsächlich das zu großen und damit auftriebsdominierten Blasen akkumulierte Helium abgeschieden. Kleine, wenig auftriebsdominierte Blasen verbleiben dagegen in der Quecksilberströmung und werden im Kreislauf mit umgewälzt. Im Wärmetauscher wird die im Targetmaterial deponierte Wärmeenergie von ca. 2,2 MW (Auslegungswert 2,8 MW) an einen Zwischen-Wasserkreislauf abgegeben. Aus Sicherheitsgründen wird hier ein doppelwandiger Rohrbündelwärmetauscher eingesetzt, dessen Rohre aus zwei ineinander gepressten Rohren mit überwachbarem Zwischenspalz in Form von innen liegenden Zügen (Längsnuten) im Außenrohr bestehen. Messungen /TTF 01/ dieses Wärmetauschertypes ergaben einen um nur 15% schlechteren Wärmedurchgangsbeiwert verglichen mit einem entsprechend ausgeführten einwandigen Wärmetauscher.

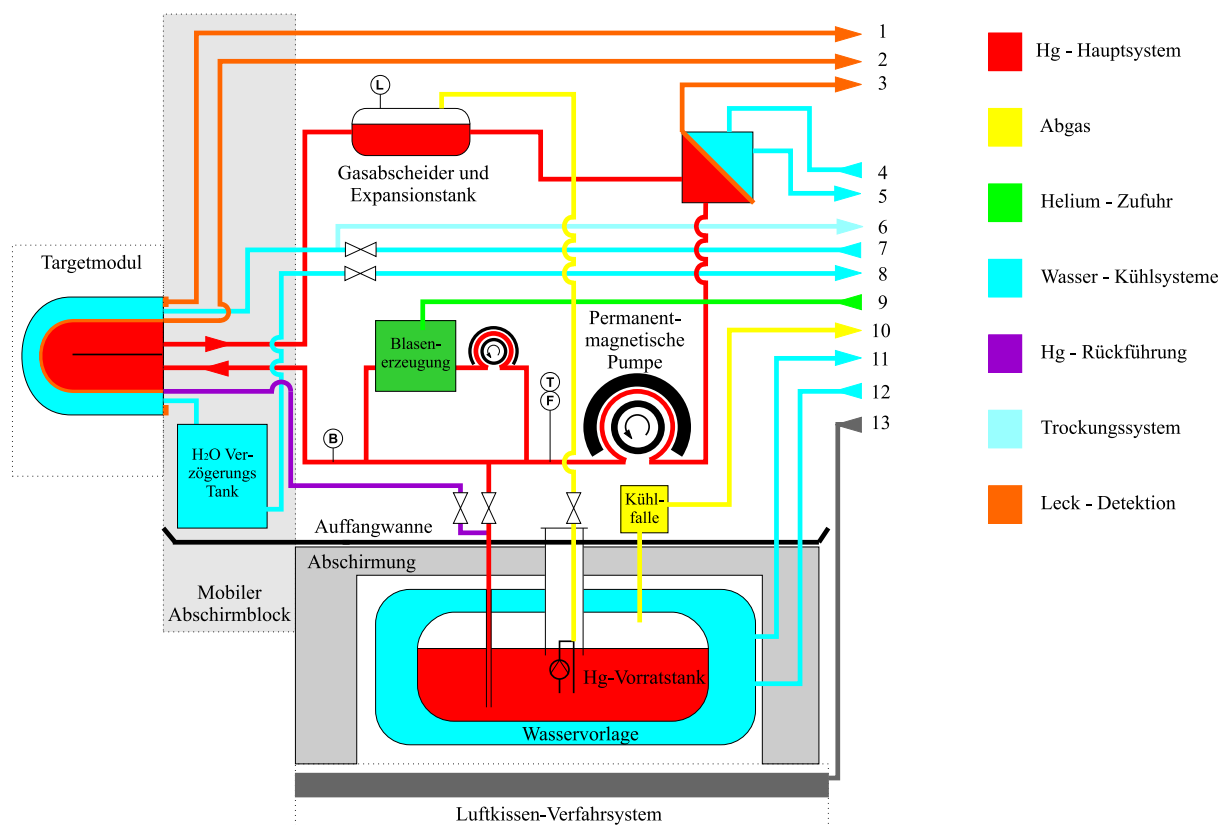


Abb. 5.1-9 Fliessschema Kreisläufe auf dem Targetwagen

1-3 Leck-Detektionssystem; 4-5 Wasser-Rückkühlssystem; 6 Trocknungssystem-Sicherheitshülle; 7-8 Kühlung Sicherheitshülle; 9 Helium-Zufuhr; 10 zur Abgasreinigung; 11-12 Kreislauf-passive Nachwärmeabfuhr; 13 Druckluftversorgung
 Messtechnik: T-Temperatur; F-Durchfluss; B-Blasenanteil und -größe; L-Füllstand

Tabelle 5.1-1 Wichtige thermohydraulische Basisparameter des Quecksilberkreislaufes

Thermische Leistung im Target *	2800	kW
Durchfluss (nominal)	220	kg/s
Durchfluss (minimal, Abschaltkriterium)	175	kg/s
Temperatur Targetzulauf (nominal)	60	°C
Temperatur Targetrücklauf (nominal)	152	°C
Temperatur Targetzulauf (maximal)	80	°C
Temperatur Targetrücklauf (maximal bei niedrigem Durchfluss)	195	°C
Druckverlust im Target	~ 0,25	MPa
Druck am Targetzulauf	0,5	MPa
Druckverlust Kreislauf (Verrohrung DN 150)	0.5 – 0.7	MPa
Quecksilber-Inventar	~ 20	t

* Auslegungswert inklusive 25% Sicherheitszuschlag

Durch den Einsatz einer neuartigen, hermetisch dichten permanentmagnetischen Quecksilberpumpe /BUT 03a/ (Abb. 5.1-10) sind keinerlei bewegte Quecksilberdichtungen im System notwendig. Diese Pumpe besteht aus den Hauptkomponenten Pumpenkörper, Magnetrotor- und Lagereinheit, sowie Elektromotor. Der Pumpenkörper selbst besteht lediglich aus einem entsprechend geformten Kanal und einem außen angebrachten Eisenjoch und kann daher als wartungs- und verschleißfrei, sowie aufgrund der niedrigen Belastungen nach den Regeln des „Bruchausschlusses“ auslegbar angesehen werden. Die Lager der Magnetrotor- und Lagereinheit werden als wartungs- und schmierstofffreie Hybridlager ausgeführt und sind grundsätzlich auf Lebensdauer der Anlage auslegbar. Der Elektromotor als einziges Verschleißteil wird im Rahmen einer vorbeugenden Instandhaltung innerhalb vorgegebener Zyklen auszutauschen sein. Eine redundante Auslegung der Pumpenanlage (z.B. 2 aus 3) würde zusätzlich die Verwendung von Quecksilber durchströmten Rückschlagklappen notwendig machen, welche für die hier anzutreffenden Betriebsbedingungen (Medium: Quecksilber, Strahlung: $\sim 500 \text{ Sv/h}$) nicht kommerziell erhältlich sind. Dieses Konzept wurde daher nicht weiter verfolgt.

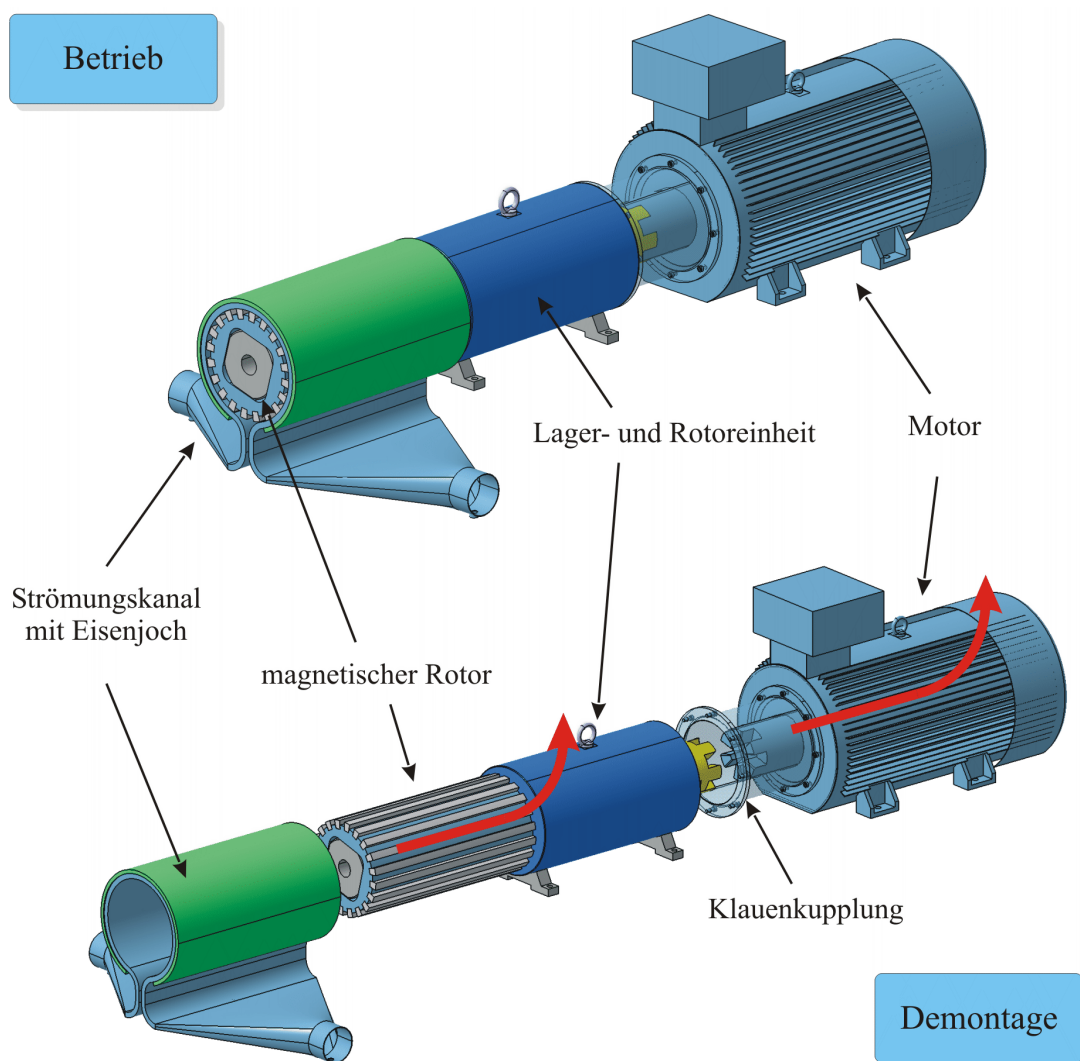


Abb. 5.1-10 Quecksilberpumpe „Prinzip der rotierenden Permanentmagnete“ mit Lagerung und Antrieb

Der Quecksilberkreislauf ist so ausgelegt, dass sein gesamtes Inventar passiv über Schwerkraft in einen abgeschirmten, im unteren Bereich des Targetwagens angeordneten Vorratstank abgelassen werden kann. Durch diese Abschirmung kann die Strahlenbelastung der Zelle im Wartungsfalle minimiert werden. Dies wird um so wichtiger, da nur so ein kurzfristiges Betreten der Zelle unter Vollschutz im Falle unvorhergesehener Probleme möglich wird. Des weiteren dient dieser Tank als Notablasstank für den Fall, dass während des Betriebes ein Leck am Target oder anderen Kreislaukomponenten auftritt. Um in diesem Falle sowohl das betriebswarme Quecksilber auf moderate Temperaturen herunterzukühlen, als auch die gesamte entstehende Nachwärme passiv abführen zu können, ist dieser Tank als doppelwandige Konstruktion mit ausreichender Wasservorlage als Wärmekapazität im Zwischenraum ausgeführt. Zusätzlich ist dieser Zwischenraum permanent an einen Wasserkreislauf mit Expansions- und Rekombinationsbehälter angeschlossen, so dass sich eine Gesamtkapazität von ca. 8 m³ Wasser sowie die Möglichkeit einer sich einstellenden Naturkonvektion ergibt. Wird das Ablassventil des Kreislaufes als stromlos offenes Magnetventil ausgeführt, entfällt somit auch die Notwendigkeit einer sicherheitsrelevanten Notstromversorgung. Abbildung 5.1-11 zeigt den Temperaturverlauf im Quecksilber und im Wasser mit und ohne passive Wärmeabfuhr für den Fall einer Notabschaltung aufgrund eines globalen Stromausfalles ohne zusätzliche aktive Kühlmaßnahmen. Die mittlere Quecksilbertemperatur wurde vereinfacht konservativ als Mittelwert der höchstzulässigen Targetein- und -austrittstemperatur angesetzt.

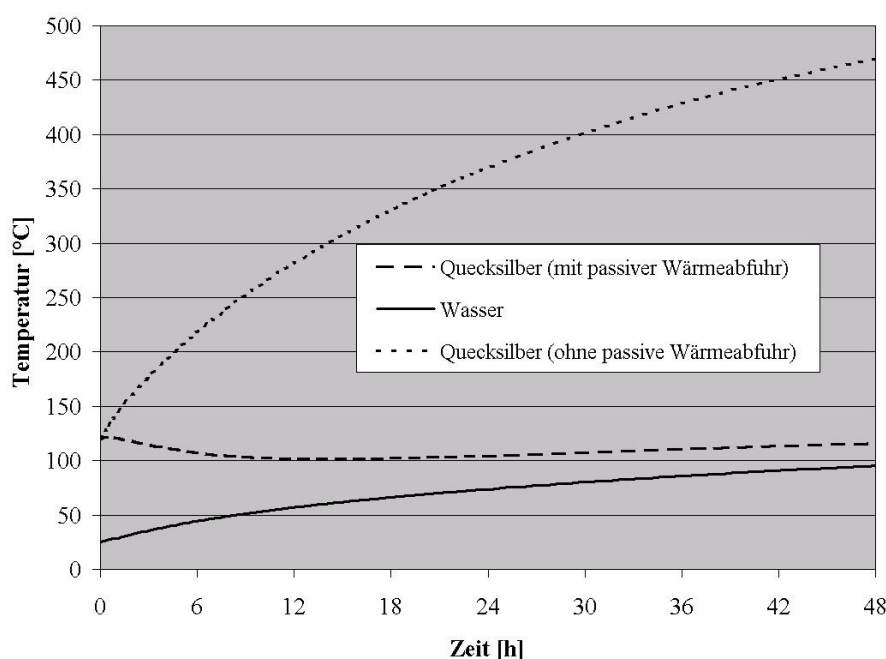


Abb. 5.1-11 Temperaturverlauf im Quecksilber mit und ohne passive Nachwärmeabfuhr

Durch die Anordnung des gesamten Quecksilbersystems auf dem Targetwagen kann der Kreislauf sehr klein und die Anzahl der notwendigen Flanschverbindungen niedrig gehalten werden. Während die Hauptkühlwasserleitungen aufgrund ihrer hohen Aktivität kupplungsfrei und dauerhaft über Vollmetallwellschläuche an die im Keller liegenden Rückkühlsysteme angeschlossen sind, sind vor dem Verfahren des Targetwagens einige Gas- und Signal- bzw. Stromversorgungsleitungen abzukoppeln.

Zur sicherheitstechnisch wichtigen Diagnose des Zustandes „Verlust der Wärmeabfuhr aus dem Target“ werden am Quecksilberkreislauf sowohl der Durchfluss als auch die Temperatur

im Vorlauf gemessen. Während die Messung der Temperatur über mindestens drei redundante Thermoelemente durchgeführt wird, wird der Durchfluss sowohl über einen permanent-magnetisch arbeitenden Durchflussmesser als auch über die Messung der Druckdifferenz zwischen Pumpenaustritt und –eintritt bei gleichzeitiger Kontrolle der Pumpendrehzahl redundant ermittelt. Wird sowohl die Einhaltung eines minimalen Durchflusses als auch einer maximalen Zulauftemperatur überwacht, ist eine unbemerkte Überschreitung der zulässigen Temperatur innerhalb des Targets unmöglich. Neben dem Füllstand wird als weitere sicherheitsrelevante Größe der Volumenanteil sowie die Größe der im Kreislauf befindlichen Heliumblasen erfasst, da diese für die Minderung des entstehenden Druckpulses und somit für die Vermeidung unzulässig hoher Belastungen der Targethülle erforderlich sind.

5.1.4. Aufbau der Protonenstrahlführung

Die hier als Protonenstrahlführung bezeichnete Strecke ist der jeweils letzte Abschnitt der vom Beschleuniger bzw. den Kompressorringen kommenden Protonenstrahlführung innerhalb des Gebäudes der Targetstation und gehört daher nicht zu den Systemen der Targetstation. Trotzdem hat die Strahlführung außer den geometrischen Schnittstellen zur Targetstation zwei wesentliche Auswirkungen auf die in dieser Arbeit besprochenen Systeme. Zum einen geht von der Strahlführung sowohl im Normalbetrieb als auch bei unterstelltem Strahlverlust eine nicht unerhebliche Strahlenbelastung für die benachbarten Bereiche der Targetstation aus, zum andern wird für die Bauteile der Strahlführung im Wartungs- und Reparaturfalle der Obere Handhabungsbereich und die dort verfügbaren Werkzeuge benutzt. Auf die Abschirmung wird in Kap. 5.3 weiter eingegangen werden, für die Handhabung sei auf Kap. 5.5 verwiesen.

5.1.5. Rohrleitungsführung aktivierter Kühlwasserkreisläufe

Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Konfiguration der Targetstation hat die Rohrleitungsverlegung der aktivierten Kühlwasserkreisläufe. Aufgrund der zu erwartenden Radio-lyseprodukte im Wasser sind diese Kreisläufe mit je einem kombinierten Expansions- und Rekombinationsbehälter ausgestattet. Diese Ausgleichsbehälter stellen gleichzeitig den höchsten Punkt des jeweiligen Kreislaufes dar. Wie in Abbildung 5.1-12 dargestellt, befinden sich alle Wärmequellen in etwa auf Höhe der Strahlachse und somit oberhalb der im Untergeschoss befindlichen Hauptkomponenten der zugehörigen Kühlkreisläufe. Mit Ausnahme der auf dem Targetwagen befindlichen Systeme werden alle hier angesprochenen Wärmequellen vertikal in Richtung Oberer Handhabungsbereich gehandhabt. Daher führen auch zwangsweise die zugehörigen Verrohrungen zunächst vertikal entlang der Handhabungs-achse bis zur Oberkante der Abschirmung. Um eine kontrollierte und abgeschirmte Führung der Rohrleitungssysteme zu ermöglichen und die Leitungen nicht unnötig zu verlängern, wurde daher eine Zwischenebene zwischen Oberkante der Abschirmung und Boden des Oberen Handhabungsbereiches geschaffen, welche Platz für die benötigten Räumlichkeiten schafft. Abbildung 5.1-13 zeigt die Anordnung der Räumlichkeiten sowie der wichtigsten Rohrleitungssysteme inklusive der Expansions- und Rekombinationsbehälter sowie einiger Verzögerungstanks. Von diesem Raum führt je ein Schacht rechts und links an der Heißen Zelle vorbei zu den im Untergeschoss gelegenen Rückkühlssystemen. Einer dieser Schächte führt gleichzeitig zum Übergabepunkt in der Wand der Heißen Zelle und somit zu den flexiblen Rohrleitungen des Targetwagens.

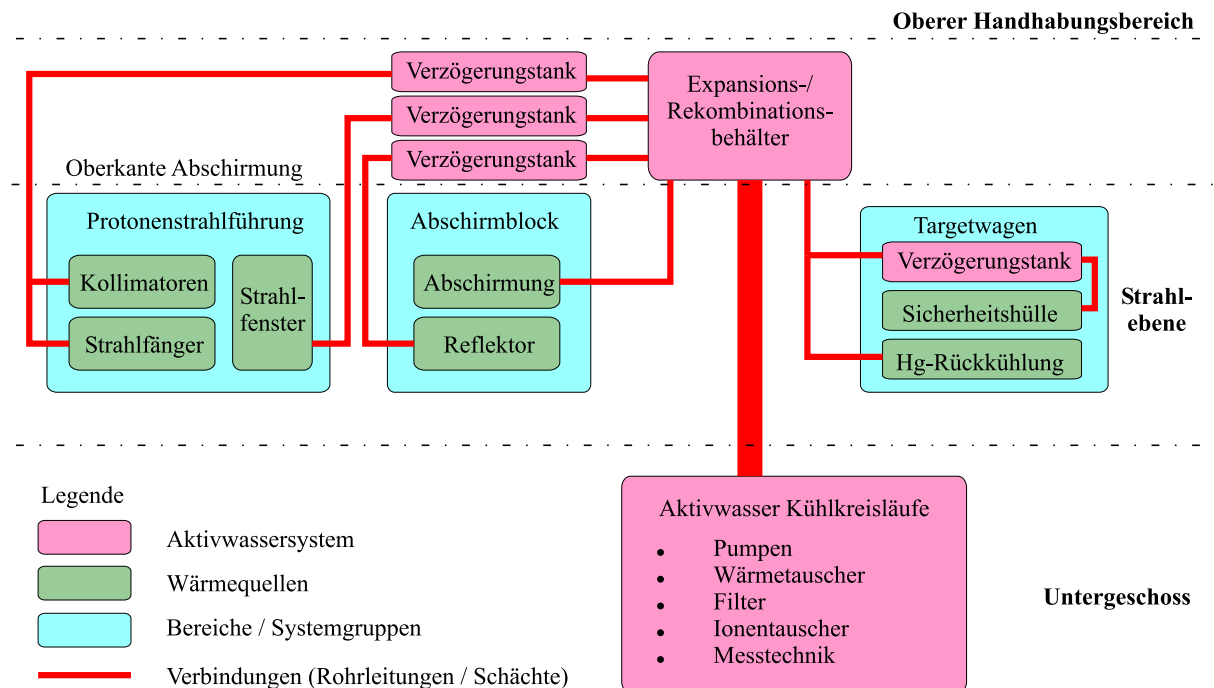


Abb. 5.1-12 Anordnung der Kühlsysteme und Verbraucher

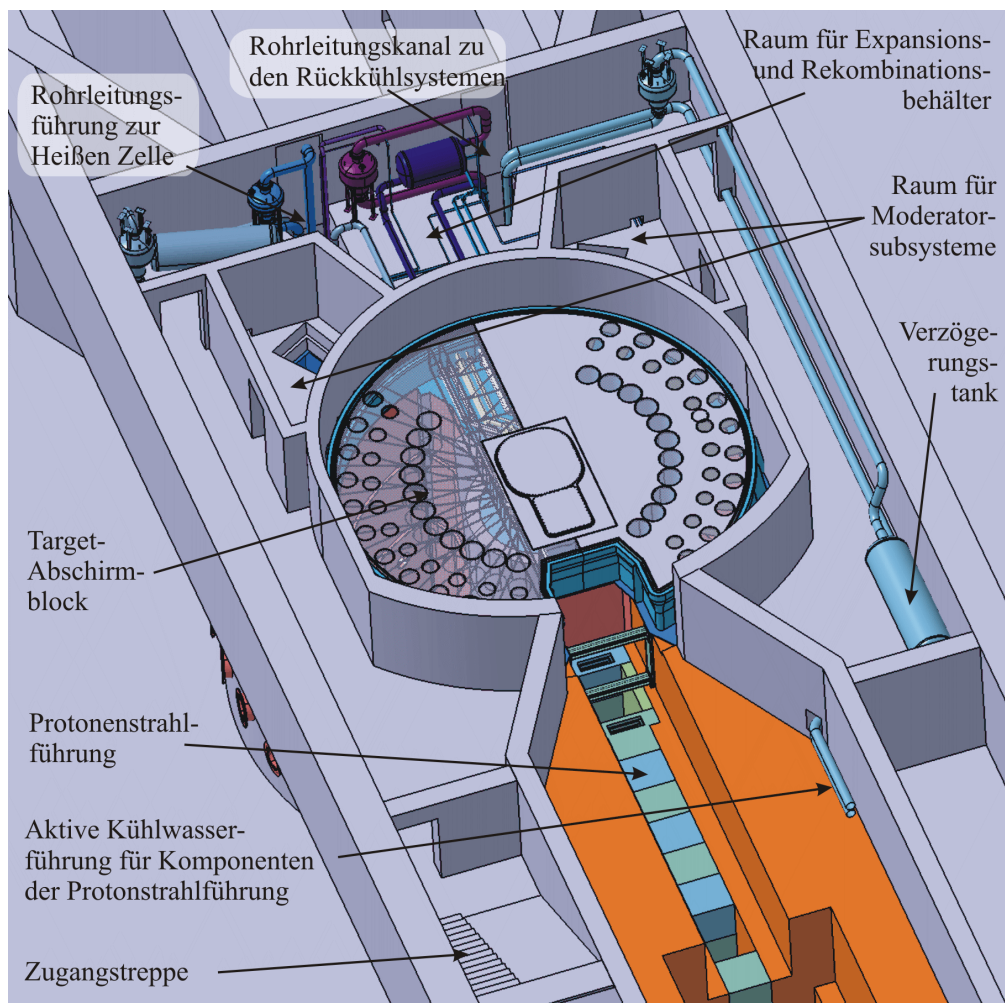


Abb. 5.1-13 Räume für Aktivwassersysteme unterhalb des Bodens des Oberen Handhabungsbereiches

Speziell bei Systemen, bei denen das Kühlwasser direkt vom Protonenstrahl durchdrungen wird, oder bei denen die Wasserführung in unmittelbarer Strahlnähe notwendig wird, ist mit verzögerten Neutronen im Kühlwasser mit einer Halbwertszeit von mehreren Sekunden zu rechnen. Hier empfiehlt es sich aus Gründen der Minimierung der Aktivierung der Rohrmaterialien die Verrohrung zwischen Wärmequelle und Verzögerungstank in Aluminium auszuführen sowie die Länge dieser Verrohrung kurz zu halten. Im Falle der Kühlung der Target-Sicherheitshülle wurde der Verzögerungstank auf den Targetwagen innerhalb des mobilen Abschirmblockes verlegt.

5.2. Einschlusssysteme

Aufgabe der Einschlusssysteme ist der sichere Einschluss gefährlicher Substanzen sowie die Verhinderung von Störfällen bzw. die Begrenzung von deren Auswirkungen auf durch Gesetze und Verordnungen vorgegebene Grenzwerte. Da die einzuhaltenden Grenzwerte sowohl vom späteren Standort als auch vom Errichtungszeitpunkt der Anlage abhängen, ist eine detaillierte Angabe dieser Grenzwerte zum jetzigen Zeitpunkt weder möglich noch sinnvoll. Daher sollen im Folgenden allgemeingültige Konzepte, Lösungsvorschläge und mögliche technische Umsetzungen aufgezeigt werden. Beim hier entwickelten und beschriebenen Konzept wird der Zustand der Anlage bei Strahlbetrieb berücksichtigt, die möglichen und notwendigen Systemzustände der Einschlusssysteme unter Handhabungsbedingungen werden in Kap. 5.5 beschrieben.

5.2.1. Randbedingungen

Die Entwicklung eines übergeordneten Einschlusskonzeptes zielt im Wesentlichen auf den sicheren Einschluss sicherheitsrelevanter Medien sowie beim Betrieb entstehender Nebenprodukte ab. Daher ist es zunächst notwendig, sich einen Überblick über das Gefährdungspotential der Medien innerhalb der verschiedenen Bereiche der Targetstation zu verschaffen. Vergleicht man die Aktivitäten der in Kap. 4.2 genannten hoch- und mittelflüchtigen Medien, so zeigt sich, dass das Hauptaugenmerk hierbei dem Quecksilber gelten muss. Trotzdem sollen im Folgenden sowohl Wasserstoff bzw. Methan aufgrund ihrer Fähigkeit, explosive Gemische zu bilden, als auch das Wasser wegen des damit verbunden Inventars an mittel- und langlebigen Isotopen berücksichtigt werden. Dabei sind neben den Medien selbst auch deren Betriebsparameter sowie die durch die direkte Umgebung gegebenen Randbedingungen zu berücksichtigen. Im Folgenden sollen daher systematisch die vorhandenen Medienkreisläufe bezüglich ihres Inventars und der Betriebsbedingungen innerhalb der in Kap 4.1 aufgeführten Bereiche der Targetstation untersucht werden. Da die Festlegung des übergeordneten Einschlusskonzeptes weit vor der Detaillierung der einzelnen Medienkreisläufe erfolgen muss, können Angaben zum Inventar sowie zu den zu erwartenden Betriebsparametern nur abgeschätzt werden. Diese Schätzungen sind durch Übernahme bzw. Extrapolation von Ergebnissen der ersten ESS-Studie /ES3 97/ sowie den im Bau befindlichen Spallationsquellen niedriger Leistung SNS und J-PARC vorgenommen worden.

Das gesamte Quecksilberinventar mit einer Aktivität von ca. 10^5 TBq (bzw. ca. 20 t Hg) befindet sich ausschließlich innerhalb eines geschlossenen Kreislafes, welcher auf einer Verfahreinheit (Targetwagen) montiert ist. Zu Wartungszwecken, insbesondere zum Targetwechsel, kann dieser Wagen vom Target-Nahbereich (1) in die Heißen Zellen (2) verfahren werden. Während sich das Target selbst in Betriebsposition innerhalb des Target Nahbereiches befindet, verbleibt der Rest des Kreislafes und damit das überwiegende Inventar in

der Heißen Zelle. Ein Öffnen des Kreislaufes, wie es z.B. beim Wechsel des Targets notwendig ist, bedingt ein Abschalten der Quelle sowie ein Entleeren des Quecksilberinventars in einen tiefer gelegenen Ablasstank. Auch dieser Ablasstank befindet sich zusammen mit den anderen Kreislaufkomponenten auf dem Targetwagen und damit innerhalb der Heißen Zelle.

Der vorderste Bereich des Targetbehälters dient als Strahlfenster für den Eintritt des Protonenstrahles in das Targetmaterial (Quecksilber). Aufgrund der daraus resultierenden hohen Strahlenbelastung und der Forderung nach einer Standzeit von ca. 3 Monaten ist mit einer nicht unerheblichen Versprödung des Materials während einer Betriebsperiode zu rechnen. Für die technische Auslegung des Targetbehälters gibt es keine vergleichbaren, im Betrieb befindlichen Anlagen, die eine Extrapolation und damit eine Abschätzung des Betriebsverhaltens zulassen. Im Gegensatz zu anderen Komponenten des Kreislaufes kann die Auslegung des Targetbehälters daher z.Z. nicht konservativ oder gar unter Berücksichtigung der Bedingungen für Bruchausschluss durchgeführt werden. Der endgültige Nachweis für die zu erreichende Lebensdauer wird sich bei einer Spallationsquelle dieser Leistung erst durch die gesammelte Betriebserfahrung führen lassen.

Im Versagensfall würde es zu einer Quecksilberkontamination des nahezu ausschließlich aus engen Spalten zwischen Abschirmblöcken bzw. Komponenten des Strahlverschlusssystems bestehenden Target-Nahbereiches kommen. Eine Dekontamination dieses Bereiches ist nur unter unvertretbar hohem Aufwand möglich. Aus diesem Grunde ist der Targetbehälter im vordersten Bereich mit einer zweiten, doppelwandigen, wassergekühlten Hülle, der Sicherheitshülle, ausgestattet (Abb. 5.2-1). Der überwiegende restliche Teil des Kreislaufes ist im Wesentlichen einer Gammastrahlung von bis zu 500 Sv/h im Betrieb ausgesetzt. Dies, die Betriebstemperaturen von bis zu 200°C sowie die Forderung der Auslegung für fernbediente Handhabung werden bei der technischen Auslegung der Kreislaufkomponenten berücksichtigt.

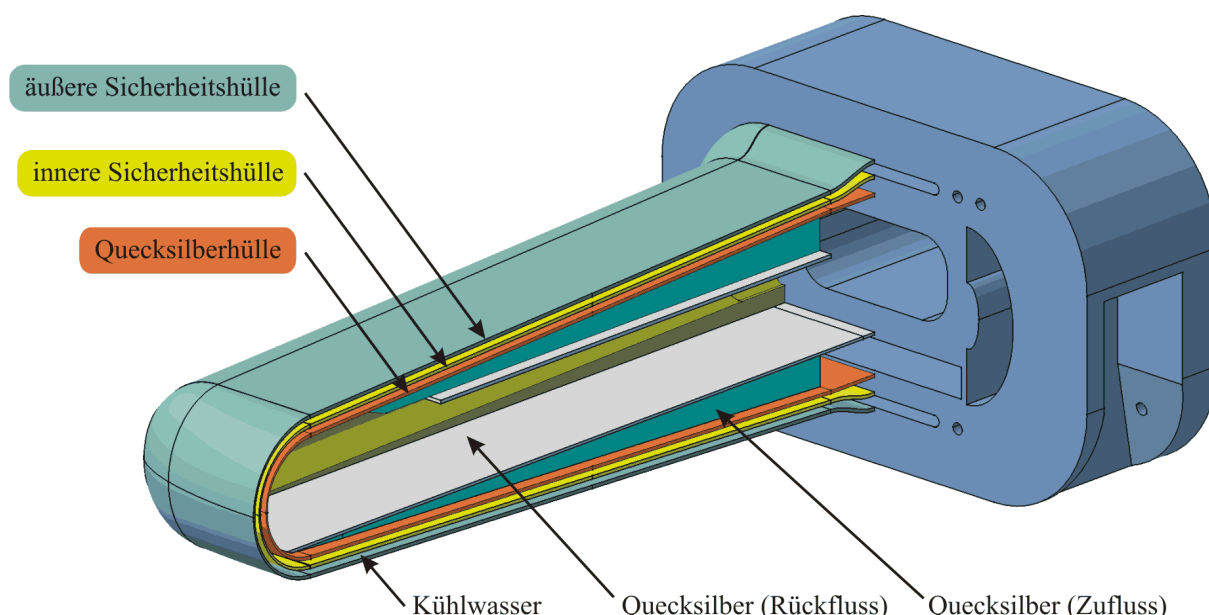


Abb. 5.2-1 Target Behälter inklusive Sicherheitshülle und Anschlussflansch

Die oberhalb und unterhalb des Targets angeordneten Moderatoren beinhalten je ca. 1 Liter flüssigen Wasserstoff bei ca. 20 K bzw. durch flüssigen Wasserstoff gekühltes festes Methan.

Der technische Aufbau eines eventuell nachzurüstenden Methanmoderators ist z.Z. noch weitgehend unbekannt. Für die Entwicklung des Einschlusskonzeptes wird daher zunächst nur von der Verwendung von Wasserstoffmoderatoren ausgegangen. Über vierfach konzentrische Leitungen sind diese mit den Kälteanlagen verbunden, welche sich seitlich neben dem Oberen Handhabungsbereich befinden. Diese Leitungen beinhalten neben den LH₂-Hin- und Rückflussleitungen einen Vakuumbereich zur Isolation sowie einen Heliummantel zur Detektion von Leckagen im Vakuummantel (Abb. 4.2-5). Obwohl dieses Rohrleitungssystem schon einen mehrfachen Einschluss in sich darstellt, muss im Versagensfall durch äußere Einflüsse, wie z.B. Erdbeben, von einem Versagen des gesamten koaxialen Rohrleitungssystem ausgegangen werden.

Bei den Kühlwasserkreisläufen muss zwischen Leicht- und Schwerwasser sowie der Art und Intensität der Strahlenbelastung unterschieden werden. Abgesehen von der Reflektorkühlung werden alle Wasserkreisläufe mit Leichtwasser betrieben. Im Gegensatz zu allen anderen Kreisläufen sind sowohl die Target-Sicherheitshülle als auch das Protonenstrahlenfenster direktem Protonenbeschuss ausgesetzt. Dies führt dazu, dass diese Kreisläufe neben der für einen Leichtwasserkreislauf unüblich hohen Tritiumbelastung eine hohe Be7-Produktionsrate aufweisen. Be7 neigt dazu, sich an den Rohrleitungswänden abzusetzen und führt so zu einer bleibenden Strahlenbelastung, auch nach Entleeren der entsprechenden Kreisläufe /BRO 93/ und /BAU 98b/. Vorteilig im Sinne des Einschlusskonzeptes ist hierbei jedoch, dass die Be7-Ablagerungen weitgehend ortsfest und somit wenig flüchtig sind. Extrapolationen von Betriebsmessungen der Spallationsquelle SINQ ergeben ein zu erwartendes Gesamtinventar dieser Kreisläufe von ca. 1 TBq Be-7 im Gleichgewichtszustand sowie eine Tritiumproduktion von ca. 1 TBq/Jahr /BAU 98b/. Als weitere Leichtwasserkreisläufe sind die Kühlung der inneren Abschirmung, die Kühlung der Strahlführungskollimatoren sowie die Wassermoderatoren zu nennen. Bis auf die Kollimatorkühlung und die Kühlung der Sicherheitshülle beschränken sich die Kreisläufe lediglich auf die Bereiche (1) und (4). Im Falle der Target-Sicherheitshülle und des Hauptkühlkreislaufes zur Rückkühlung des Quecksilbers verlaufen die medienführenden Leitungen zusätzlich durch die Heiße Zelle (2), im Falle der Kollimatorkühlung zusätzlich durch den Bereich der Protonenstrahlführung (3).

Tabellen 5.2-1 und 5.2-2 geben einen Überblick über das Inventar der einzelnen Medienkreisläufe innerhalb des Target-Nahbereiches sowie der Heißen Zelle. Zusätzlich zu den eigentlichen, zum Betrieb der Anlage notwendigen Medien sind, wo immer möglich, weitere zu erwartende relevante Randbedingungen für die einzelnen Bereiche aufgelistet. Im Bereich der Protonenstrahlführung ist neben den Kühlwasserleitungen für die aktiv zu kühlenden Strahlführungselemente, und hier insbesondere der Kollimatoren, lediglich mit einer Aktivierung von Gasen und Stäuben zu rechnen. Nahezu alle weiteren Komponenten der aktivierten Kühlmittelkreisläufe befinden sich in der Kühlzentrale innerhalb des Bereiches der unteren Nebenanlagen (4). Ausgenommen hiervon sind lediglich die Verzögerungstanks sowie die kombinierten Kühlmittelexpansions- und Rekombinationsgefäße, die an der höchsten Stelle des jeweiligen Kreislaufes positioniert werden müssen (Abb. 5.2-2). Die Betriebserfahrungen an der Neutronenquelle SINQ haben gezeigt, dass bei ausreichender Dimensionierung dieser Behälter ein Ablassen der Radiolysegase während des Normalbetriebes nicht notwendig ist.

Tabelle 5.2-1 Medien und deren zu erwartende Betriebsbedingungen innerhalb des Target-Nahbereiches

(1) Target-Nahbereich		
Medium	Inventar	Betriebsbedingungen / Randbedingungen
Hg	- ca. 20000 kg im Kreislauf (tangiert Bereiche (1) und (2)) - ca. 1000 kg innerhalb des Bereiches (1)	- Medientemperatur bis ca. 200°C (hoher Dampfdruck) - Medium ist hochgradig aktiviert (ca. 10⁵ TBq) mit Isotopen mittlerer bis langer Halbwertszeit - Behälterwand ist hoher Strahlenbelastung durch direkten Protonenbeschuss ausgesetzt (erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit) - Freies Volumen des Bereiches (1) besteht nahezu ausschließlich aus Spalten. Reinigungsaufwand bei Kontamination sehr hoch
LH ₂ (CH ₄)	- ca. 10 kg im Kreislauf (tangiert Bereiche (1) und (6)) - ca. 1 kg verteilt auf zwei Moderatoren innerhalb Bereich (1)	- Medientemperatur 20 K - Behälterwand ist hoher Strahlenbelastung durch Neutronen ausgesetzt (erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit) - Volumenzunahme bei Leckage durch Verdampfen / Verlust des Gesamtinventars von ca. 10 kg führt zur Gasfreisetzung von über 100 m³ unter Normbedingungen - H₂ (CH₄) Gas bildet mit Sauerstoff ein explosives Gemisch - Ex-geschützte Auslegung des Target-Nahbereiches nicht möglich, da der Protonenstrahl einen Strom bzw. eine elektrische Entladung und somit eine Zündquelle im Sinne der gültigen Ex-Schutz Richtlinie (z.B. 94/9/EG) darstellt.
D ₂ O	ca. 500 kg innerhalb des Reflektors nebst Verrohrung (tangiert Bereiche (1) und (4))	- Medientemperatur bis 50 °C wahrscheinlich - Behälterwand ist hoher Strahlenbelastung durch Neutronen ausgesetzt (erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit) - kleinste Leckagen führen zur Freisetzung von Tritium - Medium ist hoch aktiviert. Aktivität klingt aber schnell ab (Ausnahme: Tritium) - Ausreichend dimensionierte Ausgleichsbehälter zur Rekombination der Radiolysegase erforderlich.
H ₂ O	- wenige kg innerhalb des Protonenstrahlenfensters und der Target-Sicherheits-hülle - ca. 100 kg innerhalb der inneren gekühlten Abschirmung - Kreisläufe tangieren Bereiche (1) und (4) , Kreislauf für Target-Sicherheitshülle auch Bereich (2)	- Medientemperatur bis 50 °C wahrscheinlich - Behälterwand ist hoher Strahlenbelastung durch direkten Protonenbeschuss ausgesetzt (erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit) - Bildung von B-7 durch Protonenbeschuss des Wassers. B-7 scheidet sich an den Rohrwandungen als Belag ab. /BAU 98b/ - Medium ist hoch aktiviert. Zum Teil handelt es sich hierbei jedoch um kurzlebige Isotope, deren Aktivität relativ schnell abklingt. Durch Verzögerungsbehälter mit einer Zeitkonstante von ca. 100 s (entspricht 10 Halbwertszeiten des Isotopes N-16) kann sowohl die Strahlenbelastung als auch die Aktivierung der nachfolgenden Kreislaukomponenten (Bereich 4) entscheidend verringert werden. - Ausreichend dimensionierte Ausgleichsbehälter zur Rekombination der Radiolysegase erforderlich.
Sonst.	Aktivierung von Stäuben, Gasen und Spuren von verwendeten Konstruktionsmaterialien	- Inventar ist schwer abschätzbar - Inventar ist weitgehend hoch flüchtig - Inventar ist im gesamten Bereich (1) vorhanden

Tabelle 5.2-2 Medien und deren zu erwartende Betriebsbedingungen innerhalb der Heißen Zelle

(2) Heiße Zelle		
Medium	Inventar	Betriebsbedingungen / Randbedingungen
Hg	- ca. 20000 kg im Kreislauf (davon über 90% innerhalb des Bereiches (2)) - Kreislauf tangiert Bereiche (1) und (2)	- Medientemperatur bis ca. 200°C (hoher Dampfdruck) - Medium ist hochgradig aktiviert (ca. 10^5 TBq) mit mittlerer bis langer Halbwertszeit - Aufgrund von Handhabungsvorgängen, die ein Öffnen des Kreislaufes bedingen, ist auf Dauer mit einer nicht zu vermeidenden Quecksilberkontamination des Bereiches zu rechnen.
H ₂ O (Rückkühlung Hg bzw. passive Nachwärmeabfuhr)	ca. 5000 kg (Kreisläufe tangieren Bereiche (2) und (4))	- Medientemperatur bis 70 °C wahrscheinlich - Ausreichend dimensionierte Ausgleichsbehälter zur Rekombination der Radiolysegase erforderlich.
H ₂ O (Kühlung Sicherheitshülle)	ca. 100 kg innerhalb der innern gekühlten Abschirmung (Kreisläufe tangieren Bereiche (1) und (4))	- Medientemperatur bis 50 °C wahrscheinlich - Bildung von B-7 durch Protonenbeschuss des Wassers. B-7 mit einer Halbwertszeit von 52,3 Tagen scheidet sich an den Rohrwandungen als Belag ab. /BAU 98b/ - Medium ist hoch aktiviert. Zum Teil handelt es sich hierbei jedoch um kurzlebige Isotope, deren Aktivität relativ schnell abklingt. Durch Verzögerungsbehälter mit einer Zeitkonstante von ca. 100 s (entspricht 10 Halbwertszeiten des Isotopes N-16) kann sowohl die Strahlenbelastung als auch die Aktivierung der nachfolgenden Kreislaukomponenten (Bereich 4) entscheidend verringert werden. - Ausreichend dimensionierte Ausgleichsbehälter zur Rekombination der Radiolysegase erforderlich.
Gas	gasförmige Spallationsprodukte	Inventar ist hoch flüchtig

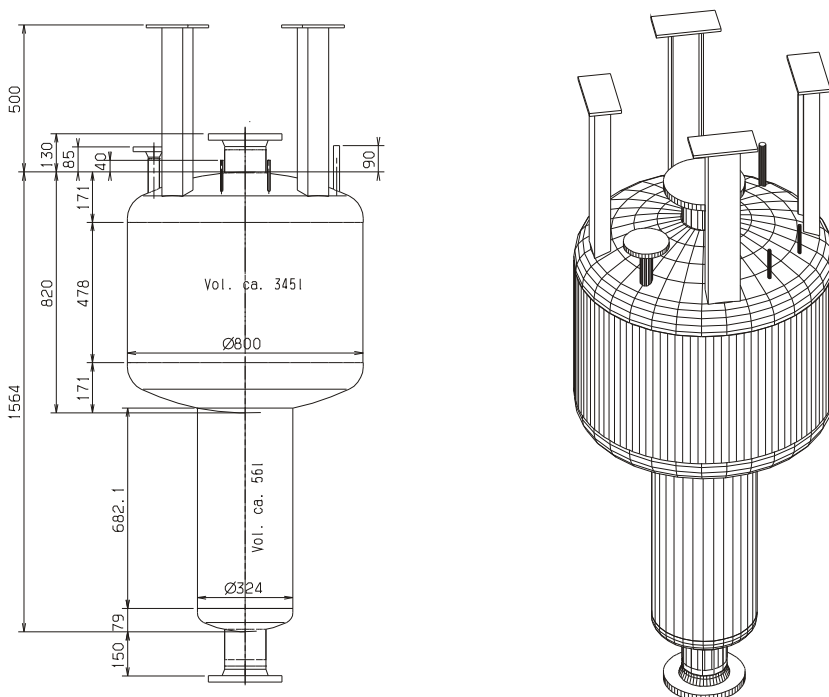


Abb. 5.2-2 Kombinierte Expansions- und Rekombinationsbehälter an der Spallationsquelle SINQ

5.2.2. Entwicklung des übergeordneten Einschlusskonzeptes

Für das Einschlusskonzept lassen sich die sicherheitsrelevanten Anforderungen wie folgt zusammenfassen:

- Sicherer Einschluss des aktivierten und chemisch toxischen Quecksilbers,
- Sicherer Einschluss des aktivierten Kühlwassers, insbesondere Vermeidung der Freisetzung von Tritium,
- Sichere Verhinderung der Bildung explosiver Gemische,
- Kontrollierte Lüftung in Bereichen, in denen aufgrund von aktivierten Gasen mit Korrosion zu rechnen ist.

Die übliche Verfahrensweise zur Verhinderung der Freisetzung aktivierter oder sonstiger toxischer Substanzen ist der mehrfache Einschluss unter zusätzlicher Verwendung einer Druckstaffelung mit niedrigstem Druckniveau im Bereich der einzuschließenden Substanzen. Dies verhindert auch bei unterstellter Undichtigkeit eines Einschlusssystems eine unkontrollierte Ausbreitung. Im Gegensatz dazu wird die Bildung explosiver Gemische üblicherweise durch einen Einschluss unter Inertgasatmosphäre bei erhöhtem Druckniveau verhindert. Damit wird gewährleistet, dass auch bei unterstellter Undichtigkeit kein Sauerstoff von außen in den Einschluss eindringen kann. Tritt brennbares Gas aus dem Einschluss aus, erfolgt eine sofortige Verdünnung, meist unterhalb der Explosionsgrenze. Somit ist eine Explosion innerhalb des Einschlusses mit Sicherheit und außerhalb des Einschlusses mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Im hier vorliegenden Fall liegen beide Problemstellungen innerhalb eines Bereiches der Targetstation, dem Target-Nahbereich, vor. Da aus Gründen der Effizienz der Quelle der Abstand zwischen Targetmaterial und Moderatormaterial möglichst klein gewählt werden soll, ist eine ausreichende räumliche Trennung, die die Umsetzung beider oben angesprochener Grundprinzipien innerhalb des Target-Nahbereiches gestatten würde, ausgeschlossen bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand zu realisieren. Daher kommt neben dem direkten ein- oder mehrfachen Einschluss von Target- bzw. Moderatormaterial, dem gemeinsamen inneren Einschlussbehälter (innerer Liner) eine besondere Bedeutung zu. Dieser ist daher Ausgangspunkt für die Entwicklung des übergeordneten Einschlusskonzeptes.

Aus der in Kapitel 5.1.2 entwickelten Anordnung und Position der Strahlverschlüsse ergeben sich geometrische Randbedingungen bei der Wahl der Größe dieses inneren Liners. Der Radius des inneren Liners kann somit entweder weniger als 1,6 Meter oder mehr als 4,4 Meter betragen. Ein Liner mit weniger als 1,6 Meter Radius würde zwar ein kleines inneres Volumen bedeuten, hätte aber eine hohe Strahlenbelastung während der anvisierten 40-jährigen Betriebszeit zur Folge. Eine Auslegung nach den Kriterien der Basissicherheit scheint angesichts der hohen Strahlenschädigung für den Liner in diesem Falle nicht durchführbar. Da es sich hierbei um ein sicherheitsrelevantes Bauteil handelt, dessen Ausfall einen Weiterbetrieb der Anlage unmöglich machen würde, ergäbe sich die Forderung nach einer Austauschbarkeit des inneren Liners. Ein regelmäßiger Ausbau bzw. Wechsel dieser hochaktivierten und recht großen Komponente, der fernbedient erfolgen müsste, würde einen ökonomisch unvertretbaren Aufwand darstellen und wird daher hier verworfen. Aus dieser Überlegung ergibt sich ein innerer Liner mit einem Durchmesser von mindestens 4,4 Meter. Dieser kann und wird während der Betriebszeit der Anlage nicht ausgewechselt und stellt

damit ein System der Gruppe 1 gemäß Kap. 3.3 mit allen Anforderungen bezüglich Auslegung und Qualitätssicherung während Fertigung, Montage und Betrieb dar. Dieser wird neben den einzuschließenden Komponenten Target, Moderatoren und Reflektor sowohl die Strahlverschlüsse als auch die inneren Abschirmstrukturen beinhalten. Das freie Volumen wird daher im Wesentlichen aus Spalten zwischen diesen Komponenten gebildet.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Forderungen ergeben sich drei grundsätzliche denkbare Optionen, wobei bei der ersten Option noch zwischen zwei Varianten zu unterscheiden ist:

- A1 Der innere Einschlussbehälter (Liner) wird unter leichtem Unterdruck betrieben. Die innere Atmosphäre wird während des Betriebes umgewälzt und auf Sauerstoff überwacht. Bei Überschreiten eines gewählten sicheren Grenzwertes wird eine Strahlabschaltung und eine Moderatorentleerung veranlasst.
- A2 Der innere Einschlussbehälter (Liner) wird unter leichtem Unterdruck betrieben. Sowohl der Behälter als auch alle zugehörigen Dichtungssysteme werden auf den zu erwarteten Explosionsdruck ausgelegt.
- B Der innere Einschlussbehälter (Liner) wird unter Grobvakuum betrieben.
- C Der innere Einschlussbehälter (Liner) wird unter leichtem Überdruck betrieben. Dieser wird von einem weiteren Einschluss, welcher unter leichtem Unterdruck betrieben wird, umschlossen.

Im Folgenden sollen die bei der technischen Realisierung der o.g. Optionen zu erwartenden Probleme diskutiert und letztlich die Entscheidung für eine Option als Basis für die weitere Entwicklung des Einschlusskonzeptes getroffen werden.

- A1 Durch die Druckstaffelung kann ein Austreten der einzuschließenden Substanzen bei unterstellter Leckage des Liners, bzw. dessen Dichtungssystemen mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Während der Liner und wenig strahlenbelastete und gut zugängliche Dichtungen als statisch dicht angesehen werden können, muss insbesondere der strahlenharten Metalldichtung zwischen Target-Nahbereich und Heißer Zelle aufgrund der an dieser Stelle für eine Metalldichtung nicht zu realisierenden hohen Anpressdrücke eine nicht zu vernachlässigende Restleckrate unterstellt werden. Damit ergibt sich die Forderung an eine zuverlässige und schnelle Detektion des Sauerstoffgehaltes sowie eine kontinuierliche Gasreinigung. Das freie Gasvolumen des inneren Liners besteht jedoch nahezu ausschließlich aus Spalten zwischen Abschirmblöcken bzw. Komponenten wie Target, Moderatoren und Strahlverschlüssen. Hier ist es zumindest fraglich, inwieweit dieses Volumen an einer gezielten Umwälzung teilnimmt.
- A2 Wie in Option A1 kann auch hier ein Austreten der einzuschließenden Substanzen mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Wird der Sauerstoffgehalt innerhalb des Liners nicht überwacht, so muss grundsätzlich mit der Möglichkeit der Bildung eines explosiven Gemisches gerechnet werden. Hierfür müsste jedoch ein katastrophales Versagen des mehrfach konzentrischen Rohrleitungssystems der Moderatorverrohrung unterstellt werden. Da die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Ereignisses extrem niedrig sein wird, ist die Überlegung, in diesem Falle eine Explosion zuzulassen und

lediglich die Auswirkungen zu begrenzen, durchaus legitim. Als problematisch zeigen sich bei der technischen Umsetzung allerdings die Neutronenstrahlfenster. Diese müssen aus Gründen der Strahlverluste des ausgekoppelten Neutronenstrahls möglichst dünnwandig sein und aus leichtem, für Neutronen möglichst transparentem Material bestehen. Eine Auslegung auf einen Explosionsdruck von zumindest einigen MPa scheint technisch nicht umsetzbar.

- B Wie in Option A kann auch hier ein Austreten der einzuschließenden Substanzen auf Grund des Druckgradienten mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Schon bei Grobvakuum (< 1 mbar) und unterstelltem reinem Sauerstoff als Restgas würde als Reaktionspartner für eine Knallgasexplosion lediglich ca. 1 Normliter Sauerstoff zur Verfügung stehen. Somit kann die bei dieser Reaktion frei werdende Energie als nicht sicherheitsrelevant eingestuft werden. Problematisch erweist sich hierbei jedoch die Auslegung der hoch strahlenbelasteten Dichtung zwischen Target-Nahbereich und Heißer Zelle. Basierend auf Erfahrungen an der Spallationsquelle ISIS, wo eine Dichtung unter vergleichbaren Bedingungen zum Einsatz kommt, muss deren Vakuumtauglichkeit zumindest bezweifelt werden. Ein weiteres Problem ergibt sich bei der Kühlung der im inneren Einschluss befindlichen rotierenden Strahlverschlüsse. Eine Gaskühlung durch Naturkonvektion oder gezieltes Anströmen wäre bei dieser Option ausgeschlossen. Eine somit notwendige innere Flüssigkeitskühlung der rotierenden Teile ist mit unvermeidbar hohem Aufwand verbunden.
- C Durch den Betrieb des inneren Liners unter Inertgas (He) mit leichtem Überdruck kann eine Kontamination mit Sauerstoff mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Um ein Austreten der einzuschließenden Substanzen sicher zu verhindern, ist ein weiterer umhüllender Einschluss notwendig, welcher unter leichtem Unterdruck gegenüber der äußeren Atmosphäre betrieben wird.

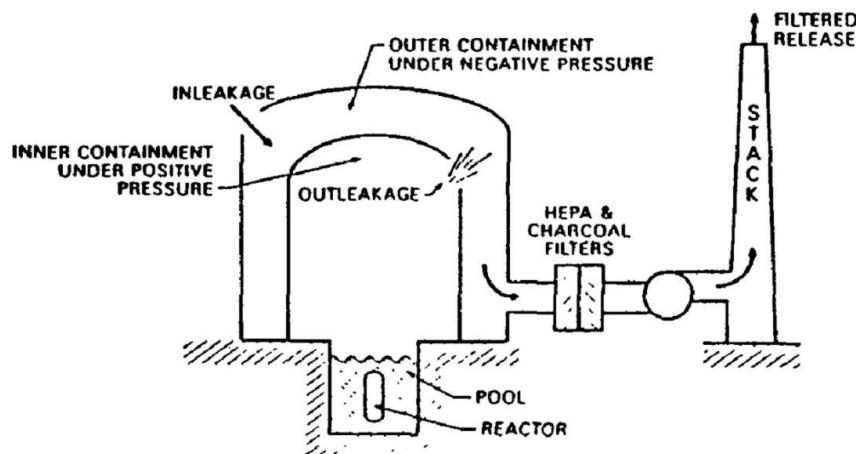


Abb. 5.2-3 Grundlegendes Einschlusskonzept der ANS-Reaktor-Studie /ANS 88/

Option C ist als einzige ohne weitere aufwendige Entwicklungsarbeiten zu strahlenharten und vakuumtauglichen Dichtungen einerseits, und optimierten Strömungsführungen innerhalb des inneren Liners andererseits, umsetzbar. Sie wird daher im Folgenden als Basis für das Einschlusskonzept Verwendung finden. Ein vergleichbarer Ansatz ist auch in der Konzeptstudie zum ANS „Advanced Neutron Source“ - Reaktor zu finden (Abb. 5.2-3) /ANS 88/. Für die weitere Ausarbeitung des Einschlusskonzeptes ist es notwendig, die geforderte Anzahl

von Einschlüssen für alle sicherheitstechnisch relevanten Substanzen festzulegen. Hierbei ist neben der Toxizität und Aktivität des betrachteten Mediums insbesondere die Flüchtigkeit und damit die zu erwartende Ausbreitungsgeschwindigkeit bei einer unterstellten Freisetzung zu berücksichtigen. In Anlehnung an Forderungen aus der ersten ESS-Studie sowie die einschlusstechnische Auslegung der Spallationsquelle SINQ /SIN 97/ werden daher für die technische Ausgestaltung der Einschlusssysteme folgende Forderungen erhoben:

- Mindestens 3-facher Einschluss des Quecksilbers, wobei der hoch strahlenbelastete Fensterbereich des Targetbehälters nicht als sicherheitsrelevante Barriere betrachtet wird.
- Mindestens 2-facher sauerstofffreier Einschluss des LH_2 (CH_4) innerhalb der Bereiche, wo eine Explosion zur Beschädigung des Quecksilbersystems oder zur Zerstörung tritiumhaltiger Kreisläufe führen würde. Einfacher, sauerstofffreier Einschluss des LH_2 (CH_4) in weniger sicherheitsrelevanten Bereichen. Die mehrfach koaxiale Leitung wird dabei nur als eine Barriere angesehen, da ein zeitgleiches Versagen des gesamten Rohrleitungssystems unterstellt werden muss.
- Mindestens 2-facher Einschluss der Tritium-belasteten Kreisläufe.
- Einfacher Einschluss sonstiger Medien, wie z.B. leicht aktivierter Gase bzw. Fortluft.

Bereiche innerhalb des Targetgebäudes, in denen mit häufigem Aufenthalt von Personen gerechnet werden muss, werden als zu schützende und nicht als Rückhalteräume eingestuft. Obwohl Instrumentenhalle und Oberer Handhabungsbereich aufgrund der dort zu handhabenden aktivierten Komponenten als geschlossene Räume ausgebildet und mit einem entsprechendem Lüftungssystem ausgestattet sind, werden sie bei der Entwicklung des Einschlusskonzeptes für den Betriebsfall nicht berücksichtigt. Abbildungen 5.2-4 und 5.2-5 zeigen das Schema des Einschlusskonzeptes /BUT 03b/. Jedes Medium ist durch eine Farbe und jede Barriere durch eine durchgezogene schwarze Linie dargestellt. Da die möglichen Ausbreitungspfade sowohl für die einzelnen Medien als auch für den gewählten Ausgangspunkt sehr unterschiedlich sind, müssen alle denkbaren Pfade systematisch untersucht werden. Tabellen 5.2-3 und 5.2-4 zeigen das Ergebnis dieser Untersuchung für die Medien Quecksilber und Wasser. Die gestrichelte Linienführung in den Abbildungen 5.2-4 und 5.2-5 stellen beispielhaft die Begrenzungen der Einschlüsse für das im Targetbehälter befindliche Quecksilber dar.

Mit Ausnahme der rechts und links seitlich der Heißen Zelle angeordneten Bedienbereiche sind alle wesentlichen, für das Einschlusskonzept relevanten Bereiche und Barrieren in den Abbildungen 5.2-4 und 5.2-5 dargestellt. Die Bedienbereiche sind jeweils durch eine Barriere sowohl von der Heißen Zelle (Fenster; Manipulatorwanddurchführungen) als auch von der Instrumentenhalle (feste Wand) abgetrennt. Tabellen 5.2-3 und 5.2-4 zeigen, dass die o.g. Forderungen zur notwendigen Anzahl der Einschlüsse für die jeweiligen Medien im Wesentlichen eingehalten werden können. Einzige Ausnahme stellt die Ausbreitung von Quecksilber von der Kreislaufverrohrung innerhalb der Heißen Zelle hin zum Bedienbereich dar. Dies ist aber unter Berücksichtigung der besonderen, restriktiven Zugangsregelung und der niederfrequenten Zugangshäufigkeit in diesem Bereich, insbesondere während des Strahlbetriebes, tolerierbar.

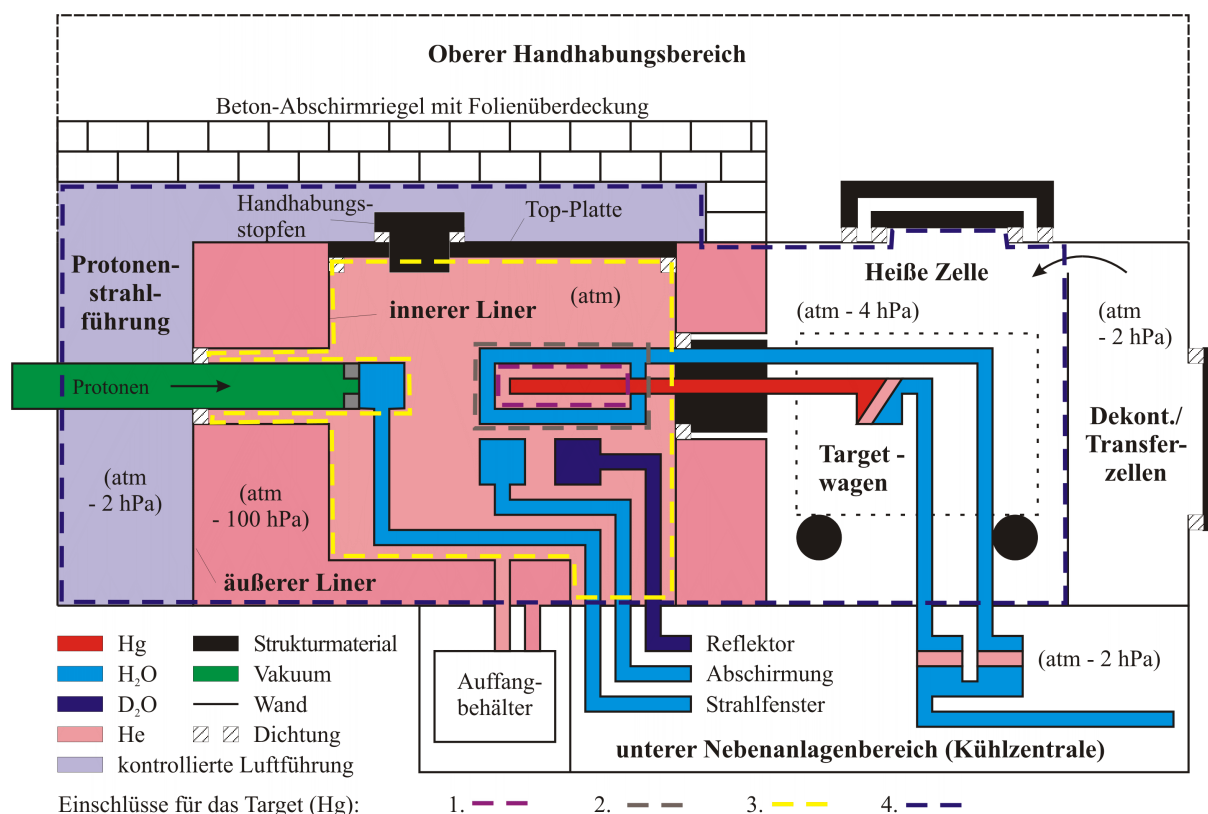


Abb. 5.2-4 Einschlusskonzept im Längsschnitt (atm = umgebender Atmosphärendruck), schematisch

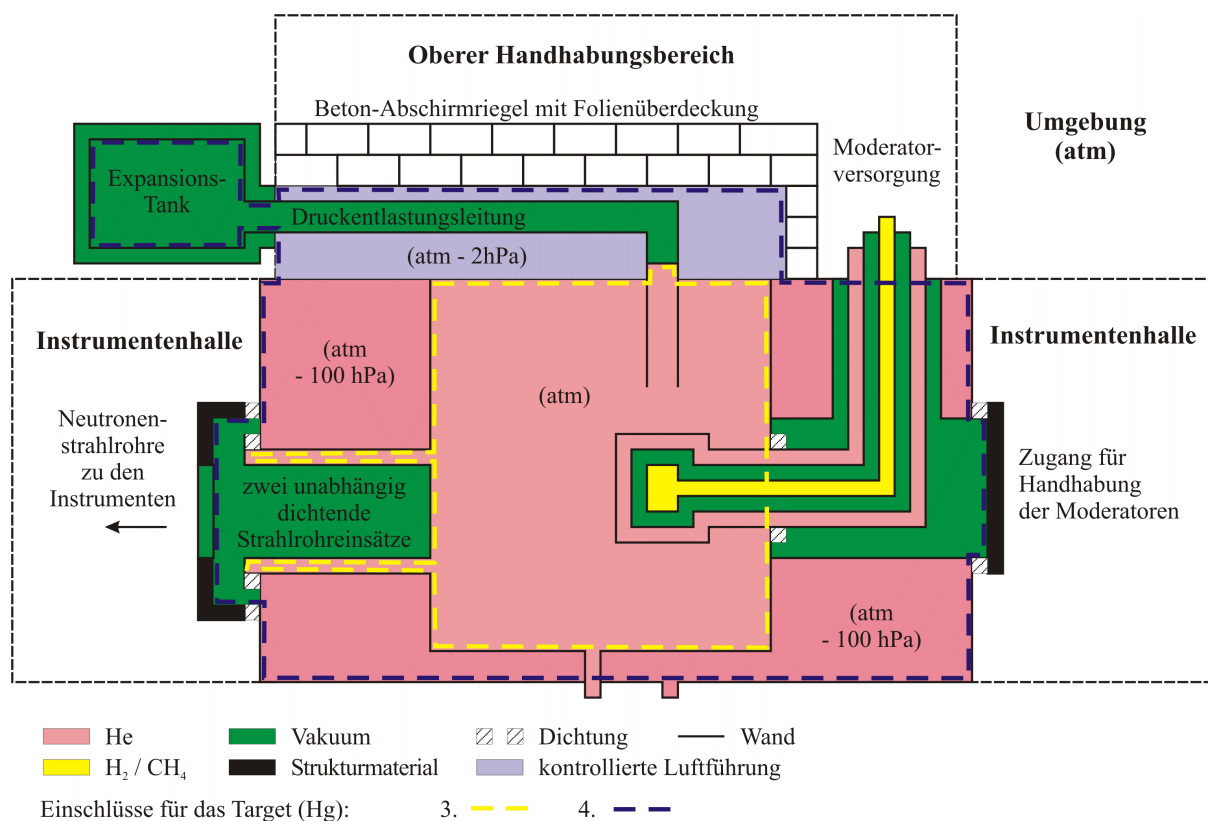


Abb. 5.2-5 Einschlusskonzept im Querschnitt mit Moderator und Neutronenstrahlrohr, schematisch

Tabelle 5.2-3 Ausbreitungspfade für Quecksilber (geforderter Einschluss: 3-fach)

Ausbreitung von – nach	Barrieren	Art der Barriere	Anzahl Barrieren
Target Behälter – Oberer Handhabungsbereich	1. innere Wand der Sicherheitshülle 2. äußere Wand der Sicherheitshülle 3. Innerer Liner 4. Folienüberdeckung	1. durchgeschweißte Wand 2. durchgeschweißte Wand 3. Dichtung des Handhabungsstopfens (Druckdifferenz, Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 4. Druckdifferenz, Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung	4
Targetflansch – Oberer Handhabungsbereich	1. Flansch 2. Innerer Liner 3. Folienüberdeckung	1. Metalldichtung 2. Dichtung des Handhabungsstopfens (Druckdifferenz, Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Druckdifferenz, Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung	3
Targetflansch – Transferzelle	1. Flansch 2. Liner – Targetwagen Dichtung 3. Abschirmtor zur Dekontaminations-Zelle 4. Transferzelle	1. Metalldichtung 2. Aufblasbare Metallbalgdichtung (Druckdifferenz, Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Druckdifferenz, Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung 4. dicht schließende Tür	4
Targetflansch – Heiße Zelle – Oberer Handhabungsbereich	1. Flansch 2. Liner – Targetwagen Dichtung 3. erste Deckeldichtung im Dach der Heißen Zelle 4. zweite Deckeldichtung	1. Metalldichtung 2. Aufblasbare Metallbalgdichtung (Druckdifferenz, Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Dichtung mit Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung 4. Dichtung mit Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung	4
Hg-Verrohrung – Oberer Handhabungsbereich	1. Verrohrung 2. erste Deckeldichtung im Dach der Heißen Zelle 3. zweite Deckeldichtung	1. Flansche mit Metaldichtung 2. Dichtung mit Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung 3. Dichtung mit Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung	3
Hg-Verrohrung – Transferzelle	1. Verrohrung 2. Abschirmtor zur Dekontaminations-Zelle 3. Transferzelle	1. Flansche mit Metaldichtung 2. Druckdifferenz, Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung 3. dicht schließende Tür	3
Hg-Verrohrung – Bedienbereich	1. Verrohrung 2. Heiße Zelle	1. Flansche mit Metaldichtung 2. Durchführungen für Manipulatoren sowie Sichtfenster (zusätzlich Druckdifferenz, Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung)	2
Hg-Verrohrung – Rückkühlsystem	1. + 2. doppelwandiger Wärmetauscher zum Zwischenkreislauf 3. + 4. doppelwandiger Wärmetauscher zum Rückkühlsystem	1. durchgeschweißte Wand 2. durchgeschweißte Wand 3. durchgeschweißte Wand 4. durchgeschweißte Wand	4

Der in Abbildung 5.1-13 gezeigte Raum für Expansions- und Rekombinationsbehälter ist über einen Rohrleitungsschacht mit der im Untergeschoss befindlichen Kühlwasserzentrale verbunden und zählt gemäß des hier vorgestellten Einschlusskonzeptes somit zum Unteren Nebenanlagenbereich.

Tabelle 5.2-4 Ausbreitungspfade für tritiumhaltige Medien (geforderter Einschluss: 2-fach)

Ausbreitung von – nach	Barrieren	Art der Barriere	Anzahl Barrieren
Reflektor (D ₂ O) – Oberer Handhabungsbereich	1. Reflektorbehälter bzw. -verrohrung 2. Innerer Liner 3. Folienüberdeckung	1. durchgeschweißte Wand bzw. Flanschdichtung 2. Dichtung des Handhabungsstopfens (Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Druckgradient entgegen Ausbreitungsr.	3
Verrohrung Kühlzentrale – Kellerbereich	1. D ₂ O bzw. H ₂ O Verrohrung 2. Tür der Kühlzentrale	1. Flanschdichtung 2. Türdichtung (Druckdifferenz, Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung)	2
Sicherheitshülle (H ₂ O) – Oberer Handhabungsbereich	1. äußere Wand der Sicherheitshülle 2. Innerer Liner 3. Folienüberdeckung	1. durchgeschweißte Wand 2. Dichtung des Handhabungsstopfens (Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung	3
Innere Abschirmung (H ₂ O) – Oberer Handhabungsbereich	1. Abschirmstruktur bzw. Verrohrung 2. Innerer Liner 3. Folienüberdeckung	1. durchgeschweißte Wand bzw. Flanschdichtung 2. Dichtung des Handhabungsstopfens (Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Druckgradient entgegen Ausbreitungsrichtung.	3
Protonenstrahlfenster (H ₂ O) – Oberer Handhabungsbereich	1. Wand des Strahlfensters bzw. Verrohrung 2. Innerer Liner 3. Folienüberdeckung	1. durchgeschweißte Wand bzw. Flanschdichtung 2. Dichtung des Handhabungsstopfens (Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Druckgradient entgegen Ausbreitungsr.	3
Targetwagen Zwischenkreislauf (H ₂ O) – Oberer Handhabungsbereich	1. Verrohrung des Zwischenkreislaufes 2. erste Deckenstopfendichtung der HZ 3. zweite Deckenstopfendichtung der HZ	1. Flanschdichtung bzw. Kreislaufkomponenten 2. Dichtung des Deckenstopfens (Druckgradient in Ausbreitungsrichtung) 3. Dichtung des Deckenstopfens (Druckgradient in Ausbreitungsrichtung)	3

5.2.3. Gassysteme

Die Anforderungen an die Gassysteme sind sehr vielfältig und unterscheiden sich je nach Einsatzzweck des jeweiligen Systems. Gaskreisläufe und Lüftungssysteme erfüllen zum Teil die Funktion des Einschlusses radioaktiver Substanzen im Störfalle. Ihnen kommt daher aus sicherheitstechnischer Sicht eine besondere Bedeutung zu. Diese Anlagenteile sind daher sowohl an eine vorhandene Notstromversorgung angeschlossen als auch redundant ausgelegt, um ihre sicherheitstechnische Funktion unter allen Umständen während eines Störfalles aufrecht zu erhalten.

Zum Teil wird über diese Kreisläufe auch Wärme abgeführt, die von der H₂O- und D₂O-Kühlung der innerhalb dieser Gassysteme liegenden Komponenten nicht abgenommen werden kann oder bei denen bewusst auf eine solche Wasserkühlung verzichtet wurde. In besonderem Maße betrifft dies die Kühlung der inneren, nicht wassergekühlten Abschirmung außerhalb eines Radius von ca. 1,6 m. Ein Teil der hier anfallende Wärmeleistung von ca. 100 kW wird durch die umgewälzte Heliumatmosphäre innerhalb des inneren Liners abgeführt. Die Strömungsrichtung innerhalb der inneren Abschirmung wird entgegen der Naturkonvektion abwärts gerichtet ausgeführt, um die Oberseite des Abschirmblockes

möglichst frei von radioaktiven Stäuben und Korrosionspartikeln zu halten. Dadurch reduziert sich die Gefahr einer Verschleppung von Kontamination beim Öffnen von Deckeln in der Top-Platte sowie bei Handhabungsvorgängen der direkt darunter befindlichen Komponenten.

Einige Gaskreisläufe und Lüftungssysteme dienen zu Erhaltung und Überwachung eines korrosionshemmenden Klimas. Neben der Heißen Zelle ist hier insbesondere die Protonenstrahlführung zu nennen. Durch die teilweise sehr hohen Ortsdosisleistungen entstehen nicht unerhebliche Mengen NO_x, die sich bei vorhandener Luftfeuchtigkeit in das extrem korrosionsfördernde NHO umwandeln. Durch gezielte Durchlüftung sowie Verwendung von getrockneter Zuluft kann dieses Problem signifikant reduziert werden.

Der Einschluss radioaktiver Substanzen basiert zum Teil auf der Verwendung von mehreren gestaffelten Gassystemen bei gleichzeitiger Wahl geeigneter Druckabstufung. Den Niederdruck-Gassystemen fällt daher zusätzlich die Aufgabe der Dichtigkeitsüberwachung der jeweils benachbarten Gassysteme höheren Druckes zu. Durch Gasanalyse mittels Massenspektrometer ist somit auch eine Aussage möglich, welches benachbarte System Undichtigkeiten aufweist. Bei den verwendeten Doppeldichtsystemen mit Zwischenraumüberwachung wird aufgrund der nicht auszuschließenden Undichtigkeit an einer einzelnen Dichtung eine Aufteilung der Überwachungsstränge in Untergruppen bzw. Systeme zur Vereinfachung der Fehlersuche eingeführt (Abb. 5.2-6). Durch die Möglichkeit, zunächst einzelne Stränge und anschließend einzelne Dichtungen über Ventile vom Vakuumsystem zu trennen, wird eine schnellere Lokalisierung der fehlerhaften Dichtung möglich. Tabelle 5.2-5 zeigt die wichtigsten Gas- und Lüftungssysteme.

Tabelle 5.2-5 Aufstellung der wichtigsten Gassysteme

System	Medium	zu Überwachen auf	Bemerkung
Innerer Liner	Helium (umgewälzt)	O ₂ , N ₂ , H ₂ , CH ₄	Wärmeabfuhr
Äußerer Liner	Helium (statisch)	Druckanstieg	hermetisch verschweißt
Protonenstrahlführung	Trockene Luft	He, H ₂ , CH ₄ , Unterdruck	Durchlüftung
Heiße Zelle	Trockene Luft	Hg, He, H ₂ , CH ₄ , Unterdruck	Durchlüftung
Neutronenstrahlrohre	Vakuum	O ₂ , N ₂ , He	Dichtigkeitsüberwachung
Dichtungen Top-Platte	Vakuum	O ₂ , N ₂ , He	Dichtigkeitsüberwachung

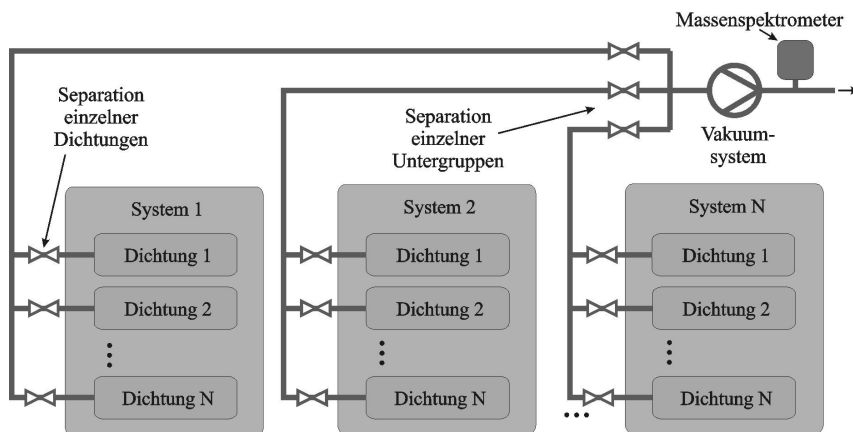


Abb. 5.2-6 Ventilanordnung der Überwachungsstränge für die Zwischenräume der Doppeldichtsysteme

5.2.4. Linersystem

Das Linersystem (Abb. 5.2-7) stellt das Herzstück der Einschlussysteme dar und setzt sich zusammen aus innerem Liner, äußerem Liner, Top-Platte und Strahlrohreinsschüben zur Auskopplung der Neutronenstrahlen. Der Abschluss des Linersystems zum Vakuum der Protonenstrahlführung erfolgt über das Protonenstrahlfenster, der Abschluss zur Heißen Zelle durch eine auf dem Targetwagen befindliche Dichtung.

Auslegungskriterium für den inneren Liner ist neben der Forderung nach vertretbarer Strahlenschädigung während der Lebensdauer der Anlage im Wesentlichen die Druckbelastung bei Normalbetrieb und möglichen Störfällen. Während im Normalbetrieb die größte Druckdifferenz zwischen innerem und äußerem Liner ca. 100 hPa (0,01 MPa) nicht überschreitet, muss zur Vorbereitung von Handhabungsvorgängen, für Komponenten innerhalb des inneren Liners, dessen Atmosphäre ausgetauscht und damit zwischenzeitlich evakuiert werden. Der höchste anzunehmende Druck innerhalb des inneren Liners ergibt sich bei Annahme einer Leckage einer kryogenen Moderatorleitung und dem damit verbundenen Druckaufbau. Bis sich das Sicherheitsventil bzw. die Berstscheibe zum Expansionstank öffnet, muss aus technischen Gründen eine endliche, wenn auch kleine, Druckdifferenz aufgebaut werden. Bei den größtenteils zylinderförmigen Strukturen des inneren Liners wird der Belastungsfall „Vakuum“ die Auslegung dominieren. Für ebene Flächen, wie z.B. Top-Platte und Strahlfenster wird als zulässige Druckdifferenz 0,15 MPa angesetzt. Dies entspricht einer Belastung durch Vakuum zuzüglich eines Sicherheitszuschlages von 50% bzw. einem inneren Überdruck von 1,5 bar als ausreichend dimensionierte Ansprechschwelle einer Berstscheibe.

Hauptmerkmal des Linersystems ist der hermetische Einschluss des durch äußeren und inneren Liner gebildeten Volumens. Beide Liner sind dazu sowohl miteinander als auch mit den durchgesteckten Hüllrohren zur Aufnahme der Strahlrohreinssätze dicht verschweißt. Der einzige geflanschte Zugang zu diesem Volumen besteht aus einer Messleitung zur Überwachung des statischen Druckes. Dieser ist mit ca. 100 hPa unterhalb des Umgebungsdrucks und damit unterhalb des Betriebsdruckes des inneren Liners ausreichend bemessen, um trotz thermischen und barometrischen Effekten eine Undichtigkeit mit Sicherheit detektieren zu können. Daher kann für beide Linervolumen Helium ohne zusätzliche Tracergase als Betriebsmedium gewählt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass das hermetisch eingeschlossene Volumen während der gesamten Betriebszeit der Anlage nie geöffnet werden muss. Dies erlaubt den Einsatz von unspezifiziertem und damit preisgünstigem Abschirmmaterial innerhalb dieser Region.

Innerhalb des inneren Liners befinden sich eine nicht unerhebliche Anzahl von Komponenten, die eine Zugänglichkeit aus Wartungs- oder Reparaturgründen erfordern. Für einige dieser Handhabungen ist ein Öffnen des inneren Liners gegen die Atmosphäre der Heißen Zelle oder auch des Oberen Handhabungsbereiches unumgänglich. Die Anforderungen an die Materialien und Oberflächenbeschaffenheit der Komponenten und Abschirmblöcke innerhalb des inneren Liners sind daher erheblich höher. Um diesen Raum so klein wie möglich zu halten, wird der innere Liner in den Bereichen, in denen keine Strahlverschlüsse angeordnet sind soweit eingezogen, wie dies aus Gründen der Strahlenschäden vertretbar erscheint. In Anlehnung an die Linerauslegung der Spallationsquelle SNS wird hier eine maximale Strahlenschädigung von 1 dpa im Linermaterial innerhalb von 40 Volllastjahren gefordert, was zu einer ausreichenden verbleibenden Restduktilität führt. Nach ersten Abschätzungen und Analogieschluss zur SNS-Linerauslegung ergibt sich ein einzuhaltender Minimalabstand von ca. 2,5 m vom Spallationsmittelpunkt. Nach oben hin ist der innere Liner gestuft

ausgeführt, um ausreichende Versätze der vertikalen Spalte zwischen den Abschirmungsböcken im inneren und äußeren Liner zu gewährleisten.

Der zylindrische Teil des inneren Liners besteht aus drei Schüssen mit einer maximalen Schusshöhe von 2500 mm und einem maximalem Schussdurchmesser von 9250 mm. Die in den unteren Schuss eingeschweißten und mit dem äußeren Liner verbundenen Neutronenstrahlrohre können ebenso wie die Stufungen und der obere Abschlussrand als wirksame Beulversteifung gegen äußeren Überdruck angesehen werden. Die Einzüge im Bereich des Protonenstrahleintritts sowie der Targetöffnung werden entsprechend ausgesteift, um die Unterbrechung der, grundsätzlich für die Auslegung auf Außen- sowie Innendruck günstigen, Zylinderform zu überbrücken.

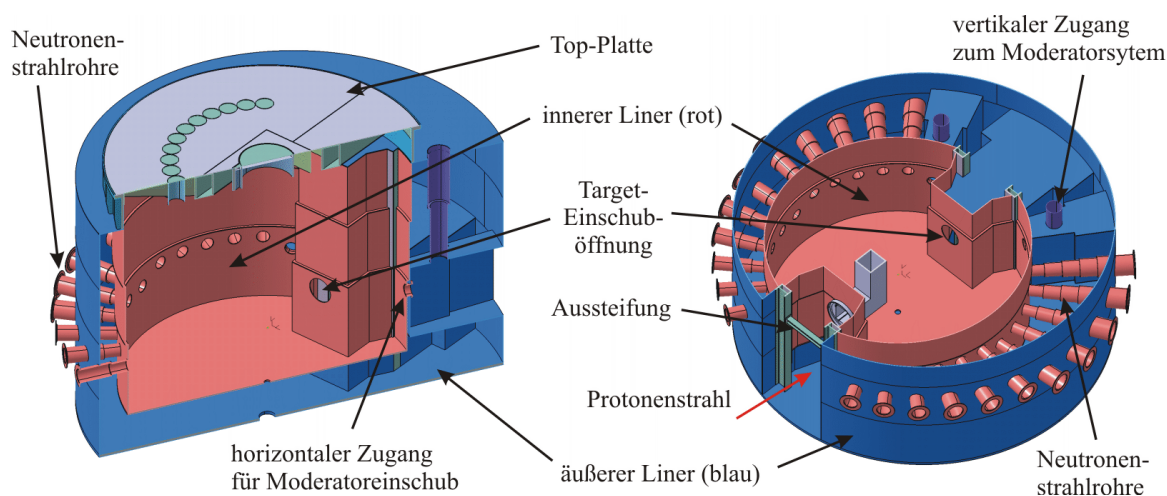


Abb. 5.2-7 Linersystem mit Top-Platte

5.2.5. Top-Platte

Den oberen Abschluss des inneren Liners bildet die Top-Platte (Abb. 5.2-8). Diese Platte mit einem Durchmesser von ca. 10 m enthält Flansche, die den Zugang zum Protonenstrahlfenster, zum Reflektor sowie den regulär zu handhabenden Komponenten des Strahlverschlusssystems ermöglichen. Für den als unwahrscheinlich anzunehmenden Fall der Reparatur eines Strahlverschlusslagers ist die Top-Platte als Ganzes abnehmbar. Nach Entnahme einiger Abschirmblöcke können dann die Strahlverschlussräder mit Lager entnommen werden. Durch die große Öffnung, durch die notfalls das gesamte Inventar des inneren Liners nach oben hin entnommen werden kann, ist weiterhin die Möglichkeit geschaffen worden, wenn auch unter erheblichem Aufwand, auf größere nicht vorhergesehene Unfälle sowie später evtl. aufkommende Modifikationswünsche reagieren zu können.

Für alle Dichtungen im Bereich der Top-Platte, sowie auch für die Dichtung der Platte gegen den inneren Liner können kommerziell erhältliche, organische Dichtmaterialien eingesetzt werden. Obwohl nicht vom Einschlusskonzept gefordert, werden alle Dichtungen als Doppeldichtungen mit Zwischenraumüberwachung ausgeführt. Dies erhöht die Gesamtkosten nur unerheblich, trägt aber zu einer besseren Eingrenzbarkeit von Dichtungsfehlern und damit zu einer schnelleren Reparatur und höheren Verfügbarkeit der Anlage bei. Die Dichtflächen der in der Top-Platte befindlichen Flansche sind so bemessen, dass sie sich vor Einschweißen in die Top-Platte in einer Aufspannung spanend bearbeiten lassen. Hier ist selbst bei Einsatz konventioneller Dichtungstechnik eine niedrige Leckrate zu erwarten.

Erste FEM-Rechnungen zeigen, dass ein 25 mm dickes Stahlblech mit zur Mitte hin zunehmender Verrippung und zwei Hauptträgern im Bereich der kürzesten Spannweite eine ausreichende Festigkeit aufweist. Die maximale Durchbiegung in Plattenmitte beträgt etwa 12 mm für den Fall des inneren Überdruckes. Beim häufiger auftretenden Fall des äußeren Überdruckes legen sich die Hauptträger der Top-Platte über dafür vorgesehene Unterstüztungen auf der inneren Abschirmung ab. Hierdurch wird sowohl die Durchbiegung als auch die Spannungen innerhalb der Top-Platte soweit reduziert, dass eine Auslegung nach den Regeln des Bruchausschlusses möglich ist. Diese Konstruktion ermöglicht zudem ein Gesamtgewicht der Top-Platte unter 38 t. Damit ist diese mit dem Deckenkran der Oberen Handhabungszelle handhabbar.

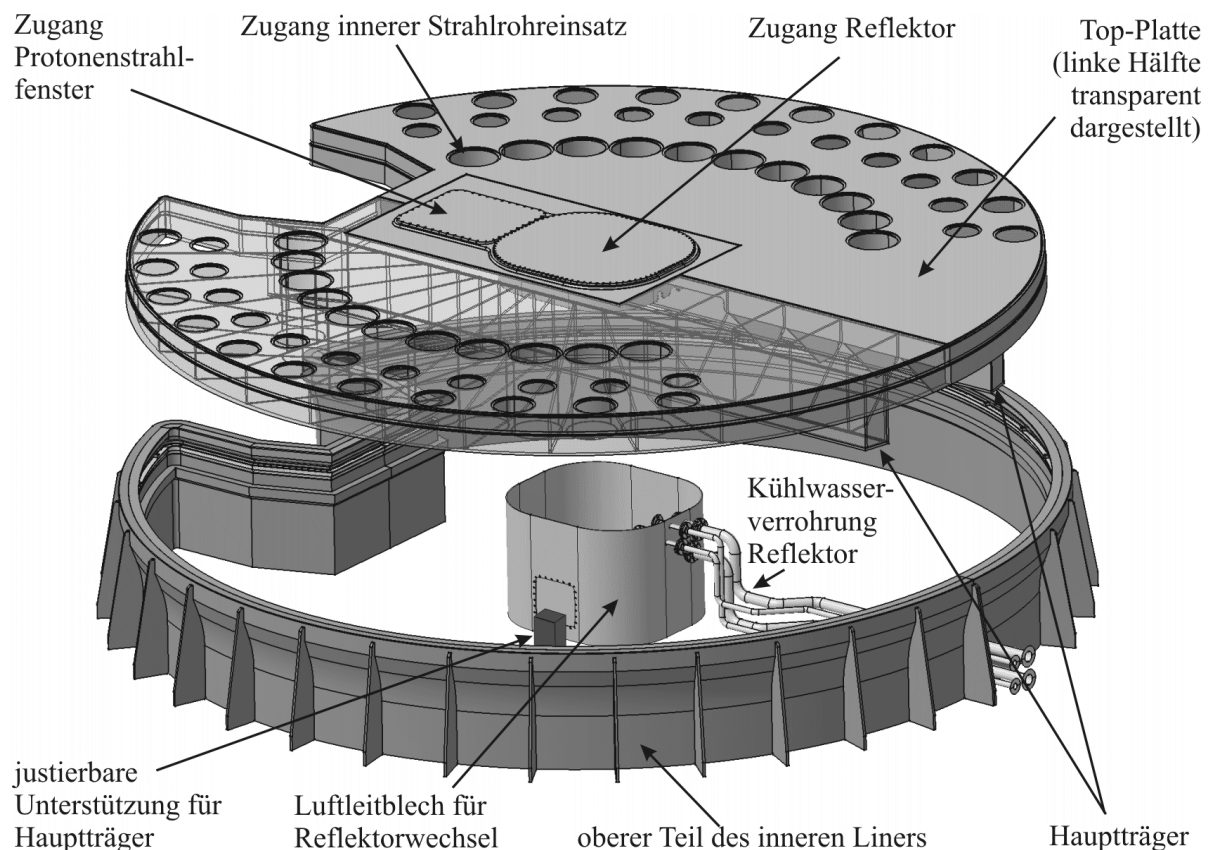


Abb. 5.2-8 Top-Platte

Die Abdichtung zwischen Top-Platte und innerem Liner hingegen hat einen Durchmesser von ca. 10 m und eine Dichtlinienlänge bis zu 40 m. Hier wird eine einheitliche Bearbeitung weder der Dichtfläche der Top-Platte noch der Gegenfläche am inneren Liner mit vertretbarem Aufwand möglich sein. Um dem Rechnung zu tragen, wird die Top-Platte mit einer variablen Steifigkeit mit zunehmender Elastizität zum Rand hin ausgeführt. Dies ermöglicht ein nahezu gleichmäßiges Aufliegen der Top-Platte am Rand bei gleichzeitig niedriger Gesamtdurchbiegung der Platte. Als Dichtsystem wird eine doppelte aufblasbare Elastomerdichtung verwendet, die so angeordnet wurde, dass beide Dichtungen von oben zugänglich und damit ohne Ausbau der Top-Platte wechselbar sind (Abb. 5.2-9). Da bei dieser Art der Dichtung kein axialer Anpressdruck gefordert ist, wird die Befestigung der Topplatte im Liner durch Einsetzen von Excentersteinen in einer Nut zwischen den Dichtungen gewährleistet.

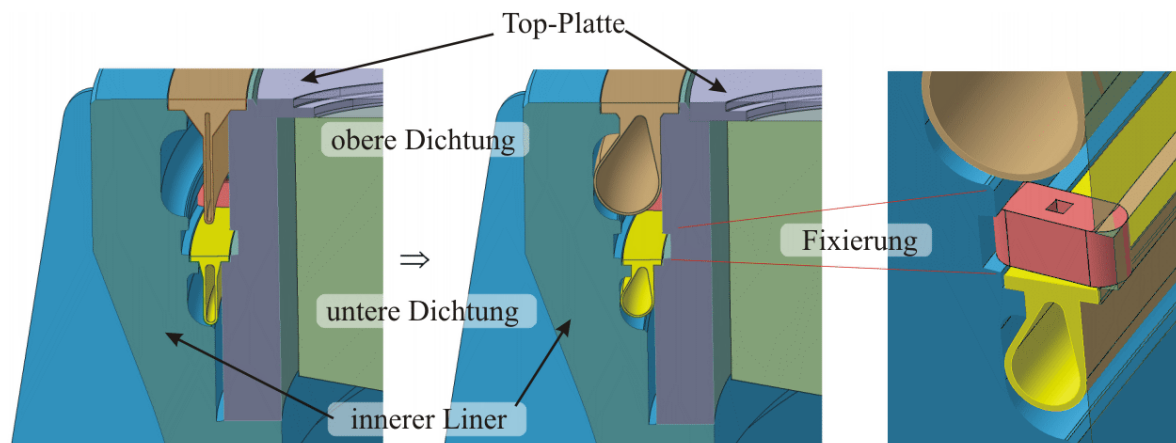


Abb. 5.2-9 Dichtungs- und Verriegelungssystem zwischen Top-Platte und innerem Liner

5.2.6. Strahlrohrdurchführung

Die Strahlrohrdurchführungen (Abb. 5.2-10) gestatten die Auskopplung der Neutronenstrahlen aus dem Bereich des inneren Liners in die Instrumentenhalle. Hier wird gemäß Einschlusskonzept (Kap. 5.2.1) ein zweifacher Einschluss gefordert. Dieser wird durch zwei räumlich getrennt angeordnete, für Neutronen möglichst durchsichtige Fenster aus dünnen Aluminiumfolien gewährleistet. Daneben enthält dieser Bereich auch die äußeren Teile der innerhalb des Abschirmblockes befindlichen neutronenoptischen Elemente. Speziell bei diesen wird neben dem dichten Einschluss auch eine genaue mechanische Justagemöglichkeit gefordert. Auf die Justage- und Positionsgenauigkeit der neutronenoptischen Einschübe wird in Kap. 5.4.2 weiter eingegangen.

Das innere Neutronenstrahlfenster ist fester Bestandteil eines Strahlrohreinsatzes, welcher in das fest mit innerem und äußerem Liner verschweißte Hüllrohr eingeführt und außen am Flansch des Hüllrohres gedichtet wird. Diese Strahlrohreinsätze können mit Abschirmmaterial sowie wahlweise Strahlkollimatoren oder Neutronenleitern bestückt werden. Den Abschluss zur Instrumentenhalle und damit den zweiten geforderten Einschluss bildet ein Endflansch, welcher gleichzeitig das äußere Neutronenstrahlfenster enthält. Zum Wechsel der Einbauten ist ein Entfernen des inneren Neutronenstrahlfensters und damit ein Verbinden der inneren Liner-Atmosphäre mit der Instrumentenhalle nicht notwendig. Der Raum zwischen den beiden Neutronenstrahlfenstern stellt damit den zu überwachenden Zwischenraum dar und wird zur Leckdetektion unter Grobvakuum betrieben. Durch die unterschiedlichen Gase der benachbarten Atmosphären (Helium und Luft) ist neben der Diagnose des Dichtungsversagens auch eine Aussage, welche der beiden Dichtungen schadhaft ist, gegeben. Der Vorteil dieser Anordnung gegenüber üblichen Konzepten, wie z.B. ISIS und SNS ist:

- Leichte Zugänglichkeit der Neutronenstrahlfenster im Reparaturfalle.
- Großer Abstand des innersten Neutronenstrahlfensters von der Quelle, und damit niedrige Strahlenschädigung des Fensters selbst.
- Innerhalb der Abschirmung des Targetblockes sind nur zwei einwandige Neutronenstrahlfenster pro Strahlrohr notwendig.

- Alle Dichtungen liegen außerhalb der Abschirmung des Targetblockes und damit im Bereich niedriger Strahlenschädigung. Sie sind zudem gut zugänglich und damit im Schadensfall einfach auszutauschen.

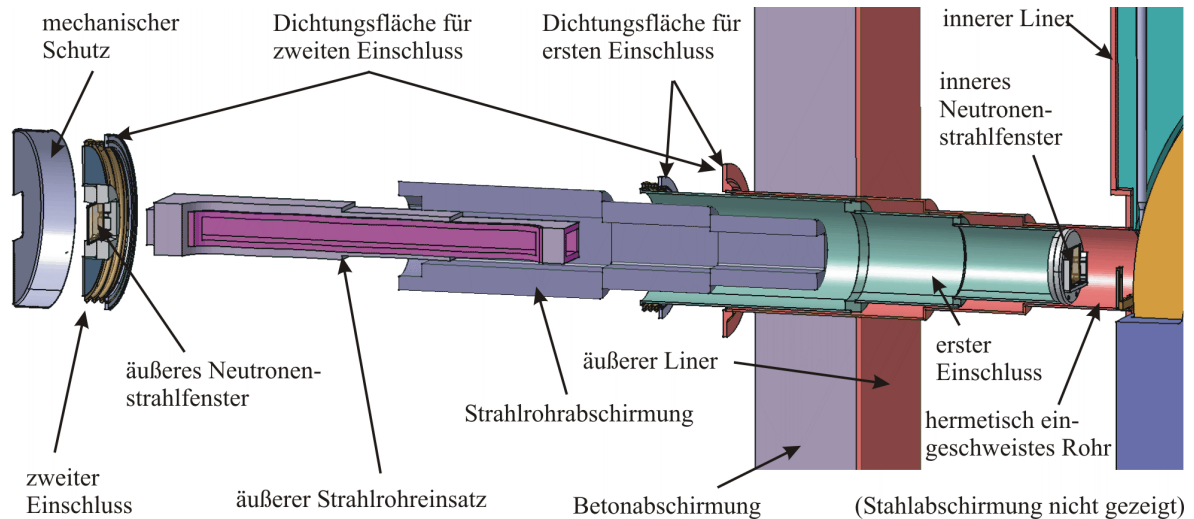


Abb. 5.2-10 Strahlrohrdurchführung

5.2.7. Protonenstrahlfenster

Aufgabe des Protonenstrahlfensters ist die atmosphärische Trennung von innerem Liner und Beschleunigervakuum bei gleichzeitig möglichst hoher Transparenz für den Protonenstrahl. Da jegliches im Strahl befindliche Material sowohl diesen streut, als auch nicht unerheblich aufgeheizt und geschädigt wird, wäre ein optimales Fenster masselos bei gleichzeitig vollkommener Dichtigkeit gegenüber dem Differenzdruck von etwa einem bar zwischen Lineratmosphäre und Beschleunigervakuum. Für sehr kleine Strahldurchmesser im Bereich von einigen Millimetern wird schon erfolgreich mit einem Fenster, bestehend aus einem brennenden Plasma, experimentiert. Trotz extrem niedriger Dichte ist mittels Plasma eine Atmosphärentrennung möglich. Eine Strahlenschädigung, wie bei Feststoffen, existiert bei einem solchen Fenster prinzipbedingt nicht. Für geforderte Strahlquerschnitte und somit Fensteröffnungen von bis zu 200 mm x 60 mm, wie sie für die hier betrachtete Spallationsquelle in Betracht kommen, ist dieses Verfahren aber zur Zeit noch nicht einsetzbar. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein konventionelles wassergekühltes Fenster für die hier vorliegenden Einsatzbedingungen entwickelt. Bei der Konstruktion des Fensters sind dabei im Wesentlichen vier Hauptanforderung zu beachten:

1. **Kühlung:** Im Fenstermaterial wird abhängig von Strahlstromdichte und gewähltem Material eine volumenbezogene Wärmeleistung deponiert. Ziel muss daher die Verwendung eines leichten Materials mit einer geringen Wanddicke sein.
2. **Mechanische Festigkeit:** Neben der Druckdifferenz von 1 bar zwischen Lineratmosphäre und Beschleunigervakuum ist das Fenster hauptsächlich durch den Druck des Kühlmittels belastet. Aufgrund der niedrigen erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten bei einer Gaskühlung wird hier Wasser als Kühlmittel eingesetzt. Bedingt durch die Pumpenkonfiguration (Vermeidung von Kavitation) sowie die

Rohrleitungsanordnung muss mit einem Auslegungsdruck von 10 bar am Ort des Fensters gerechnet werden.

3. **Strahlenschädigung:** Die Empfindlichkeit des verwendeten Materials gegen Strahlenschädigung bestimmt entscheidend die notwendige Wechselfrequenz des Strahlfensters. Aufgrund der in Targetnähe verwendeten Strahloptiken (Abb. 5.2-11) ist die Strahlstromdichte und damit neben der Wärmedeposition auch die Strahlenschädigung am Strahlfenster höher als am Target selbst. Eine grobe Skalierung bekannter Fensterlebensdauern führt zu erwarteten Standzeiten von bis zu 3 bis 6 Monaten für Inconel 718 sowie mehr als 2 Jahre für Aluminium.
4. **Streuung des Strahls:** Aus konstruktiven Gründen beträgt der Mindestabstand zwischen Fenster und Target ca. 1,2 Meter. Daher kommt der Streuung am Fenster und damit der Divergenz des Strahles eine besondere Bedeutung zu. Um diese zu minimieren, sollte die in Strahlrichtung projizierte Dicke des Fensters so klein wie möglich gehalten sowie ein Fenstermaterial niedriger Dichte verwendet werden. Zusätzlich wirkt das Fenster als Target und produziert Neutronen. Dies erhöht die Abschirm- sowie Kühlanforderungen in der näheren Fensterumgebung. Des weiteren erhöht sich mit der Fensterdicke und Materialdichte auch die Aktivierung des Fensters und der näheren Umgebung, was negative Auswirkungen auf die Handhabung dieses Bauteiles hat.

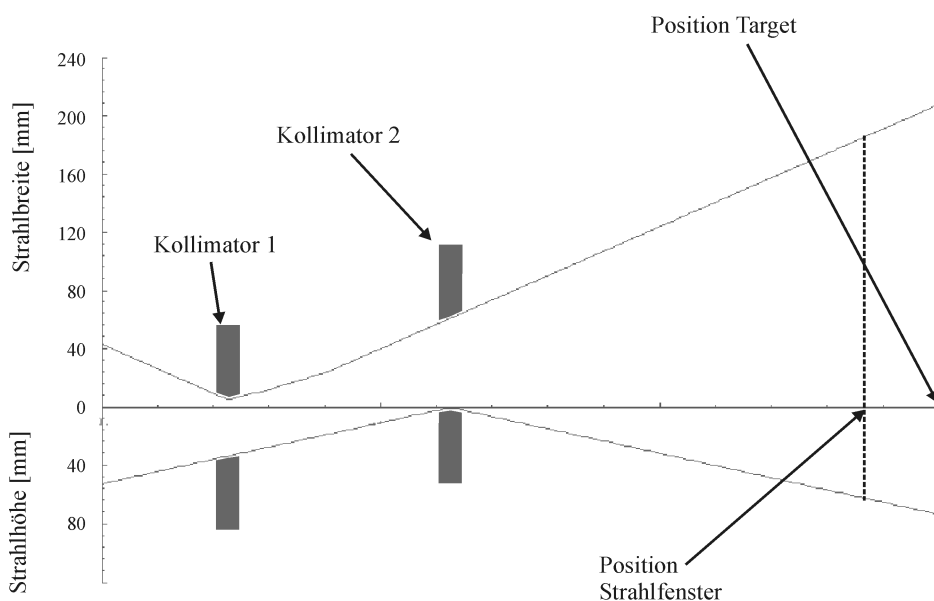


Abb. 5.2-11: Strahlprofil des Protonenstrahles vor dem Target

Da sich die Strahlprofilverteilung längs zur Strahlachse zur Zeit noch in der Optimierungsphase befindet und bei der Langpuls- und Kurzpulsstation unterschiedlich sein wird, lässt sich noch keine genaue Aussage zur endgültigen Strahlstromdichtenverteilung am Ort des Strahlfensters machen. Als Auslegungsbasis wird daher konservativ eine Gaussverteilung der Strahlstromdichte mit einem maximalen Wert von $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in Fenstermitte (Vergleich: $80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ am Target) und eine notwendige Fensteröffnung von $200 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ angenommen. Obwohl die spezifische Energiedeposition im Fenstermaterial aufgrund von Aufbaueffekten mit der Dicke des Fensters leicht zunimmt, werden für die Auslegung konservativ die für dickwandige Fenster (2-3 mm) ermittelten Werte herangezogen /GAL 03/. Die durch

die Strahlstromdichte von $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ hervorgerufene Energiedeposition im Fenstermaterial beträgt demnach ca. $2,7 \text{ W}/\text{mm}^3$ für Inconel 718 und $1,0 \text{ W}/\text{mm}^3$ für Aluminium.

Zur Abschätzung der zu erwartenden Temperaturen wird die Temperaturdifferenz in der Fensterwand vereinfacht nach Formel [6] (Wärmeleitung in einer ebenen Wand im Wärmequellenfeld /STE 71/) ermittelt und ist in erster Näherung proportional zur Energiedeposition und dem Quadrat der Wanddicke sowie umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Materials. Die Temperaturdifferenz zwischen Wandinnen- und Kühlmitteltemperatur ist proportional zum Wärmestrom sowie zur Dicke der zu kühlenden Wand. Wird die dem Kühlmittel abgewandte Wandseite als adiabat angesehen, lässt sich die Wandtemperatur vereinfacht gemäß Formel [7] /STE 71/ ermitteln. Je nach Art der Strömungsführung kann bei Wasser als Kühlmedium mit Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha = 10000$ bis $40000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ gerechnet werden.

$$\vartheta_{\text{Wand,außen}} - \vartheta_{\text{Wand,innen}} = \frac{qs^2}{2\lambda} \quad [6]$$

$$\vartheta_{\text{Wand,innen}} - \vartheta_{\text{Fluid}} = \frac{qs}{\alpha} \quad [7]$$

In Formel [6] und [7] sind q die volumenspezifische Energiedeposition [W/m^3], s die Wanddicke [m]; λ die Wärmeleitung [W/mK] und α der Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]. Abbildung 5.2-12 zeigt den Temperaturverlauf im Fluid und in der Wand sowie die nach Formel [6] und [7] zu erwartenden maximalen Wandtemperaturen für eine Strahlstromdichte von $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ und eine Fluidtemperatur von 40°C in Abhängigkeit von der Wanddicke für die Materialien Aluminium und Inconel 718.

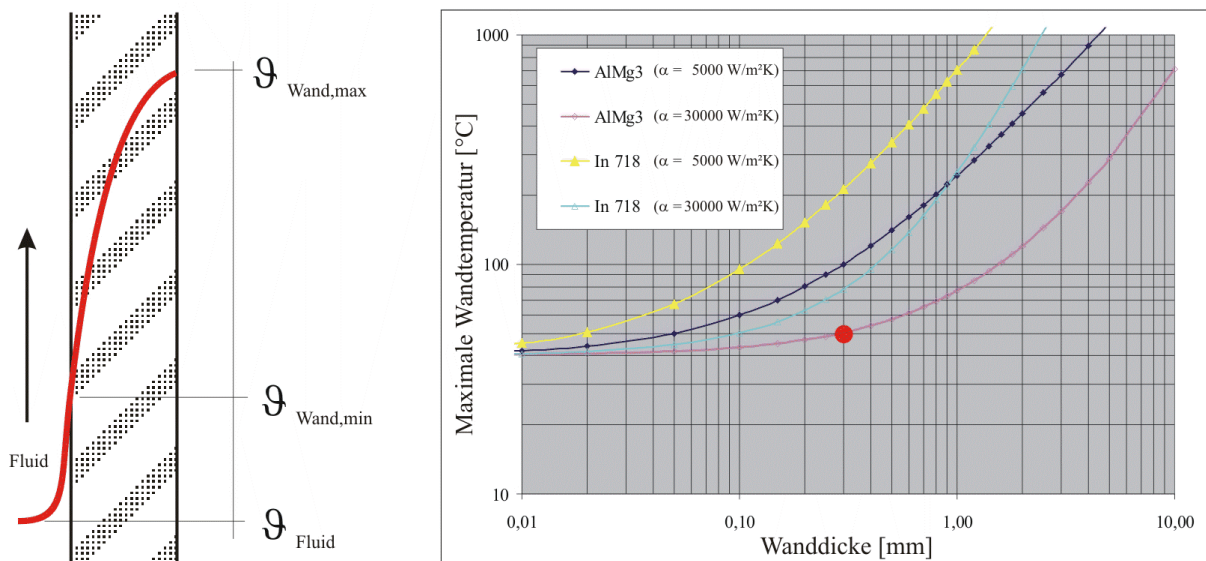


Abb. 5.2-12 Wandtemperaturen in Abhängigkeit von der Wandstärke für Aluminium und Inconel 718

Herkömmliche Fenster, wie sie bei Spallationsquellen niedriger Leistung wie zum Beispiel ISIS, SINQ oder SNS (max. $28 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) eingesetzt werden, bestehen aus einer doppelwandigen zylindrischen oder halbkugelförmigen (Abb. 5.2-13) Konstruktion aus Aluminium oder Inconel 718. Die notwendigen Wanddicken sind dabei nahezu ausschließlich durch den Kühlmitteldruck bedingt und liegen je nach verwendetem Werkstoff im Bereich von 2-3 Millimetern. Für die Wanddicke der auf Innendruck belasteten Schale ist dabei die Werkstofffestigkeit des verwendeten Fenstermaterials entscheidend, für die auf Außendruck belastete Schale dagegen das Beulverhalten und damit der Elastizitätsmodul. Eine weitere Minimierung der Wanddicke unter Beibehaltung dieses Konstruktionsprinzips ist daher bei vorgegebenem Kühlmitteldruck nicht möglich. Wie Abb. 5.2-12 zeigt, ist die Auslegung eines Strahlfensters mit einer Wanddicke von über 2 Millimeter für die geforderte Strahlstromdichte von $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ thermisch nur für Aluminium bei angenommenem hohen Wärmeübergangskoeffizient und damit optimierten Strömungsverhältnissen möglich. Fenster der oben genannten Bauart mit nur 2 mm Aluminiumwanddicke sind allerdings schon durch den Kühlwasserdruck statisch grenzwertig belastet. Statt vorhandene Strahlfenster auf einen Strahlstrom von $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ zu optimieren und damit ein sicherheitsrelevantes Bauteil grenzwertig auszulegen, wird hier eine grundsätzlich andere Bauform untersucht.

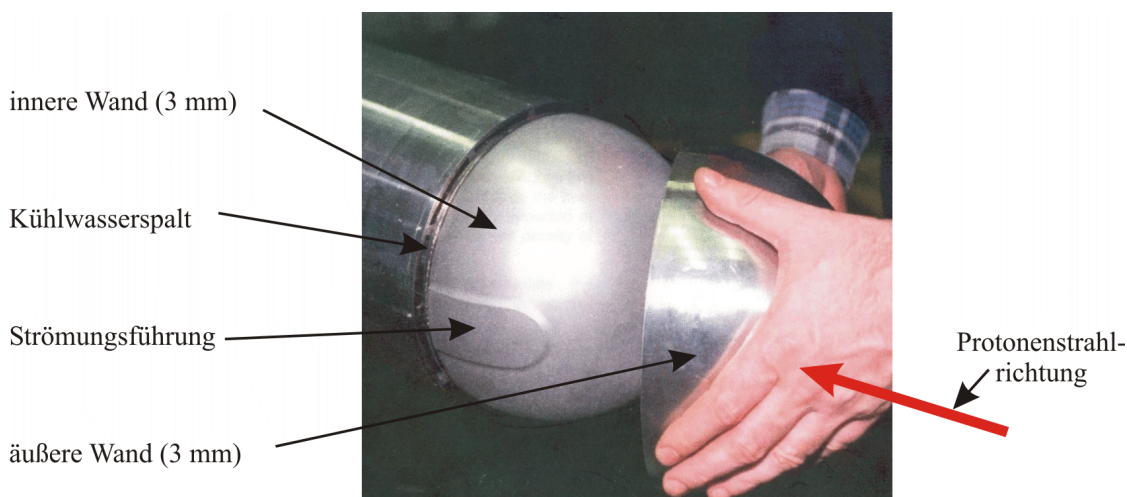


Abb. 5.2-13: Halbkugelförmiges Strahlfenster der Spallationsquelle SINQ (Aluminium)

Bedingt durch die Abmessungen des Strahlquerschnittes muss der Halbkugel- bzw. Zylinder-radius dieser konventionellen Konstruktionen größer als der halbe Strahldurchmesser sein und damit mindestens 30 mm im Falle einer Zylinderschale und 100 mm im Falle einer Halbkugelbauform betragen. Die Wandstärke eines durch Innendruck belasteten Zylinders skaliert bei gleichbleibendem Druck linear mit dem Radius. Das Ziel einer kleineren Wandstärke ist daher nur über einen signifikant kleineren Radius des Zylinders zu erreichen. Die hier vorgestellte Konstruktion nutzt diesen Umstand aus, indem ein makroskopisch ebenes Fenster aus einem Bündel von nebeneinander liegenden Rohren aus Aluminium mit einem Durchmesser von je 6 mm und einer Wanddicke von 0,3 mm aufgebaut wird (Abb. 5.2-14). Diese Rohre sind an den Mantelflächen miteinander und mit dem Rahmen dicht verbunden. Da für das Verhalten von Löt- und Schweißverbindungen im hoch strahlenbelasteten Bereich keine ausreichende experimentelle Datenbasis vorhanden ist, wird diese Struktur mittels CNC-Fräsen aus dem Vollen gearbeitet. /BUT 03d/

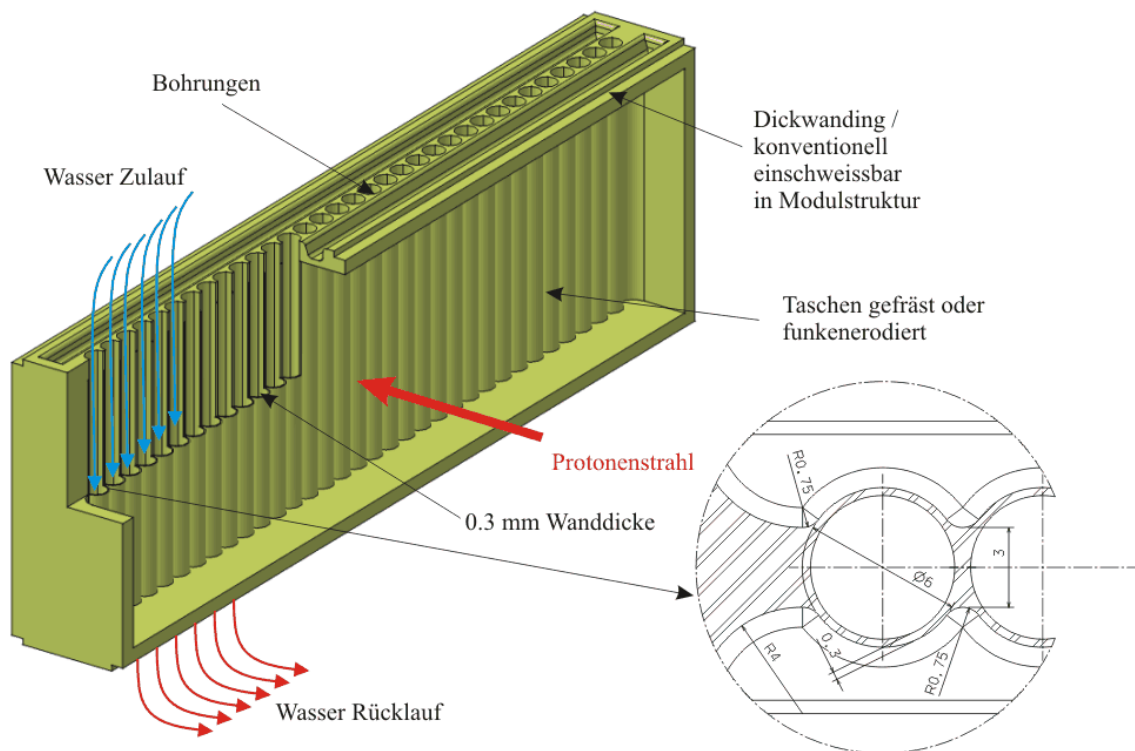


Abb. 5.2-14: Fenster als Rohrbündelanordnung (Panflötenfenster)

Der Kühlmitteldruck von ca. 1 MPa wird im Rohr nur durch Umfangszugspannungen abgetragen, welche mit 9 N/mm^2 extrem niedrig liegen. Die Rohre werden zusätzlich durch die Druckdifferenz von 0,1 MPa zwischen Lineratmosphäre und Beschleunigervakuum über eine Einspannlänge von 60 mm auf Biegung belastet, was zu einer Biegespannung von 37 N/mm^2 führt. Für die kühlwasserdurchströmten Rohre ergibt sich bei einer mittleren Geschwindigkeit von 5 m/s ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 30000 \text{ W/m}^2\text{K}$ und damit für $0,3 \text{ mm}$ Wandstärke eine maximale Wandtemperatur von ca. 10 K oberhalb der Kühlwassertemperatur (40°C). Aufgrund der etwa eine Größenordnung geringeren Wandstärke gegenüber der konventionellen doppelwandigen Konstruktion werden die thermisch induzierten Spannungen vernachlässigbar klein. Abbildung 5.2-15 zeigt die ersten mittels Finite-Element-Methode berechneten Ergebnisse für das hier vorgestellte Fenster.

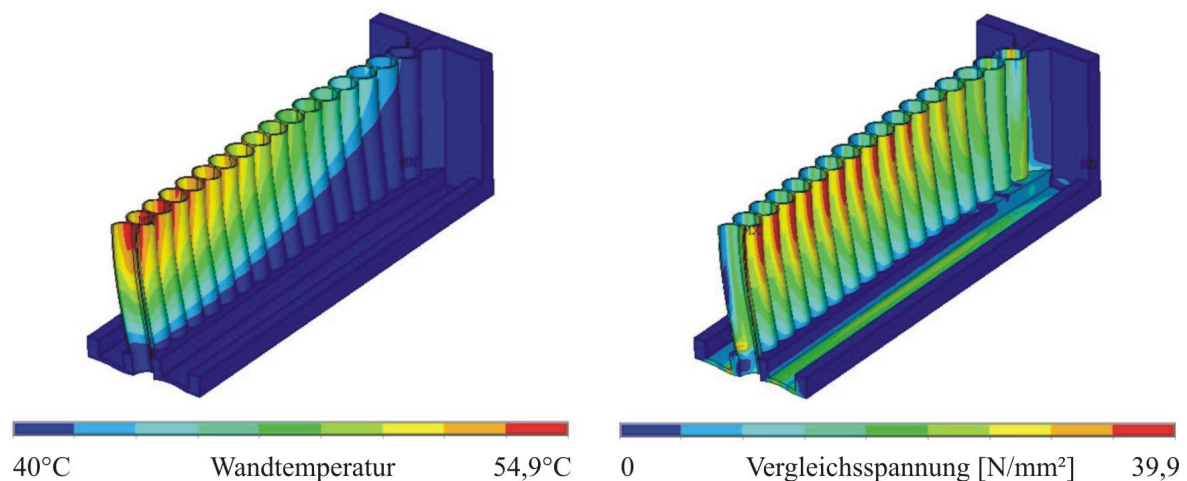


Abb. 5.2-15: Temperatur und Spannungen im Fenster bei 10 bar Kühlwasserdruck, 1bar Differenzdruck und $150 \mu\text{A/cm}^2$ maximaler Strahlstromdichte

Aufgrund des hohen zulässigen Kühlmitteldruckes dieser Bauweise ist bei einer weiteren Optimierung dieses Konstruktionsprinzips auch eine Hochdruck-Heliumkühlung mit Drücken im Bereich von 40 bis 60 bar und damit die Vermeidung von Kühlwasser im direkten Strahlbereich denkbar. Hierdurch könnte die sicherheitsrelevante Tritiumproduktion der Gesamtanlage signifikant reduziert werden. Die effektive Fensterdicke, d.h. die Dicke des Materials in Strahlrichtung ist bei dieser Art von Fenster nicht konstant, sondern nimmt an den tangential zum Strahl liegenden Rohrstücken stark zu. Die projizierte Fensterdicke in Strahlrichtung liegt mit maximal 3 mm etwa 50 % unter der eines konventionellen doppelwandigen Fensters.

Um die Handhabung des Protonenstrahlfensters zu erleichtern, ist dieses zusammen mit einer optischen Strahldiagnose zur Vermessung der Ist-Position des Strahles zu einem Modul zusammengefasst. Eine weiterführende Beschreibung dieses Moduls sowie des Handhabungsvorganges ist in Kap. 5.5.5 zu finden.

5.2.8. Dichtung Targetwagen-Liner

Die Dichtstelle zwischen Targetwagen und innerem Liner liegt nur ca. 2,5 m vom Spallationszentrum entfernt und stellt somit die einzig notwendige strahlenharte Dichtung des Linersystems dar. Aufgrund der Einbausituation auf dem Targetwagen muss sie zudem im Reparaturfalle fernbedient wechselbar sein. Hier kommt eine doppelte aufblasbare Metalledichtung mit Zwischenraumüberwachung (Abb. 5.2-16) zum Einsatz, welche auf einem Tragrahmen montiert ist. Der Tragrahmen wird mittels auf dem Targetwagen befindlichen Bolzen schwimmend gelagert und kann bei zurückgefahrenem Targetwagen innerhalb der Heißen Zelle ohne weitere Werkzeuge vom Targetwagen abgezogen und durch eine neue Dichtung ersetzt werden. Aufgrund ihrer Konstruktion ist mit einer endlichen, bleibenden Leckrate dieser Dichtung zu rechnen. Die Zwischenraumüberwachung erfüllt daher neben der reinen Überwachungsfunktion auch die Funktion der Aufrechterhaltung eines Druckgefälles sowohl von der Heißen Zelle als auch vom inneren Liner hin zum Überwachungsspalt.

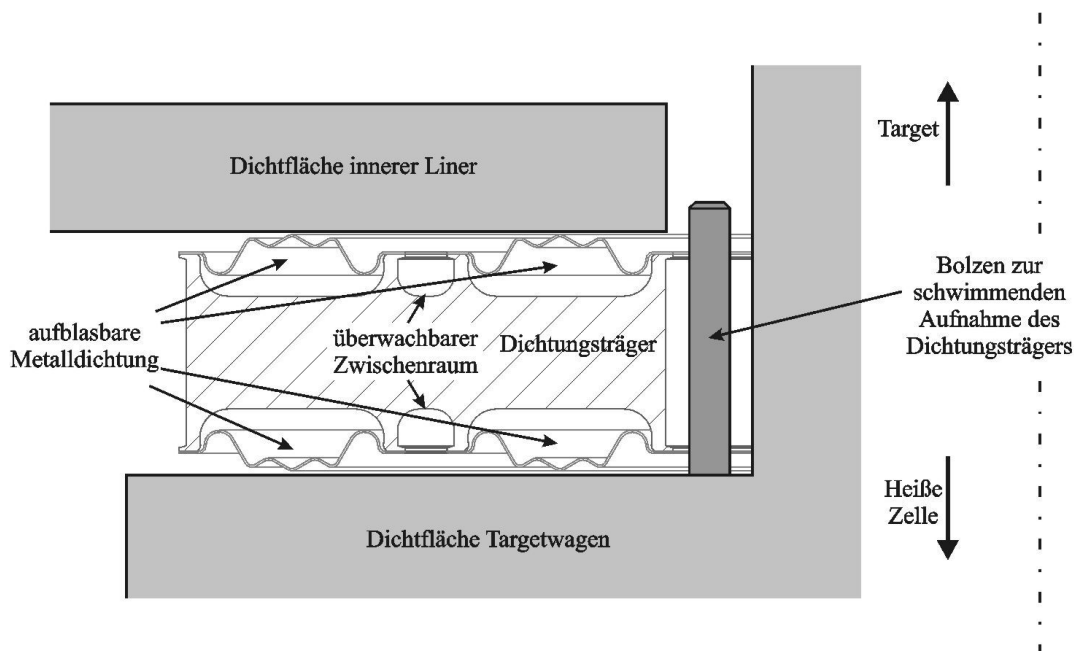


Abb. 5.2-16: Aufblasbare Metalledichtung zwischen innerem Liner und Targetwagen

5.3. Abschirmung

5.3.1. Rechnerische Auslegung

Ausgangspunkt der rechnerischen Auslegung der Abschirmung ist die Identifizierung und Definition der möglichen Strahlenquellen. Je nach Betriebsmodus der Anlage treten unterschiedliche Quellen mit unterschiedlichen Intensitäten und Charakteristiken auf. Je nach betrachteter Quelle, Betriebsmodus und direkter Umgebung unterscheiden sich auch die Anforderungen an die durch die Abschirmung zu erreichende Abschwächung. Tabellen 5.3-1 bis 5.3-4 geben eine Übersicht über die wichtigsten Quellen innerhalb der Targetumgebung und definieren die Anforderungen an die Abschirmung.

Tabelle 5.3-1: **Betriebsart: Strahlbetrieb**

Quelle	zu schützen	Ziel der Abschirmung
Target (gepulste Quelle; wird als quasi kontinuierlich angesehen)	Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Nutzer in der Instrumentenhalle	$\leq 0,5 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Neutronenstreuemessungen in der Instrumentenhalle	Reduktion des Untergrundes (keine Grenzwertangabe)
Strahlverluste in Protonenstrahlführung (Linienquelle) sowie Kollimator und Protonenstrahlfenster (Punktquelle)	Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Nutzer in der Instrumentenhalle	$\leq 0,5 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Neutronenstreuemessungen in der Instrumentenhalle	Reduktion des Untergrundes (keine Grenzwertangabe)
Quecksilber führende Leitungen (zusätzlich Aktivierung durch verzögerte Neutronen und energiereiche Gammas)	Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten (Servicegalerie)	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Komponenten auf dem Targetwagen und innerhalb der Heißen Zelle	abhängig von der Empfindlichkeit und Positionierung der Komponenten
Wasserführende Leitungen (zusätzlich Aktivierung durch verzögerte Neutronen und energiereiche Gammas)	Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten (Servicegalerie; Oberer Handhabungsbereich)	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Komponenten in Nähe der wasserführenden Leitungen und speziell der Abklingbehälter	abhängig von der Empfindlichkeit und Positionierung der Komponenten
Protonen-Strahlfänger in der Strahlführung (nur kurzfristiger Testbetrieb ; keine Messungen)	Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Nutzer in der Instrumentenhalle	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (Testbetrieb; auf kurze Zeiträume begrenzt)

Tabelle 5.3-2: **Betriebsart: Wartung (kurz nach Strahlabschaltung)**

Quelle	zu schützen	Ziel der Abschirmung
Target in Wartungsposition (Aktivierung der Targethülle)	Betriebspersonal (Handhabungsvorgang) in angrenzenden Räumlichkeiten	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Komponenten innerhalb der Heißen Zelle	abhängig von der Empfindlichkeit der Komponenten
Quecksilber in Ablasstank (Aktivierung)	Betriebspersonal (Handhabungsvorgang) in angrenzenden Räumlichkeiten	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	Komponenten der Heißen Zelle	abhängig von der Empfindlichkeit der Komponenten
Handhabung aktivierter Komponenten	An der Handhabung beteiligtes Betriebspersonal (generell)	$\leq 3,0 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)
	An der Handhabung beteiligtes Betriebs- personal (für kurzfristige Vorgänge)	$\leq 3 \text{ mSv/h}$ (StrlSchV) (besser $100 \mu\text{Sv/h}$)
	Während der Handhabung in der Instrumentenhalle befindliches Personal	$\leq 0,5 \mu\text{Sv/h}$ (Sonst temporäre Sperrung notwendig)
Sonstige aktivierte Komponenten oder Fluide	Betriebspersonal: Berücksichtigung sonstiger aktivierter Komponenten oder Fluide in der Nähe der zu handhabenden Komponenten	Individuelle lokale Abschirmung und Abwarten einer ausreichenden Abklingzeit, so dass Dosisleistung $\leq 3 \text{ mSv/h}$

Tabelle 5.3-3: **Betriebsart: Reparatur (längere Zeit nach Strahlabschaltung)**

Quelle (Grund)	zu schützen	Ziel der Abschirmung
Quecksilber-Ablasstank	Betriebspersonal: Begehen der Heißen Zelle im Ausnahmefall (z.B. manuelle Reparatur von Handhabungseinrichtungen)	$\leq 3 \text{ mSv/h}$ (besser $\leq 100 \mu\text{Sv/h}$) (Zugang zeitlich limitiert)
Strahlverschlusselement (Wechsel der Lagerung)	siehe: Handhabung aktivierter Komponenten unter Punkt Wartung	$3,0 \mu\text{Sv/h}$; 3 mSv/h bzw. $0,5 \mu\text{Sv/h}$ (StrlSchV)

Tabelle 5.3-4: **Betriebsart: Anormaler Betriebszustand**

Quelle (Grund)	zu schützen	Ziel der Abschirmung
Protonenstrahlführung (vollständiger Strahlverlust)	Betriebspersonal in angrenzenden Räumlichkeiten (Obere Hand- habungszelle)	$\leq 1 \text{ mSv/a}$
	Nutzer in der Instrumentenhalle	$\leq 0,05 \text{ mSv/a}$ (jeweils bei 100 ms Strahlverlust pro Jahr)

Für den Fall des Strahlbetriebes wird hierbei von einer Aufenthaltsdauer für Personen von 2000 h pro Jahr innerhalb der Targetstation, bzw. außerhalb der Targetstation, aber innerhalb der Einzäunung der Anlage ausgegangen. Die direkt durch den Protonenstrahl induzierten Quellen wie Target, Kollimatoren, Protonenstrahlfester und Strahlführung werden ohne Berücksichtigung der Pulsstruktur des Protonenstrahles als zeitlich gemittelte, kontinuierliche Quellen angesehen. Als betriebliche Strahlenverluste für diese Komponenten werden konservativ 100 % der Strahlleistung für das Target, je 1 % der Strahlleistung für die beiden Kollimatoren und das Protonenstrahlfenster und 1 W/m für den Rest der Protonenstrahlführung angenommen.

Beim Betrieb der Targetstation wird es sich nicht vermeiden lassen, neben den Räumlichkeiten für das Betriebspersonal auch die Instrumentenhalle als Kontrollbereich im Sinne der Strahlenschutzverordnung auszuweisen. Betriebserfahrungen anderer Neutronenquellen zeigen, dass für die Abschirmungen der Neutronenleiter, Strahlchopper und Instrumente lokale, mobile Abschirmblöcke eingesetzt werden, wobei sich Stellen höherer Dosisleistungen ("hot spots") nicht vermeiden lassen. Trotzdem wird in der Festlegung der zulässigen globalen Dosisleistung für die Instrumentenhalle mit 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ ein Wert angestrebt, bei dem sich formal die Einrichtung eines Kontrollbereiches vermeiden lassen würde. Damit ist zugleich sichergestellt, dass dieser Wert, soweit er durch die o.g. Quellen bedingt ist, auch außerhalb des Gebäudes nicht überschritten wird.

Speziell bei der Betrachtung der anormalen, extrem seltenen Betriebszustände ist die Definition der anzunehmenden Quellen und der durch diese hervorgerufenen zulässigen Dosisleistung nicht immer direkt aus der Strahlenschutzverordnung zu entnehmen. Hier müssen sinnvolle Annahmen getroffen werden, die zur Erlangung einer Betriebsgenehmigung noch mit der genehmigenden Behörde abgestimmt werden. Bei der Abschirmung der Protonenstrahlführung gegen spontanen Strahlverlust wurde, in Anlehnung an die Vorgaben für den Hochenergieteil des Beschleunigers, ein Verlust von 5 aufeinander folgenden Pulsen der Langpulsstation bei voller Strahlleistung angenommen. Nach dieser Zeit (100 ms) ist aus heutiger Sicht sowie aus Betriebserfahrungen anderer Beschleunigeranlagen eine Detektion und Strahlabschaltung mit Sicherheit möglich. Die Frequenz dieses Ereignisses ist hierbei mit 1 a^{-1} angenommen worden. Die aus diesem Strahlverlust resultierende zusätzliche Dosis soll 5% der zulässigen Jahresdosis für Personen in den jeweiligen benachbarten Räumlichkeiten nicht überschreiten. Betriebserfahrungen bei der Spallationsquelle ISIS (160 kW Strahlleistung) weisen den Verlust von lediglich einem Volleistungspuls innerhalb von 15 Betriebsjahren aus. Die hier getroffene Annahme kann daher als ausreichend konservativ angesehen werden.

Sowohl für die endgültige Detailauslegung der Abschirmung als auch für die Erlangung einer Betriebsgenehmigung ist der rechnerische Nachweis der Abschirmung aller o.g. Quellen notwendig. Der Abschirmung des Targets und der Protonenstrahlführung kommt jedoch bei der Auslegung der Targetstation aufgrund der großen benötigten Abschirmmassen die größte Bedeutung zu. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher lediglich auf die rechnerische Auslegung der Targetabschirmung eingegangen. Für andere Bereiche wird es für die Konzeptionsphase als ausreichend angesehen, zunächst die dabei gewonnenen Ergebnisse sinngemäß zu skalieren. Auch für die Ermittlung der notwendigen Abschirmdicken für die Handhabungsvorgänge liegen zur Zeit noch keine detaillierten Rechnungen vor. Hier wird aus Betriebserfahrungen anderer Quellen sowie ersten Berechnungen für die 1,4 MW-Quelle SNS sinngemäß skaliert.

Eine Berechnung der notwendigen Abschirmdicken für das Target ist sowohl mittels Monte-Carlo-Methode /KOP 02/ als auch mit dem semi-empirischen Programmsystem CASL /SCH 96/ durchgeführt worden. Grundsätzlich ergibt sich aufgrund des gerichtet eintreffenden Protonenstrahls eine ausgeprägte anisotrope Verteilung der schnellen Neutronen. Während in Vorwärtsrichtung Neutronen mit Energien bis zu 1,3 GeV entstehen, wird das Spektrum mit zunehmendem Winkel zum Protonenstrahl weicher (Abb. 5.3-1).

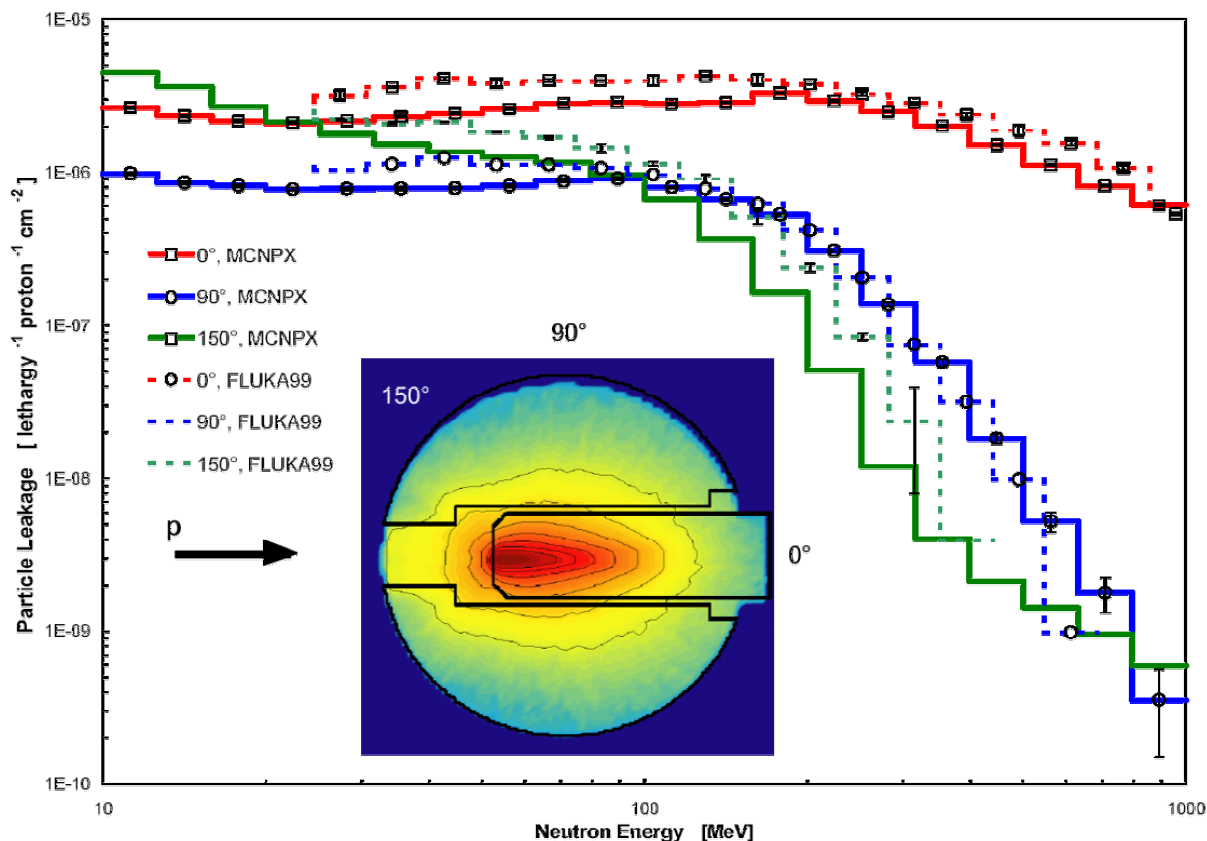


Abb. 5.3-1 Neutronenspektrum in Abhängigkeit vom Winkel zur Protonenstrahlachse /KOP 02/

Aus Kostengründen wurde für die Abschirmung der schnellen Neutronen ein Fe-basierter Werkstoff gewählt. Thermalisierung und Einfang der aus diesem Teil der Abschirmung austretenden Restneutronen niedriger Energie wird durch eine ca. 0,5 m dicke Schicht aus Beton realisiert. Die notwendigen Abschirmdicken zur Erzielung der vorgegebenen Dosisleistung auf der Oberfläche des Abschirmblockes variieren daher von einem Maximum in Protonenstrahlrichtung bis zu einem Minimum in rückwärtiger Richtung. Um die Geometrien sowohl für die Berechnung als auch für die technische Umsetzung einfach zu halten, wurde diese Asymmetrie durch Verschiebung des Targets (Spallationsmittelpunkt) in Richtung des eintreffenden Protonenstrahls bei zylinderförmiger Außengeometrie der Abschirmung erreicht. Tabelle 5.3-5 zeigt die resultierende Dosisverteilung auf der Oberfläche des Targetabschirmblockes für verschiedene Berechnungen in Abhängigkeit von Abschirmdicke und Winkel zum Protonenstrahl.

Tabelle 5.3-5 Vergleich verschiedener Abschirmrechnungen (HETC-ANISN, CASL, MCNPX) /KOP 00/

	MCNPX (deep penetr. calc.)		CASL (semiempirisch)		HETC-ANISN (Koppelmethode)	
Winkel zum Protonenstrahl	Dicke * (cm)	Dosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)	Dicke * (cm)	Dosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)	Dicke * (cm)	Dosisleistung ($\mu\text{Sv/h}$)
0°	475/50	0,8	520/40	1 – 10	520/40	< 7,5
90°	423/50	2,0	460/30	1 – 10	460/30	< 7,5
180°	375/50	2,0	390/30	10 - 100	390/30	< 7,5

* Dicke in cm; Angaben für Stahl /Beton

In allen vorliegenden Rechnungen wurde der Abschirmblock als homogen und spaltfrei angenommen. Da insbesondere der Fe-basierte Teil der Abschirmung aber aus Einzelblöcken aufgebaut werden muss, werden trotz Spaltversatz und/oder -verfüllung die zu erwartenden Dosisleistungen außerhalb der Abschirmung höher sein als in den Berechnungen angegeben. Aus diesem Grund wurden bei der Festlegung der endgültigen Abschirmgeometrie für den Targetabschirmblock größere Abschirmdicken vorgesehen als dies die Rechnungen nahe legen würden. Dies ist insofern vertretbar, da wie im folgenden Kapitel gezeigt wird, ein Verfahren zur kostengünstigen Herstellung bzw. Beschaffung, speziell der äußeren Fe-basierten Abschirmblöcke, gefunden wurde. Da aufgrund der weitgehenden Verwendung von hoch-effektiven Neutronenleitern auch die Forderung nach einer möglichst kompakten Bauweise der Quellenabschirmung etwas gelockert werden kann, sollten hier gemäß „ALARA“ - Grundsatz die zulässigen Dosisleistungen nach Möglichkeit nicht ausgeschöpft werden. Zudem bietet sich nur dadurch die Möglichkeit, eventuelle Leistungserhöhungen der Anlage innerhalb der angepeilten 40-jährigen Betriebszeit durchführen zu können. Abbildung 5.3-2 zeigt die gewählten Hauptabmaße des Abschirmblockes.

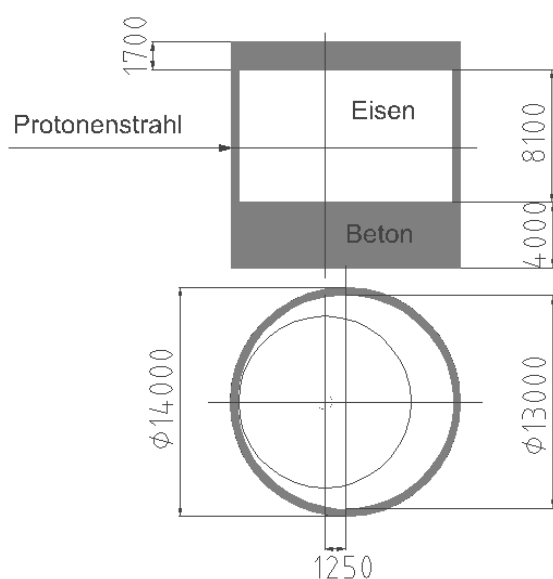


Abb. 5.3-2: Hauptabmaße des Abschirmblockes /ES3 02/

In Tabelle 5.3-6 sind die gewählten Abschirmdicken mit der Abschirmung geplanter oder im Bau befindlicher Quellen verglichen worden. Dieser Vergleich zeigt auch die unterschiedliche Philosophie der Verteilung der Verhältnisse von Fe-basierter Abschirmung zu Beton, die im Wesentlichen Ausdruck eines unterschiedlichen Optimierungszieles zur Entwicklung einer möglichst kostengünstigen technischen Umsetzung darstellt. An dieser Stelle sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass zur Erlangung einer Bau- und Betriebsgenehmigung für eine solche Anlage weitere detaillierte Berechnungen notwendig sind. Da dies jedoch nur auf Basis der ingenieurtechnischen Detailauslegung möglich ist, stellen die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse einen wichtigen ersten Schritt für den noch notwendigen iterativen Auslegungsprozess dar.

Tabelle 5.3-6: Vergleich der gewählten Abschirmdicken mit geplanten oder im Bau befindlichen Spallationsquellen

Anlage	Protonen- energie	Strahl- leistung	Abschirmdicken (bezogen auf die Richtung des Protonenstrahls)		
			0°	90°	180°
ESS	1,34 GeV/ 3,75 mA	5,0 MW	7,75 m Stahl +0,5 m Beton	6,38 m Stahl +0,5 m Beton	5,25 m Stahl +0,5 m Beton
SNQ – KFA Jülich	1,1 GeV/ 5,0 mA	5,5 MW	5,5 m Stahl +1,0 m Beton	5,5 m Stahl +1,0 m Beton	5,5 m Stahl
SNS Oak Ridge	1,0 GeV/ 2,0 mA	2,0 MW	5,0 m Stahl +1,25 m Beton	5,0 m Stahl +1,25 m Beton	5,0 m Stahl +1,25 m Beton
J-PARC JAERI Japan	3,0 GeV/ 0,33 mA	0,9 MW	4,8 m Stahl +3,0 m Schwerbeton	4,8 m Stahl +2,0 m Schwerbeton	4,8 m Stahl +2,0 m Schwerbeton

Für die Auslegung der Abschirmung der Protonenstrahlführung werden vereinfacht vorhandene Berechnungsergebnisse skaliert. Da auch hier von einer dicken Abschirmung ausgegangen werden kann, können Aufbaueffekte weitgehend vernachlässigt und die Skalierung auf Basis der Abschwächungslängen (Formel [2] und [3] aus Kap 4.2) ermittelt werden. Als Ausgangsbasis für die Skalierung der Abschirmung gegen den betrieblichen Strahlverlust von 1 W/m werden Berechnungsergebnisse für den Hochenergieteil des Beschleunigers herangezogen. Da diese nur für eine Abschirmung mittels Beton bzw. Erdreich vorliegen, erfolgt die Umrechnung auf entsprechende Fe-Dicken unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Abschwächungslängen dieser Materialien. Sowohl für die betrieblichen Strahlverluste in den Kollimatoren und im Protonenstrahlfenster (PBW) als auch für den als Punktquelle angenommenen spontanen vollständigen Strahlverlust innerhalb der Strahlführung werden die MCNPX-Werte aus Tabelle 5.3-5 als Basis herangezogen. Die so ermittelten notwendigen Abschirmdicken für die einzelnen Quellen sind in Tabelle 5.3-7 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass bei Auslegung auf den betrieblichen Strahlverlust der Fall des spontanen Volleleistungsstrahlverlustes mit abgedeckt ist.

Tabelle 5.3-7: Notwendige Abschirmdicken der Protonenstrahlführung

	zum Betriebspersonal ($< 3,0 \mu\text{Sv/h}$)	zu den Nutzern (Instrumentenhalle $< 0,5 \mu\text{Sv/h}$)
betrieblicher Strahlverlust (1 W/m)	209 cm *	241 cm *
betr. Strahlverlust (Kollimator/Strahlf.)	333 cm *	365 cm *
spontaner Strahlverlust	152 cm *	200 cm *

* Dicken in cm Eisenäquivalent

5.3.2. Genereller Aufbau der Abschirmung

Die Grundform der Abschirmung des Targets besteht aus einem Zylinder aus Fe-basiertem Material (Dichte 7850 kg/m^3) mit einem Durchmesser von 13 m und einer Höhe von 8,1 m, wobei der Spallationsmittelpunkt (Target) um 1,25 m entgegen der Strahlrichtung versetzt ist. Dieser ist umgeben von einer 0,5 m dicken Betonschale (Dichte 2500 kg/m^3), die gleichzeitig in die Gebäudestatik integriert ist und Tragfunktion für den darüber angeordneten Oberen Handhabungsbereich übernimmt. Nach oben ist der Zylinder durch eine 1,7 m dicke Betonschicht abgedeckt. Das Fundament erfüllt mit 4 m Dicke sowohl statische als auch Abschirmfunktion. Damit ergibt sich für die Targetabschirmung ein Volumen von ca. 1075 m^3 Fe-basiertem Material entsprechend einer Masse von ca. 8500 t.

Langpuls- und Kurzpulsstation weisen unterschiedliche Längen der Protonenstrahlführung innerhalb des Gebäudes der Targetstation auf. Im Folgenden soll beispielhaft die Strahlführungsabschirmung für die Langpulsstation betrachtet werden. Gemäß den geforderten Abschirmdicken aus Tabelle 5.3-7 ergeben sich ca. 19000 t Fe-basiertes Abschirmmaterial. Während große Teile der Betonabschirmung Bestandteil der Gebäudestatik sind und im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden sollen, stellt sich angesichts der enormen Massen Fe-basiertem Materials die Frage nach einer möglichst kostengünstigen Beschaffung.

Um Probleme mit dem in Kap. 4 angesprochenen 25 keV-Fenster des Reineisens zu umgehen, ist die Verwendung von zumindest niedriglegiertem Stahl notwendig. Die höhere Festigkeit im Verhältnis zu Reineisen erlaubt darüber hinaus eine größere Flexibilität bei der konstruktiven Auslegung der Abschirmung. Als kostengünstige Alternativen zu qualitativ niederwertigen aber marktgängigen Stählen (ca. $0,50 \text{ €/kg}$) bieten sich sowohl die Verwendung von unspezifiziertem Stahl als auch die Wiederverwendung von leicht aktivierten Stählen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen an. Unspezifizierter Stahl entsteht während des laufenden Betriebes im Stahlwerk bei der Umstellung von einer auf eine andere Stahlsorte. In dieser Zeit entstehen nicht unerhebliche Mengen eines Stahles, dessen Zusammensetzung sich mit fortlaufendem Prozess kontinuierlich ändert. Da dieser Stahl keiner Norm entspricht, ist er nicht zu üblichen Konditionen marktgängig und muss entweder wieder eingeschmolzen oder zu niedrigen Preisen abgegeben werden. Lieferformen sind meist ungewalzte Brammen zu Preisen von 0,20 bis 0,30 €/kg. Eine weitere, teilweise aufwendige spanende Bearbeitung ist bei Verwendung dieser Brammen nicht zu umgehen.

Von der Fa. Siempelkamp Mitte der 80er Jahr entwickelt und zugelassen, bietet sich ein Verfahren zur teilweisen Wiederverwertung von aktiviertem Material an. Hierbei wird in einem ersten Schritt aktivierter Schrott eingeschmolzen und bezüglich metallurgischer Zusammensetzung und radioaktivem Inventar untersucht. Nach diesem Aufschmelzvorgang

verbleiben große Teile der radioaktiven Isotope in der Schlacke, so dass die Schmelze typischerweise lediglich Co-60, Fe-55 und Ni-63 als Restaktivität enthält. In einem zweiten Schritt werden selektierte Blöcke der ersten Schmelze mit frischem Eisenschrott vermischt, um sowohl die geforderten metallurgischen Eigenschaften als auch die radiologischen Grenzen für das herzustellende Produkt einstellen zu können. Je nach Anforderungen an das Endprodukt reicht hierbei die erzielbare Recyclingquote von 20 % für Abschirm- und Transportbehälter für radioaktive Abfälle, bis zu 50 % für einfache Abschirmplatten. Die Kostenersparnis ergibt sich bei diesem Verfahren aus der Differenz eingesparter Endlagerkosten und den Kosten für die Umschmelzbehandlung. Je nach Recyclingquote liegen die Kosten bei ca. 0,95 €/kg für 0 % (kein Recyclingmaterial), über 0,40 €/kg für 20 %, bis zu einer Rückvergütung von ca. 1 €/kg für 50 % Recyclingquote, die für die Abnahme des Stahles gezahlt werden.

Obwohl die verbleibende Restaktivität dieses Materials niedrig im Vergleich zur erwarteten Aktivierung während des späteren Betriebes ist, liegt sie deutlich oberhalb der Freigabegrenze. Daher sind sowohl während der Herstellung aber auch während des Transportes zur Baustelle sowie der Lagerung und Handhabung auf der Baustelle, besondere Anforderungen bezüglich des Strahlenschutzes einzuhalten. So wird sich die Einrichtung einer temporären und räumlich begrenzten Kontrollzone während der Aufbauphase auf der Baustelle nicht vermeiden lassen. Für Gefahrguttransporte gelten in Deutschland die Obergrenzen von 4 Bq/g für Co-60-Aktivität sowie eine maximal zulässige Dosisleistung an der Oberfläche der Transportverpackung von 5 µSv/h. Tabelle 5.3-8 stellt die spezifischen Vor- und Nachteile der verschiedenen Bezugsquellen gegenüber.

Tabelle 5.3-8: Vor- und Nachteile der Stahlarten zur Nutzung für die Abschirmung

	Stahl niedriger Qualität [1]	Unspezifizierter Stahl [2]	Recycling (20 % Quote) [3]	Recycling (50% Quote) [4]
Kosten Rohmaterial	hoch	niedrig	niedrig	Rückvergütung
Verfügbarkeit	gut	begrenzte Mengen	Geeigneter Schrott muss gesammelt werden (Vorlaufzeit nötig)	
mechanische Bearbeitbarkeit	gut	gut	schlecht	nicht mit vertretbarem Aufwand
Spezifikation der Inhaltsstoffe	begrenzt möglich	nicht möglich	begrenzt möglich	sehr begrenzt möglich
wirtschaftlichste Verarbeitung	mechanisch aus Blöcken	mechanisch aus Blöcken	Sandguss / Kokillenguss	Sandguss / Kokillenguss
Aufwand für komplexe Formgebung	aufwendig, spanend aus Halbzeug	sehr aufwendig, spanend aus Brammen	einfach, da Guss	einfach, da Guss

Alle hier vorgestellten Fe-basierten Werkstoffe sind aufgrund des zu niedrigen Chromäquivalentes nicht rostfrei und müssen, falls ein Korrosionsschutz gefordert wird, mit einer entsprechenden Oberflächenbehandlung versehen werden. Lacke und andere organische Beschichtungen lassen sich für die inneren Teile der Abschirmung aufgrund der hohen Dosisleistungen jedoch nicht einsetzen. Zudem ist bei den zu handhabenden Blöcken zu befürchten, dass diese Lackschichten bei den Handhabungsvorgängen beschädigt werden können und damit der Korrosionsschutz stellenweise nicht mehr gewährleistet ist. Hier bietet sich das Hochgeschwindigkeitsflammspritzverfahren HP/HVOF JP-5000 bzw. JP-8000 (High

Pressure / High Velocity Oxygen Fuel) der Fa. TAFA/Praxair Surface Technologies an, mit dem sich hochfeste Schichten niedriger Porosität aus rostfreiem Stahl 316L bis zu 15 mm Millimeter Schichtdicke kostengünstig auftragen lassen /TAF 93/. Der erreichbare Korrosionsschutz entspricht etwa dem des Grundmaterials 316L und liegt damit deutlich über dem anderer Flammsspritzverfahren /ARS 96/. Die Kosten dieses Verfahrens liegen bei ca. 50 €/kg aufgetragener Masse und damit bei ca. 400 € pro m² und mm Schichtdicke. Da mit diesem Verfahren auch dicke, bearbeitbare Schichten aufgetragen werden können, bietet sich hier die Möglichkeit, eigentlich nicht bearbeitbare Blöcke mit 50% Recyclingquote mit bewussten Minustoleranzen herzustellen und anschließend zu beschichten. Bei höheren Anforderungen an die Maßtoleranzen der Blöcke kann eine evtl. notwendige mechanische Bearbeitung in der aufgetragenen Schicht statt im aktivierten und schlecht zu bearbeitenden Grundmaterial erfolgen. Tabelle 5.3-9 stellt einen Vergleich der Herstellungskosten exemplarisch für einen quaderförmigen 10 t Block mit Kantenlängen von 1 m x 1 m x 1,3 m und einer Oberfläche von 7,2 m² dar. Die Kostenangaben in der Tabelle sind als Richtwerte zu verstehen und dienen lediglich dem Vergleich der verschiedenen Verfahren.

Tabelle 5.3-9: Herstellungskosten eines 10 t-Blockes unter Verwendung verschiedener Herstellungsverfahren

Niedrige Toleranzanforderung / kein Korrosionsschutz gefordert				
Herstellungsart*	Rohblock	Beschichtung	Bearbeitung	Summe
[1] 12 t spanend bearbeitet auf 10 t	6000 €	0 €	1500	7500 €
[2] 15 t spanend bearbeitet auf 10 t	3750 €	0 €	2500	6250 €
[3] in Endform gegossen	4000 €	0 €	0 €	4000 €
[4] in Endform gegossen	- 10000 €	0 €	0 €	- 10000 €
Niedrige Toleranzanforderung / Korrosionsschutz gefordert (0,5 mm Schichtdicke)				
Herstellungsart*	Rohblock	Beschichtung	Bearbeitung	Summe
[1] 12 t spanend bearbeitet auf 10 t	6000 €	1500 €	1500	9000 €
[2] 15 t spanend bearbeitet auf 10 t	3750 €	1500 €	2500	7750 €
[3] in Endform gegossen	4000 €	1500 €	0 €	5500 €
[4] in Endform gegossen	- 10000 €	1500 €	0 €	- 8560 €
Rostfreier Stahlguss (ca. 4 €/kg)	40000 €	0 €	0 €	40000 €
Hohe Toleranzanforderung / Korrosionsschutz gefordert (0,5 mm Schichtdicke)				
Herstellungsart*	Rohblock	Beschichtung	Bearbeitung	Summe
[1] 12 t spanend bearbeitet auf 10 t	6000 €	1500 €	2500	10000 €
[2] 15 t spanend bearbeitet auf 10 t	3750 €	1500 €	3500	8750 €
[3] Guss nachbearbeitet	4000 €	1500 €	2500	8000 €
[4] nach Beschicht. (10 mm) bearbeitet	- 10000 €	29000 €	1500	20500 €
Rostfreier Stahlguss (ca. 4 €/kg)	40000 €	0 €	1000	41000 €

* Nummer [X] entsprechend Tabelle 5.3-8

Tabellen 5.3-8 und 5.3-9 veranschaulichen, dass es keinen Werkstoff gibt der sich gleichermaßen für die gesamte Abschirmung eignet. Daher werden im Folgenden verschiedene Bereiche der Abschirmung definiert, die sich bezüglich der speziellen Anforderung an das zu

verwendende Material unterscheiden. Die Nummerierung der einzelnen Abschirmbereiche sind Abbildung 5.3-3 zu entnehmen.

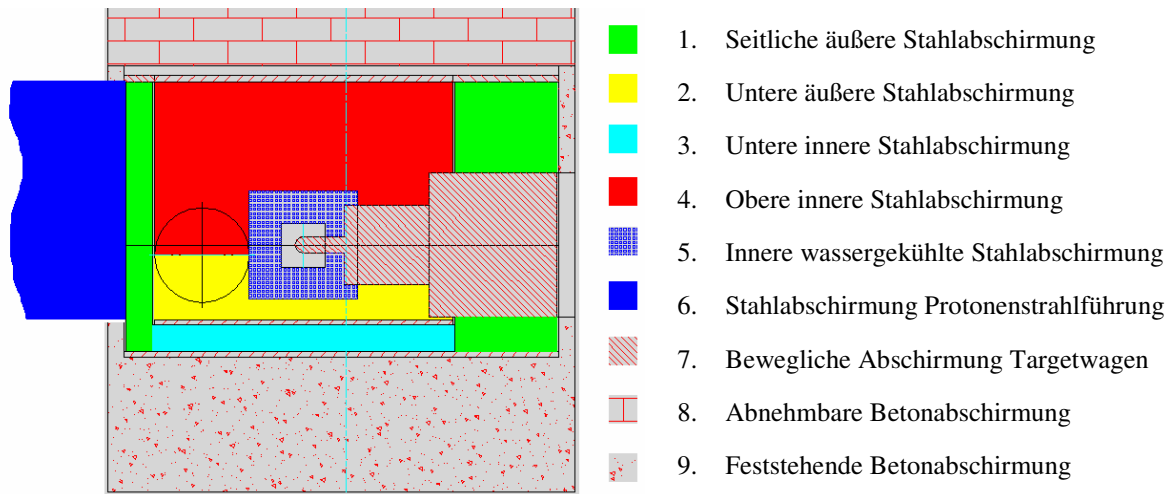


Abb. 5.3-3: Verschiedene Bereiche der Abschirmung

Die verschiedenen Bereiche der Stahlabschirmung sind dabei charakterisiert durch:

1. Seitliche äußere Stahlabschirmung (Masse ca. 2800 t):
 - außerhalb des inneren Liners, daher dauerhaft hermetisch eingeschlossen,
 - niedrige / keine Anforderungen an die Oberflächenqualität,
 - Maßtoleranzen unkritisch, daher bis auf unterste Lage keine mechanische Bearbeitung notwendig.

⇒ Recyclingmaterial mit 50 % Recyclingquote (20 % für die unterste Lage; Sandguss, da komplexe Geometrie und wenig Gleichblöcke möglich)
2. Untere äußere Stahlabschirmung (Masse ca. 900 t):
 - außerhalb des inneren Liners, daher dauerhaft hermetisch eingeschlossen,
 - niedrige / keine Anforderungen an die Oberflächenqualität,
 - Maßtoleranzen kritisch, da die Blöcke den Untergrund für die Basisplatte der inneren Abschirmung darstellen; mechanische Bearbeitung notwendig.

⇒ Recyclingmaterial mit 20 % Recyclingquote; Sandguss
3. Untere innere Stahlabschirmung (Masse ca. 1800 t):
 - innerhalb des inneren Liners; muss bei Handhabungsvorgängen nicht bewegt werden,
 - niedrige / keine Anforderungen an die Oberflächenqualität,
 - Maßtoleranzen kritisch, da die obere innere Abschirmung sowie die Strahlverschlüsse auf diesen Blöcken aufbauen; mechanische Bearbeitung notwendig,

⇒ Recyclingmaterial mit 20 % Recyclingquote; Sandguss

4. Obere innere Stahlabschirmung (Masse ca. 2700 t):
 - innerhalb des inneren Liners; muss teilweise bei Handhabungsvorgängen bewegt werden,
 - hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität (rostfrei, dekontaminierbar),
 - Maßtoleranzen nur teilweise wichtig.⇒ Recyclingmaterial mit 20 % Recyclingquote oder normaler Stahl, Sandguss; Aufbringen einer 316L-Oberfläche mittels Flamspritzen (HOVF JP-5000)
5. Innere wassergekühlte Stahlabschirmung ($r = 1,6$ m; Masse ca. 150 t):
 - innerhalb des inneren Liners; muss teilweise bei Handhabungsvorgängen bewegt werden,
 - hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität; innere Oberflächen der Kühlkanäle müssen rostfrei sein,
 - Maßtoleranzen wichtig.⇒ Rostfreier Stahl; Sandguss
6. Abschirmung der Protonenstrahlführung (ca. 16500 t feststehend / 2500 t beweglich):
 - weitgehend niedrige Strahlenbelastung (Ausnahme: Abschirmung der Kollimatoren und des Strahlfängers,
 - Oberflächenschutz größtenteils mittels Lackierung möglich,
 - Maßtoleranzen unkritisch.⇒ Recyclingmaterial mit 50 % Recyclingquote (Kokillenguss; möglichst wenige unterschiedliche Blockgeometrien)

Die gesamte Stahlabschirmung wird aus einzelnen Blöcken aufgebaut, die entsprechend vorgefertigt auf der Baustelle zusammengesetzt werden. Um den Transportaufwand dieser Blöcke in vertretbaren Grenzen zu halten, sollten diese ein Stückgewicht von ca. 50 t nicht überschreiten. Ein mittleres Stückgewicht von etwa 30 t angenommen, besteht die Targetabschirmung insgesamt aus etwa 300 Einzelblöcken. Die zwangsläufig zwischen den einzelnen Blöcken entstehenden Spalte sind konstruktiv so versetzt, dass eine ausreichende Überdeckung der direkten Linie zwischen Quelle und zu schützendem Objekt gegeben ist. Während eine rechnerische Betrachtung größerer, konstruktiv bedingter Hohlräume innerhalb der Abschirmung mittels Monte-Carlo-Methode möglich ist, entzieht sich die Berechnung der möglichen Auswirkung kleiner Spalte, wie sie typisch bei der Montage von nur grob tolerierten Bauteilen entstehen, einer geeigneten Bestimmung. Daher muss bei der Auslegung der Abschirmung auf Versatz, Minimierung und, wo möglich auf Verfüllung der entstehenden Spalte geachtet werden.

Wie Tabelle 5.3-9 zeigt, sollte, wo immer möglich, auf hohe Toleranzanforderungen und damit eine spanende Nachbearbeitung der Blöcke verzichtet werden. Hierdurch ergeben sich zwangsläufig Spalte im Bereich von mehreren Millimetern bei der inneren (20% Recyclingquote), bis zu einem Zentimeter bei der äußeren Abschirmung. Da Teile der inneren Abschirmung sowie der Abschirmung der Protonenstrahlführung demontierbar sein müssen (siehe Kap 5.4 Handhabung), verbietet sich hier eine Verfüllung der Spalte mit Zement oder Bleiwolle. Zudem weisen selbst die mit diesen Methoden verfüllten Spalte eine nicht unerhebliche Transmission für schnelle Neutronen auf. Um ganz ohne Verfüllung der Spalte auszukommen, wurden die Oberflächen der Blöcke, wo immer möglich, mit einer Ver-

zählung versehen, die bei einer Zahnhöhe von ca. 100 mm und den zu erwartenden Spalten eine Materialüberdeckung von mehr als 85 % garantiert. Abbildung 5.3-4 stellt die Abschirmwirkung verschiedener Spaltanordnungen als rechnerisch gemittelte Materialdichte im Verhältnis zu einem spaltfreien Stahlblock dar.

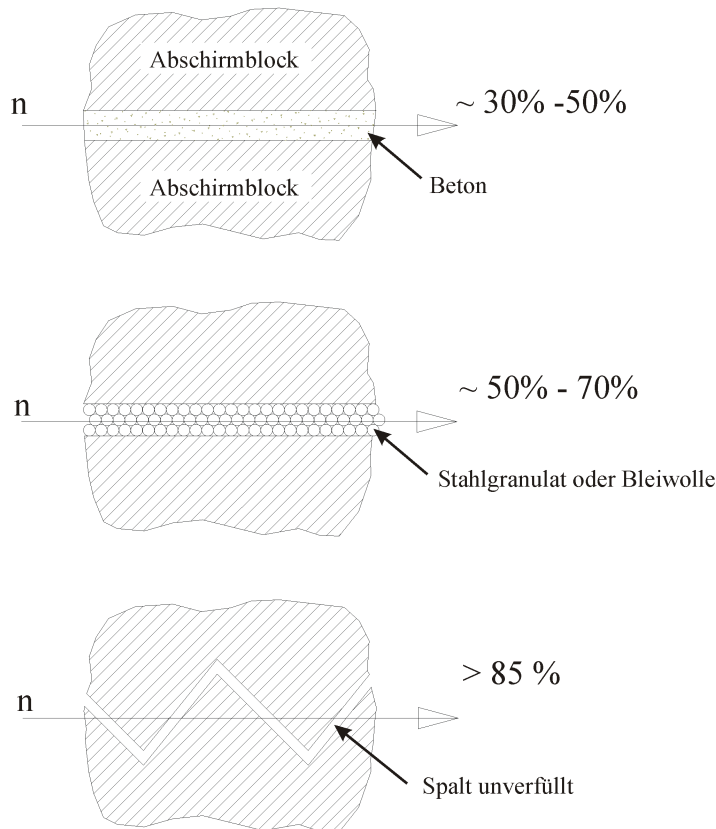


Abb. 5.3-4: Abschirmwirkung als rechnerisch gemittelte Materialdichte verschiedener Spaltformen und Verfüllungen

5.3.3. Äußere Targetabschirmung

Die äußere Targetabschirmung befindet sich außerhalb des inneren und innerhalb des äußeren Liners. Die erste Blockebene wird mittels Schrauben in einer Basisplatte verankert, welche ihrerseits mittels Ankern im Betonfundament befestigt wird. Die Konstruktion der Verankerung ist so ausgeführt, dass der Einschluss auch im Bereich der Verschraubung nicht durchbrochen wird (Abb. 5.3-5). Alle folgenden Blocklagen werden ohne zusätzliche Verankerung aufeinander gelegt. Durch die 45°-Verzahnung ist eine ausreichende Sicherheit gegen Verschiebung der Blöcke bei Horizontalbeschleunigungen, wie sie z.B. bei einem Erdbeben auftreten können, gegeben. Bis zur Höhe der Strahlrohre werden die Minustoleranzen der Blockhöhe mittels Futterblechen ausgeglichen. Für die darüber liegenden Ebenen sind die Toleranzen der Blockhöhen irrelevant für die Funktion der Abschirmung und werden daher nicht ausgeglichen. Aufgrund der niedrigen Wärmedeposition ist eine aktive Kühlung der äußeren Abschirmung nicht vorgesehen. Abb. 5.3-6 zeigt die Anordnung und Gestaltung der Blöcke.

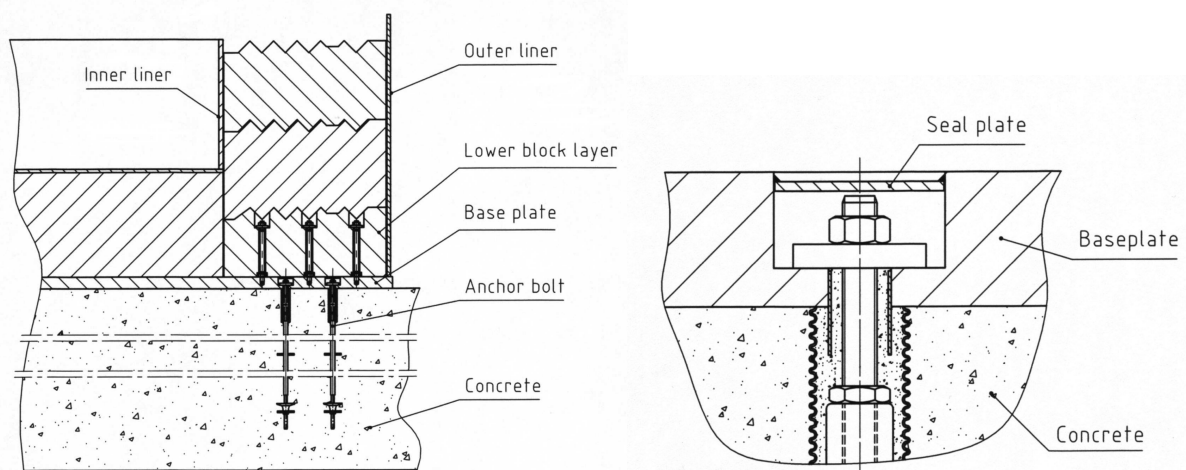


Abb. 5.3-5 Verankerung der untersten Blockebene in der Basisplatte

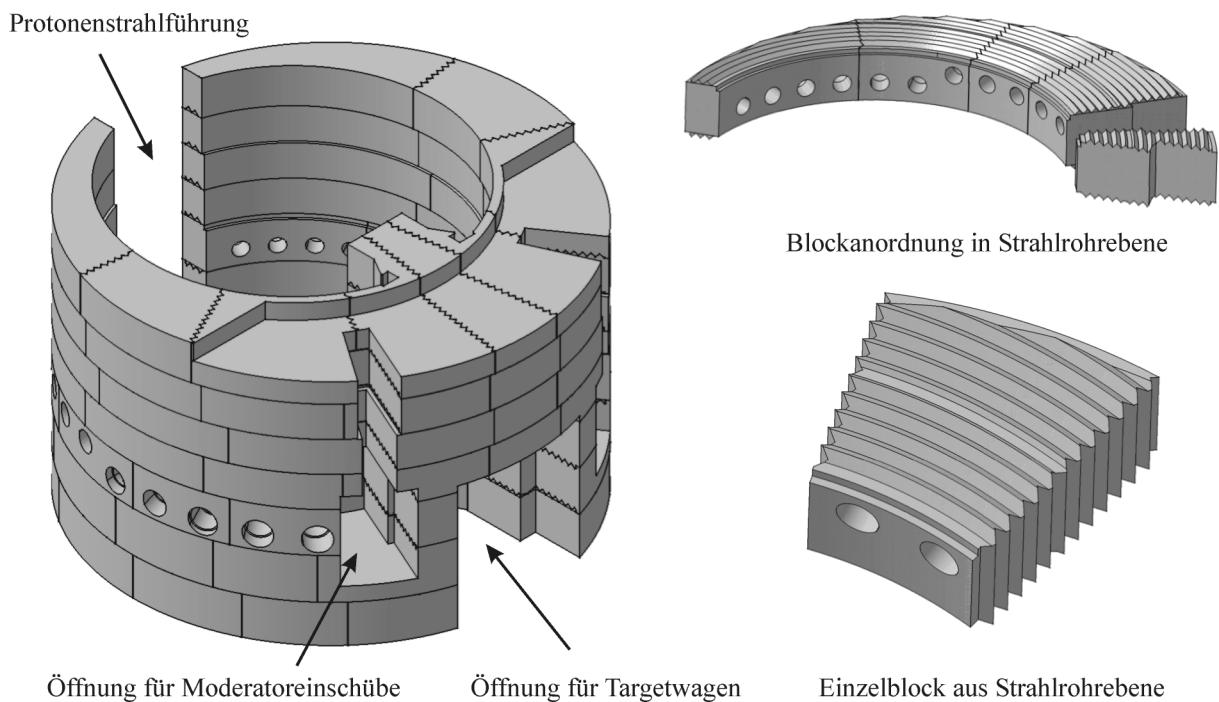


Abb. 5.3-6 Anordnung und Gestaltung der Blöcke der äußeren Abschirmung

5.3.4. Innere Targetblockabschirmung

Im Gegensatz zur äußeren ist die innere Abschirmung wesentlich komplizierter aufgebaut (Abb. 5.3-7 und Abb. 5.3-8). Während die äußere Abschirmung nach der Inbetriebnahme der Anlage zumindest bis zur Stilllegung nicht mehr bewegt werden muss, müssen handhabungsbedingt einige Teile der inneren Abschirmung demontierbar sein. Zusätzlich besteht die Notwendigkeit einer aktiven Wasserkühlung aller Strukturen innerhalb eines Radius von ca. 1,6 m um den Spallationsmittelpunkt. Dies betrifft neben dem regelmäßig auszutauschenden Reflektor auch den daran anschließenden, inneren Teil der Abschirmung. Bei der Verlegung der Kühlwasserverrohrung muss neben der Vermeidung von geradlinigen Durchbrüchen durch die Abschirmung und der damit verbundenen Erzeugung von „Hot Spots“ (Stellen

hoher Ortsdosisleistung) außerhalb der Abschirmung die generelle Montierbarkeit sowohl für den Einbau- als auch für einen evtl. notwendigen Ausbaurückbau berücksichtigt werden.

Obwohl nicht als Regelfall vorgesehen, ist die gesamte innere Abschirmung so ausgelegt, dass sie bis auf die untersten, verschraubten Blöcke entnehmbar und dekontaminierbar ist. Hierzu ist die den inneren Liner nach oben abschließende Top-Platte als Ganzes abnehmbar. Die Spalte zwischen allen später nicht mehr entnehmbaren Blöcken sind insoweit abgedichtet, dass auch bei einem unterstellten vollständigen Versagen des Targetmodules kein Quecksilber unter diese Blöcke fließen kann. Der innere Liner ist an seiner tiefsten Stelle mit einer Abflussleitung versehen (Abb. 5.3-9), die nach Öffnen eines im Untergeschoss befindlichen Schiebers eventuelle Leckagemedien in einen geeigneten, abgeschirmten Auffangtank leitet. Gleichzeitig dient diese Leitung der gezielten Absaugung der zwangsumgewälzten Heliumatmosphäre. Über geeignete Filtersysteme und Wärmetauscher sowie eine massenspektrometrische Fremdgasüberwachung wird das abgesaugte Helium oberhalb der inneren Abschirmung direkt unterhalb der Top-Platte dem inneren Liner wieder zugeführt.

Die Wasserkühlung aller Strukturen ist bis auf den Reflektor und den oberhalb des Reflektors befindlichen Abschirmstopfen redundant ausgelegt (Abb. 5.3-10). Im Falle einer Leckage eines Kühlwasserkreislaufes kann so der aufwendige Ausbau dieser Strukturen vermieden werden. Der Austausch des Reflektors und damit verbunden die Handhabung der darüber liegenden Abschirmung erfolgt regelmäßig. Eine redundante Auslegung der Kühlwasserverrohrung ist daher hier nicht erforderlich. Strukturen außerhalb eines Radius von 1,6 m und hier insbesondere die Strahlverschlusselemente sowie die darin angeordneten inneren Strahlrohreinsätze werden lediglich durch erzwungene Konvektion der Heliumatmosphäre gekühlt.

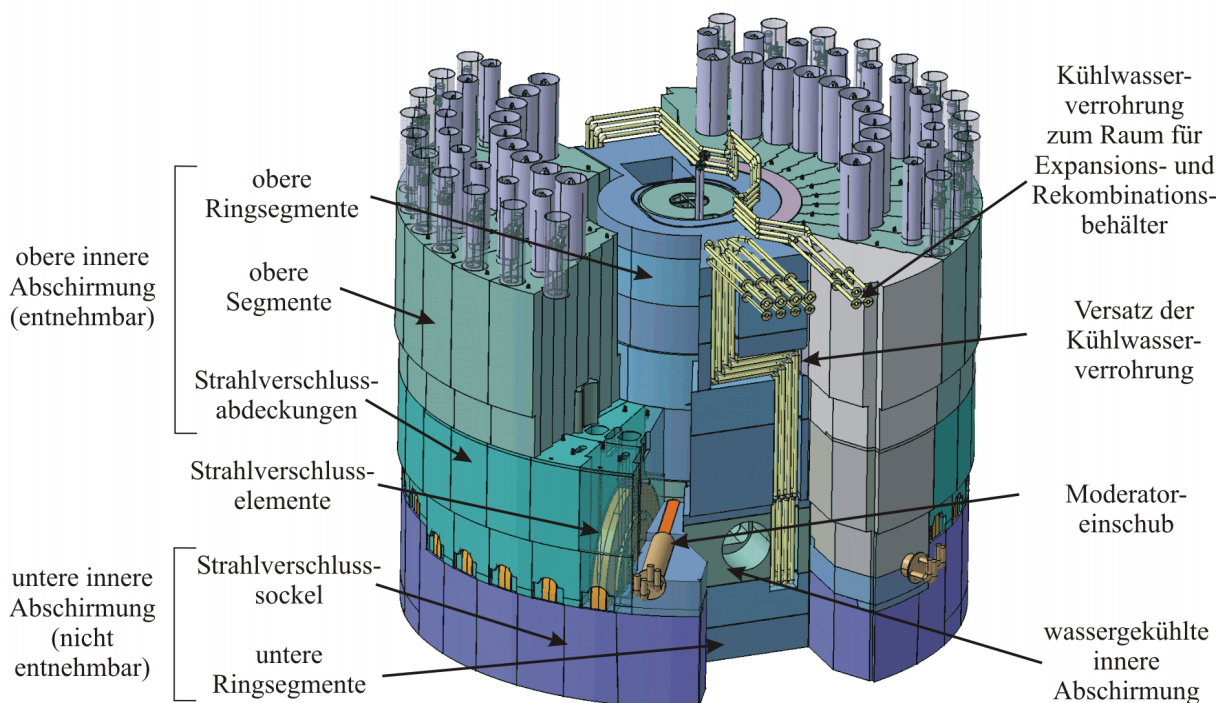


Abb. 5.3-7: Aufbau der inneren Abschirmung

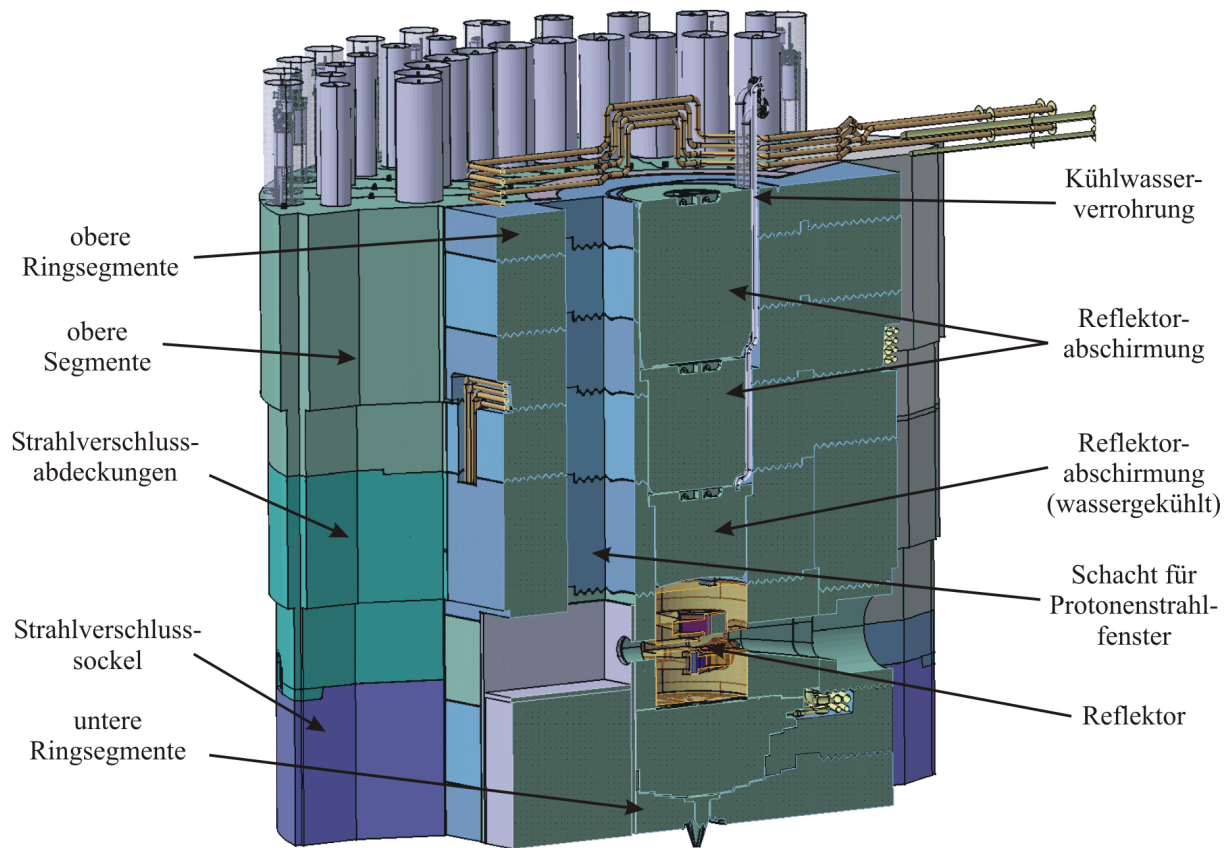


Abb. 5.3-8: Schnitt durch den Aufbau der inneren Abschirmung längs zur Protonenstrahlachse

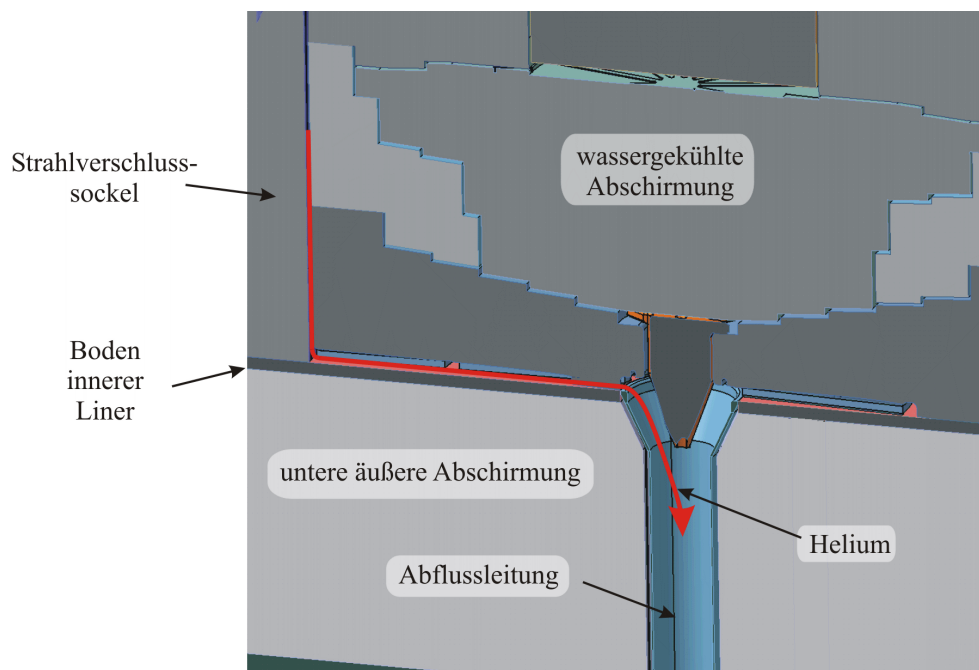


Abb. 5.3-9: Abflussleitung im Boden des inneren Liners

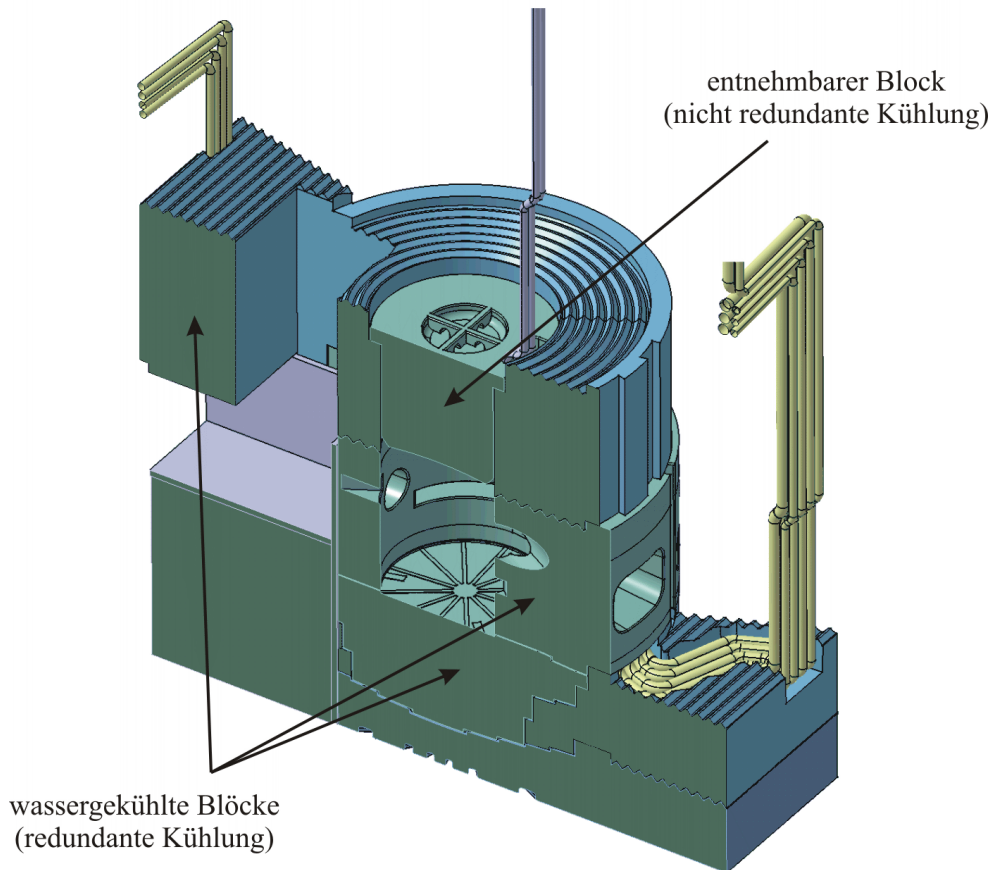


Abb. 5.3-10: Ansicht der wassergekühlten Abschirmung mit Verrohrung

5.3.5. Abschirmung der Protonenstrahlführung

Die Abschirmung der Protonenstrahlführung (Abb. 5.3-11) enthält mit ca. 19000 t die größte Menge an Fe-basiertem Abschirmmaterial innerhalb der Targetstation. Hier muss daher besonders auf kostengünstiges Material sowie einfache Bearbeitung und Montage geachtet werden. Die Abschirmung ist aus Recyclingmaterial mit einer möglichst hohen Recyclingquote aufgebaut. Um die Kosten für den Umformvorgang niedrig zu halten, kommen möglichst viele Blöcke gleicher Abmessung zum Einsatz, so dass gegenüber dem Sandgussverfahren das bei größeren Stückzahlen kostengünstigere Kokillengussverfahren eingesetzt werden kann. Bei vertretbaren Maßabweichungen zwischen einzelnen Blöcken ist eine Kokille für ca. 50 bis 100 Abgüsse verwendbar. Abb. 5.3-12 zeigt beispielhaft einen Querschnitt durch die Abschirmung im Bereich des ersten Kollimators (links) sowie des Protonenstrahlfängers (rechts). Der feststehende Teil der Abschirmung ist aus Quadern mit Abmessungen von 1 m x 1 m x 1,5 m und einer Masse von jeweils ca. 12 t aufgebaut. Die Anzahl der erforderlichen Blöcke mit einer Sondergröße wird so möglichst klein gehalten.

Abb. 5.3-13 zeigt den Aufbau der Protonenstrahlabschirmung der Spallationsquelle SNS. Aus Kostengründen kommen auch bei dieser Quelle Blöcke mit niedrigen Toleranzanforderungen zum Einsatz. Im Gegensatz zu der hier besprochenen Quelle besteht dort jedoch die Rückbauphilosophie der "vor Ort Konservierung" und somit kein Zwang, die Abschirmung nach Außerbetriebnahme der Anlage rückzubauen. Wie in Abb. 5.3-13 zu sehen, werden die Spalte zwischen den einzelnen Blöcken daher mittels Beton verfüllt. Aus Gründen der einfacheren

Rückbaubarkeit soll bei der hier besprochenen Quelle jedoch auf eine Verfüllung der Spalte und damit einer Verklebung der einzelnen Blöcke untereinander verzichtet werden. Wie bei der Targetabschirmung kommen daher Blöcke mit verzahnter Oberfläche zum Einsatz. Um trotz der prinzipiellen Ungenauigkeit dieser Konstruktionsweise eine hochgenaue Referenzoberfläche für die Positionierung der Strahlführungselemente zu erhalten, werden die inneren 500 mm des Strahlführungskanals in Beton ausgeführt. Eine Folie zwischen Stahlblöcken und Beton verhindert das Eindringen von flüssigem Beton in die Spalte zwischen den Blöcken während der Bauphase. Der innere Betonkanal dient zudem als Abschirmung gegen die Strahlung aus den nach einer gewissen Betriebszeit aktivierten Stahlblöcken der Abschirmung. Bei abgeschalteter Quelle und nach Entnahme von aktivierten Strahlführungskomponenten aus dem Strahlführungskanal sind somit, zumindest zeitlich begrenzt, manuelle Arbeiten im Kanal möglich.

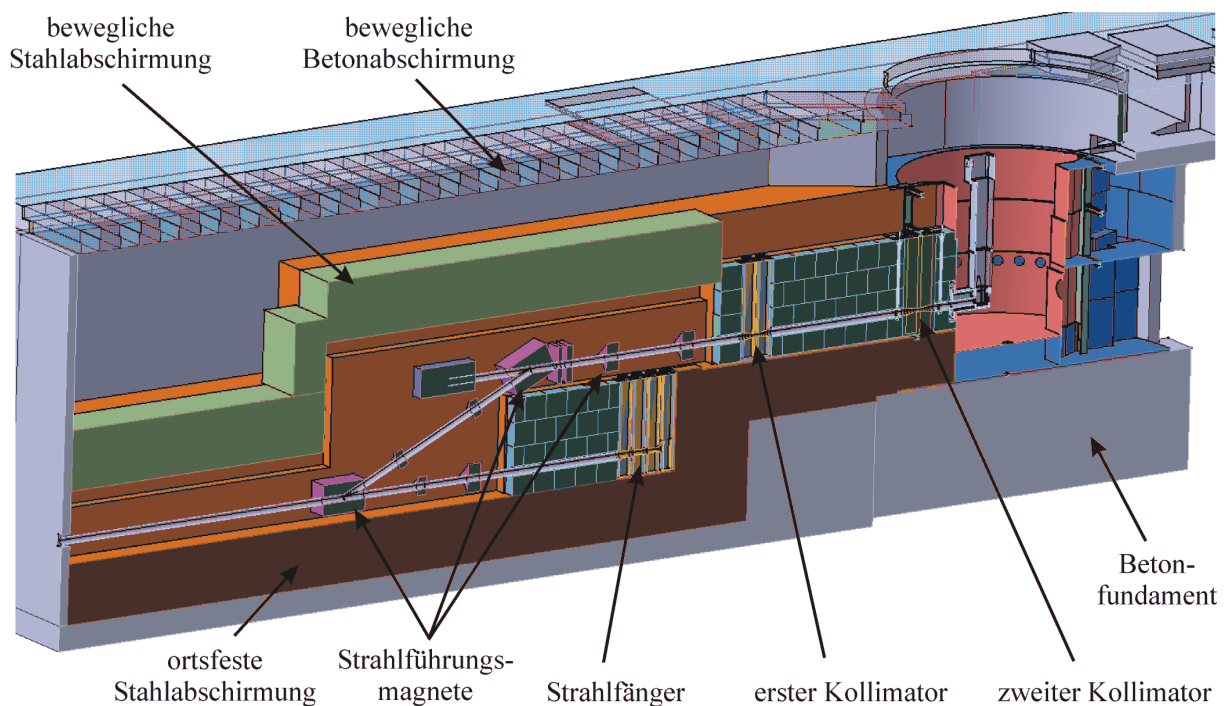


Abb. 5.3-11: Längsschnitt durch die Abschirmung der Protonenstrahlführung

Grundsätzlich werden zwei unterschiedliche Bereiche der Strahlführungsabschirmung unterschieden. In Bereichen mit niedrigem betrieblichem Strahlverlust steht ein 2 m breiter und 2,5 m hoher Kanal zur Verfügung, in dem das Vakuumsystem der Strahlführung sowie die Strahlführungskomponenten frei zugänglich sind. Die notwendige Abschirmung zum Oberen Handhabungsbereich ist hier in Form von selbsttragenden Riegeln oder Platten mit einer maximalen Einzelteilmasse von 50 t ausgeführt. Diese lassen sich bei Bedarf mit Hilfe des Kranes im Oberen Handhabungsbereich entfernen. In Bereichen, in denen mit hohen betrieblichen Strahlverlusten gerechnet werden muss, ist die Strahlführung in Form von Modulen aufgebaut, die sich nach oben hin entnehmen lassen (Abb. 5.4-14 links). Durch die Baulänge der Module von ca. 4 m Gesamtlänge, von denen 3 m oberhalb der Strahlachse angeordnet sind, ist eine zusätzliche Stahlabschirmung oberhalb dieser Module unnötig. Die auf der Oberseite dieser Module befindlichen Versorgungsanschlüsse sind bei abgeschalteter Quelle strahlenschutztechnisch nur bedingt zugänglich. Abbildung 5.4-14 rechts zeigt diese Anordnung am Beispiel der Spallationsquelle SINQ.

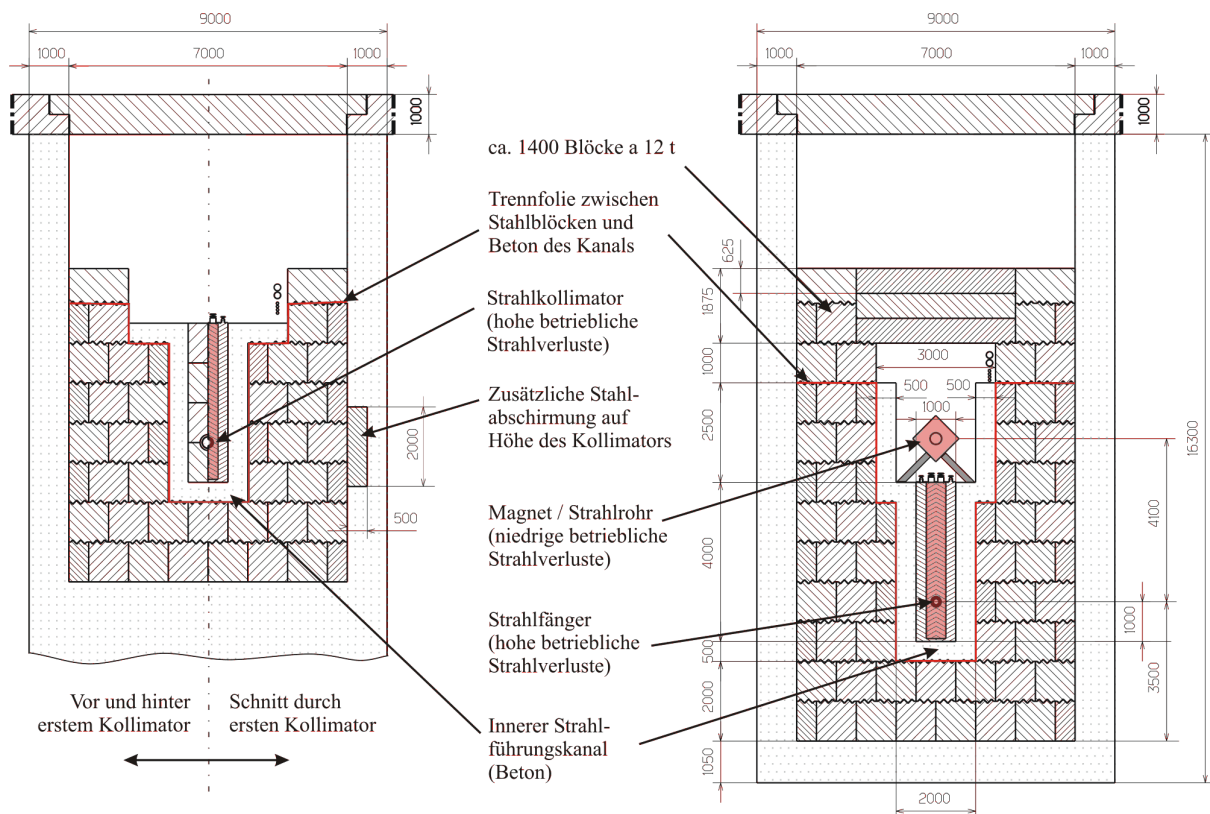


Abb. 5.3-12: Querschnitt durch die Abschirmung der Protonenstrahlführung



Abb. 5.3-13: Aufbau der Protonenstrahlführung der Spallationsquelle SNS

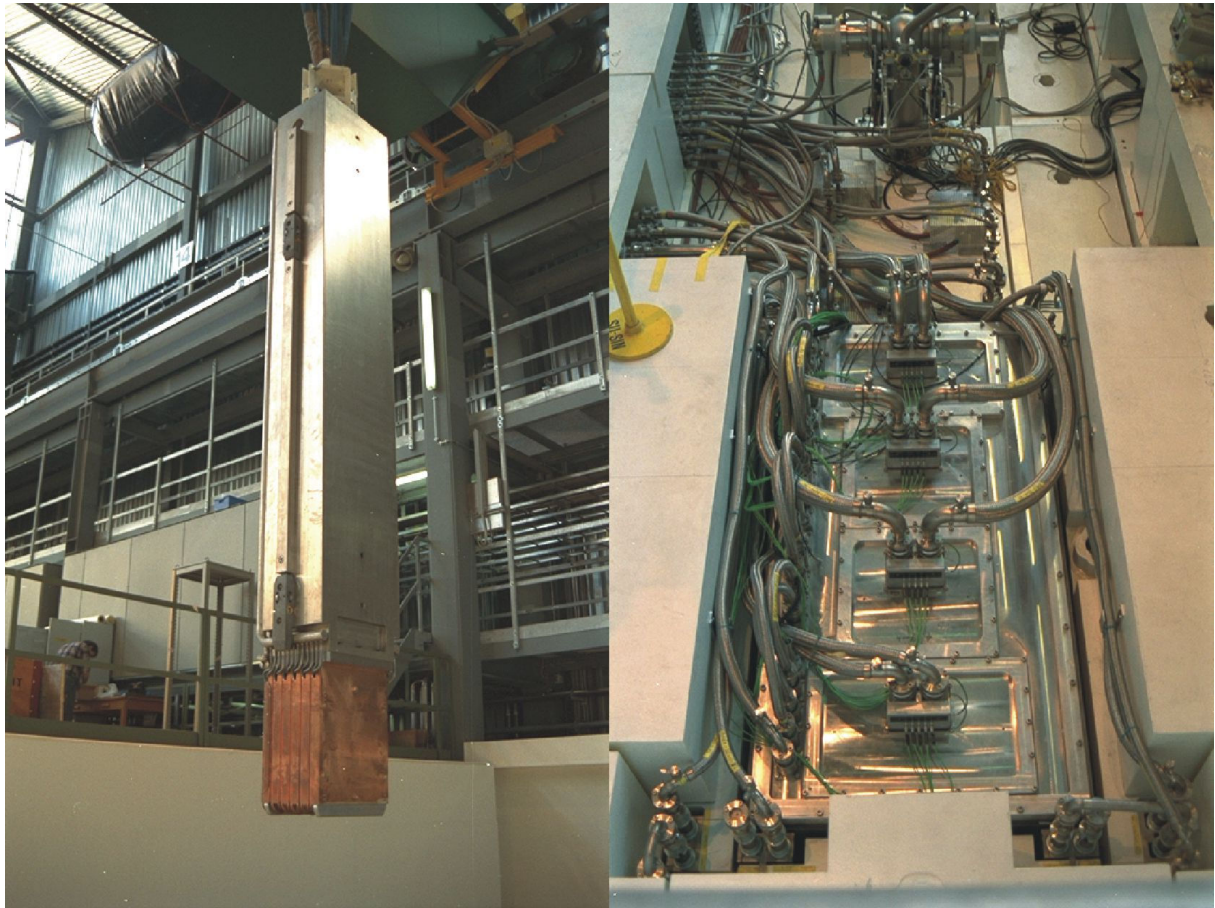


Abb. 5.3-14 links: Modul der Protonenstrahlführung bei SINQ / rechts: Strahlfänger bestehend aus vier Modulen

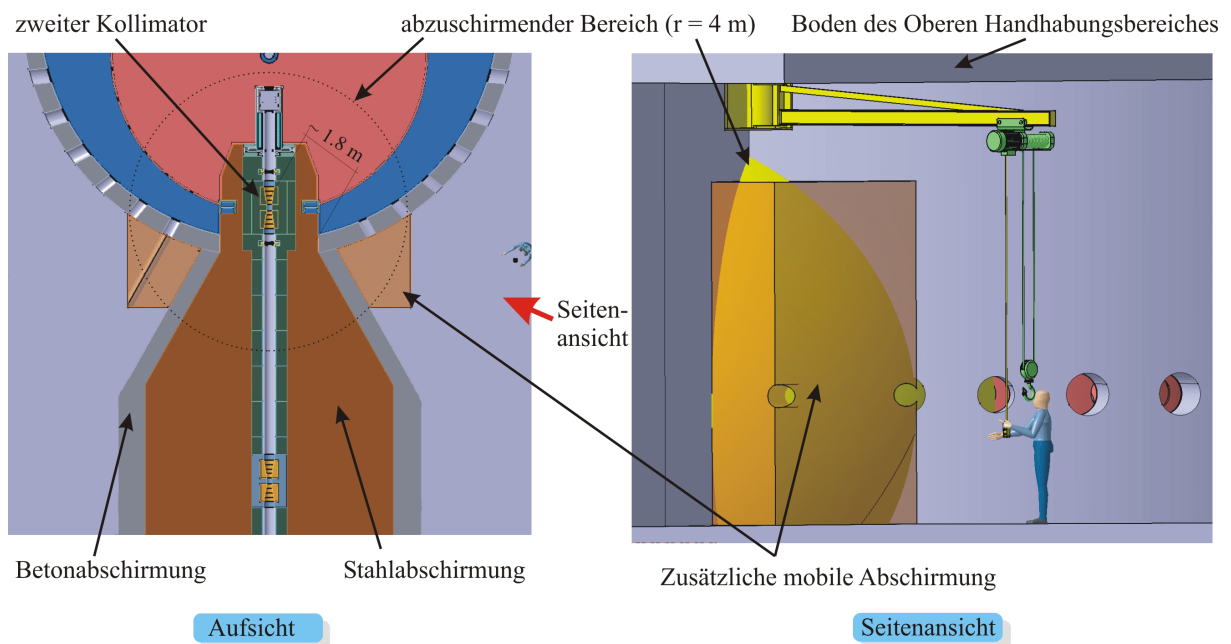


Abb. 5.3-15: Zusätzliche mobile Abschirmung innerhalb der Instrumentenhalle, falls der Kollimator im Bereich der Engstelle liegt

Ein besonderes Problem stellt die Abschirmung des vorderen (zweiten) Kollimators dar. Bei der Protonenstrahlführung für die Langpulsstation liegt dieser im Bereich der Engstelle des Übergangsbereiches zwischen Abschirmung der Strahlführung und des Targetblockes. Die maximal mögliche Abschirmdicke innerhalb des Strahlführungskanals beträgt an dieser Stelle nur 1,8 m Stahl zuzüglich ca. 0,5 m Beton. Die Differenz zu den geforderten 3,65 m (Stahläquivalent) muss daher mittels lokaler Abschirmsteine im Bereich der Neutronenstrahlabschirmung der ersten beiden Neutronenstrahlrohre ausgeglichen werden (Abb. 5.3-15). Dieser Bereich ist nicht vom Kran der Instrumentenhalle aus erreichbar. Zur Handhabung der zusätzlichen Abschirmung ist unter der Decke im Bereich der Engstelle ein separater Kran notwendig. Da diese Abschirmung mobil ist, ist ein Quellsbetrieb auch ohne oder mit nur teilweise vorhandener Abschirmung möglich. Um dies zu vermeiden, ist daher eine administrative Regelung zum Strahlenschutz innerhalb der Instrumentenhalle notwendig.

5.4. Strahlverschlüsse und Neutronenstrahlrohre

5.4.1. Wahl der Art der Strahlverschlüsse

Die Grundfunktion der Strahlverschlüsse ist das Öffnen und Schließen eines Neutronenstrahlrohres innerhalb des Targetabschirmblockes, das zur Auskopplung der in den Moderatoren erzeugten Neutronen für die jeweiligen Instrumente dient. Die Strahlrohre können je nach Anforderung des Instrumentes mit verschiedenartigen strahloptischen Elementen ausgestattet sein. In der hier besprochenen Quelle soll die Möglichkeit geschaffen werden, diese Elemente bis auf 1,6 m an die Moderatoren heranzuführen und somit auch innerhalb der Strahlverschlüsse anzuordnen. Je nach verwendetem strahloptischen Element ergibt sich die Forderung nach einer zum Teil sehr hohen Positionierungsgenauigkeit. Neben der eigentlichen Grundfunktion der Strahlverschlüsse ergeben sich daher zusätzliche Anforderungen:

- Ausreichende Verschlusselementlänge (Abschirmwirkung in Stellung "Geschlossen"),
- Minimierung der durch die Strahlverschlusskonstruktion verursachten Spalte und Freiräume innerhalb der Abschirmung,
- Selbsttätiges Verfahren in Position "Geschlossen" bei Stromausfall oder Schaden am Antriebssystem ("fail safe"),
- Möglichkeit der schwimmenden Aufnahme von Strahlrohreinsätzen, um eine hohe Positioniergenauigkeit derselben zu erreichen, ohne gleichzeitig hohe Toleranzforderung an das Strahlverschlusselement selbst zu stellen,
- Geringer Platzbedarf (Breite) des dem Moderator zugewandten Teils des Strahlverschlusselementes (Platzproblem siehe Abb. 5.4-2).

Üblicherweise werden an vorhandenen Quellen Hubverschlüsse eingesetzt (Abb. 5.4-1 oben). Diese Strahlverschlüsse lassen sich vergleichsweise einfach von oben in entsprechend geformte Taschen des Abschirmblockes einsetzen. Der Antrieb erfolgt meist über oben liegende Spindelhubtriebe. Diese Strahlverschlussbauart weist jedoch im Hinblick auf die o.g. Anforderungen, insbesondere bei Quellen größerer Leistung, einige gravierende Nachteile auf:

- Bedingt durch den Hub entstehen je nach Strahlverschlussstellung oberhalb oder unterhalb des Verschlusselementes große Freiräume und somit Schwächungen in der Abschirmung.
- Bedingt durch das hohe Gewicht der Strahlverschlusselemente kommen zumeist Spindelhubtriebe als Antrieb zum Einsatz. Ein selbsttätiges Verfahren in Position "Geschlossen" bei Stromausfall oder Schaden am Antriebssystem ("fail safe") ist somit nicht gewährleistet. Aus Gründen der Positionierung der schwimmend gelagerten Strahlrohreinsätze stellt zudem die untere Strahlverschlussposition die offene Stellung dar. Zum sicherheitsrelevanten Verfahren in Stellung "Geschlossen" ist daher zwingend die Zufuhr von externer Energie notwendig.
- Ein Wechsel des im Strahlverschluss liegenden Strahlrohreinsatzes bedingt entweder einen Ausbau des Strahlverschlusselementes oder einen horizontalen Zugriff von der Instrumentenhalle aus bei eingebautem Strahlverschlusselement. Dieser müsste jedoch bei geöffnetem Strahlverschluss erfolgen, was selbst bei abgeschalteter Quelle aufgrund der extrem hohen Aktivierung der Target-Moderator-Reflektor-Anordnung kaum möglich erscheint.

Drehverschlüsse dagegen erlauben den vertikalen Zugang zum Strahlrohreinsatz bei geschlossenem Strahlverschluss. Zudem ist bei gezielter Unwucht des Strahlverschlusselementes eine passive "fail safe"-Funktionalität gegeben. Prinzipbedingt ist bei einem Drehverschluss nur ein kleiner Spalt um das Verschlusselement herum notwendig. Im Folgenden wird daher die konzeptionelle Ausarbeitung eines Drehverschlusses unter Berücksichtigung der Randbedingungen der hier besprochenen Quelle dargestellt.

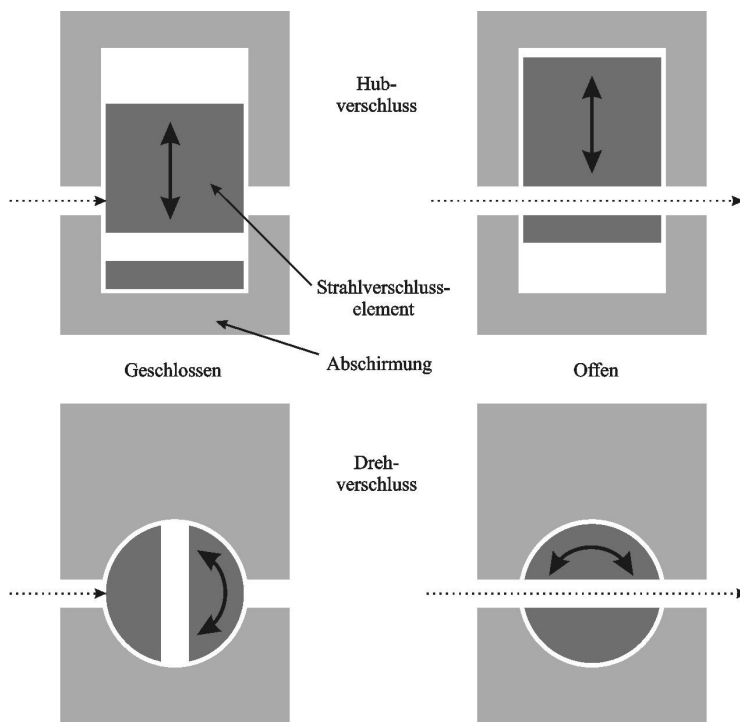


Abb. 5.4-1: Vergleich der Konzepte Hub- und Drehverschluss

5.4.2. Ausführung des Strahlverschlusses

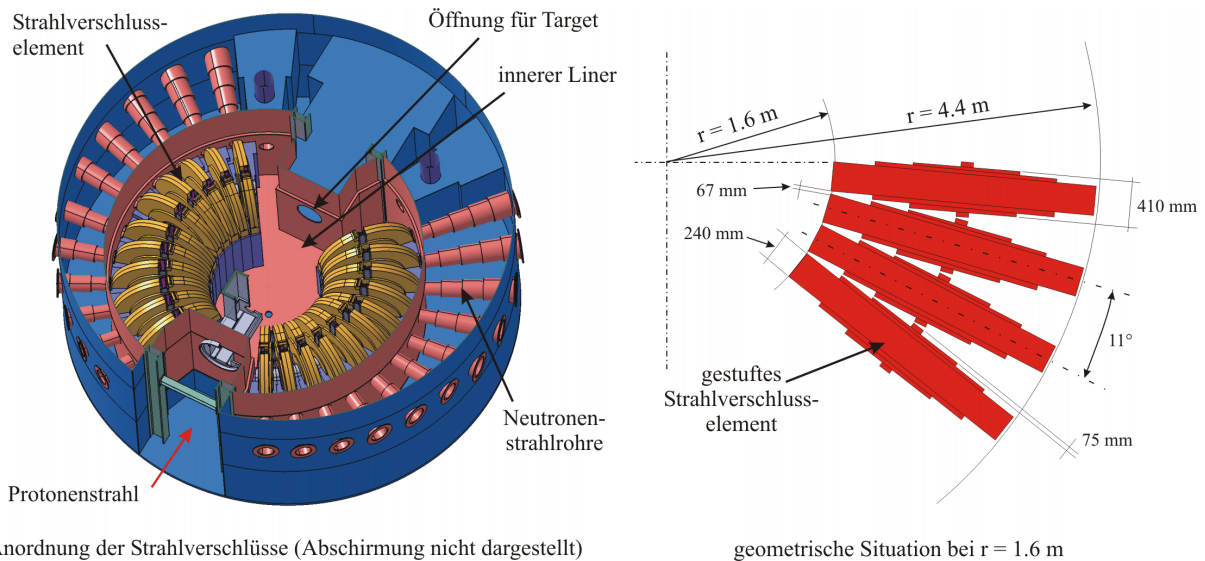
Die größte Herausforderung bei der konstruktiven Umsetzung der Drehverschlüsse stellen die beengten Platzverhältnisse dar. Wie schon in Kap. 5.1.2 gezeigt, stehen bei einer Strahlrohrteilung von nur 11° und einem geforderten Abstand zum Moderator von nicht mehr als 1,6 m rechnerisch lediglich 307 mm als maximale Breite am Umfang des Strahlverschlusselementes zur Verfügung. Als Breite des Aufnahmekanals für den schwimmenden Strahlrohreinsetzung wird 240 mm festgelegt, um eine ausreichende Bewegung des Einsatzes innerhalb des Kanals und damit eine Feinjustage des Einsatzes ohne zu hohe Toleranzanforderungen an das Verschlusselement zu gewährleisten. Somit stehen auf der dem Moderator zugewandten Seite nur 33,5 mm als seitliches Strukturmaterial für ein Verschlusselement zur Verfügung. Als Form für das Verschlusselement wurde daher eine in der Dicke mehrfach gestufte Scheibe gewählt, die am Umfang mit 240 mm lediglich die Breite des Einbauraumes für den Einsatz, im Zentrum aber eine Breite von 410 mm aufweist. Somit verbleibt im Zentrum auf jeder Seite des Verschlusselementes eine Breite von 75 mm, welche für eine ausreichend dimensionierte Lagerung zur Verfügung steht.

Für die Lagerung werden keramische Hybridzylinderrollenlager verwendet, welche ohne Schmierstoffe und somit ohne organische Materialien im Strahlenfeld betrieben werden können. Durch die fehlende Notwendigkeit der Schmierung sind diese Lager auf Dauer wartungsfrei. Die statische Tragzahl der gewählten Lager beträgt $C_0 = 688$ kN pro Lager und somit 1376 kN pro Strahlverschlusselement. Bei einem Gewicht des Strahlverschlusselementes von etwa 16 t (Gewichtskraft ~ 160 kN) ergibt sich eine mehr als 8,6-fache statische Sicherheit der Auslegung.

Obwohl es sich bei der Belastung der Lager um eine mit niedriger Drehzahl ausgeführte Schwenkbewegung handelt, soll zusätzlich zur Überprüfung der statischen Tragfähigkeit eine Abschätzung der ermüdungsbedingten Lebensdauer durchgeführt werden. Die Betriebsfrequenz der Strahlverschlüsse kann zwischen mehrfach innerhalb einer Stunde und einmal pro Woche schwanken. Bei ungenutzten Strahlrohren ist auch ein Stillstand über längere Zeiträume möglich. Daher wird konservativ von einem Betriebszyklus (Offen-Geschlossen-Offen) pro Stunde und somit einer mittleren Drehzahl von 180° Drehwinkel pro Stunde über die Lebenszeit der Gesamtanlage ausgegangen. Dies ergibt eine geforderte Lagerlebensdauer von:

$$0,5 \text{ h}^{-1} \times 24 \text{ h} \times 180 \text{ Betriebstage pro Jahr} \times 40 \text{ Betriebsjahre} = 86400 \text{ Umdrehungen}$$

Mit einer dynamischen Tragfähigkeit von $C = 300$ kN lassen die eingesetzten Lager unter den angenommenen Belastungsbedingung eine modifizierte Lebensdauer L_1 von $17,2 \times 10^6$ Umdrehung erwarten. Nach dieser Anzahl von Umdrehungen ist statistisch mit einer Ausfallquote von nur 1 % der eingesetzten Lager zu rechnen, was bei einer Gesamtanzahl von 44 verwendeten Lagern eine rechnerische Ausfallquote von 0,44 Lagern ergibt. Umgerechnet auf die geforderte Lebensdauer von nur 86400 Umdrehungen ergibt sich rechnerisch eine Ausfallquote von 2×10^{-4} Lagern innerhalb der 40-jährigen Betriebszeit. Ein Lagerschaden kann daher als höchst unwahrscheinlich und somit als nicht zu erwartende Reparatur im Sinne der Handhabungsphilosophie angesehen werden.



Anordnung der Strahlverschlüsse (Abschirmung nicht dargestellt)

geometrische Situation bei $r = 1.6 \text{ m}$

Abb. 5.4-2: Platzverhältnisse der Strahlverschlusssanordnung an der dem Moderator zugewandten Seite

Die weiteren Komponenten des Strahlverschlusses wie Antrieb und feinpositionierbarer Endanschlag sind so angeordnet, dass sie einfach vom Oberen Handhabungsbereich aus zugänglich und austauschbar sind. Um jegliche Art der mechanischen Kraftübertragung und somit den Einsatz von Schmierstoffen auszuschließen, basiert das Antriebssystem auf der Verwendung von Linearmotoren. Diese Motoren wirken auf Permanentmagnete, welche auf einer Seite des Strahlverschlusselementes angebracht sind. Da diese Art von Magneten sowohl unempfindlich gegenüber der vorhandenen Strahlung und Temperaturen sind, als auch über 40 Jahre keine nennenswerten Alterungserscheinungen erwarten lassen, kann von einer praktisch unbegrenzten Lebensdauer ausgegangen werden. Trotz des mit 16 t schweren Strahlverschlusselementes sind bei der geforderten Verstellzeit von einer Minute keine signifikanten Beschleunigungen und somit vernachlässigbare Antriebskräfte zur Überwindung der Massenträgheit zu erwarten. Die von den Linearmotoren zur Verfügung zu stellenden Antriebskräfte ergeben sich daher aus der Summe der maximal zu erwartenden Lagerreibungskräfte der Wälzlager, der konstruktiven Unwucht des Strahlverschlusselementes sowie eines ausreichenden Sicherheitszuschlages aufgrund möglicher Ungenauigkeiten der getroffenen Annahmen. Zudem werden 3 Motoren auf einer Trägerplatte als Antriebseinheit montiert, von denen jeder einzelne Motor in der Lage ist 50% der Auslegungskraft aufzubringen. Daher ist ein Weiterbetrieb auch nach Ausfall einer der drei Motoren sichergestellt.

Diese Antriebseinheit (Abb. 5.4-3) wird von oben in einen Spalt zwischen Strahlverschlusselement und Strahlverschlussabdeckung eingesetzt. Der für die Funktion eines Linearmotors wichtige und damit genau einzuhaltende magnetische Spalt zwischen Motor und Permanentmagnet wird über in der Trägerplatte vorhandene kleine Räder realisiert. Dazu wird die Trägerplatte über federbelastete Druckstücke immer so an den Magnet angedrückt, dass die Räder immer Zwangskontakt mit der Permanentmagnetoberfläche haben. Um eine freie Beweglichkeit der Trägerplatte zu gewährleisten, ist diese mittels eines Doppelgelenkes vom restlichen Teil des Antriebssystems abgekoppelt. Somit ist der magnetische Spalt unabhängig von den Toleranzen der darüber liegenden Abschirmung. Abbildung 5.4-4 zeigt das Strahlverschlusssystem.

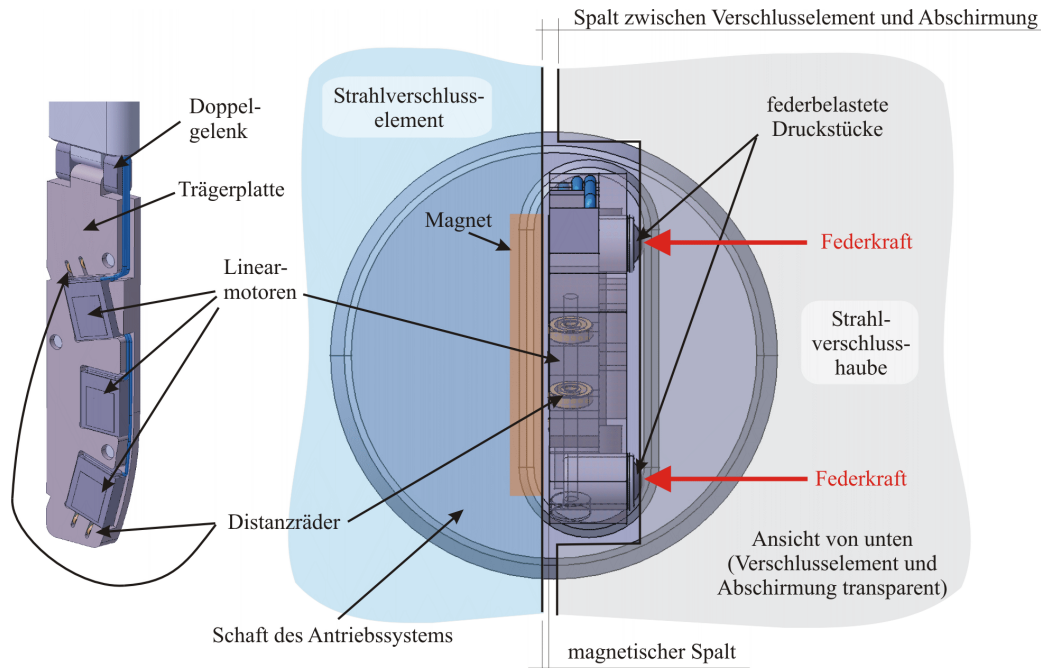


Abb. 5.4-3: Strahlverschluss-Antriebssystem

Im geöffneten Zustand wird das Strahlverschlusselement gegen die Rückstellkräfte aus der Unwucht mittels eines Arretierungsstiftes in der Position gehalten. Der Antrieb dieses Stiftes liegt oberhalb der inneren Abschirmung unter der Top-Platte und ist somit im Wartungsfalle einfach zugänglich. Über ein Gegengewicht wird sichergestellt, dass der Stift bei Stromausfall des Antriebssystems nach oben gezogen und somit das Strahlverschlusselement freigegeben wird. Bedingt durch die Unwucht des Strahlverschlusselementes verfährt dieses ohne weitere Hilfsenergie in den sicheren Zustand "Geschlossen".

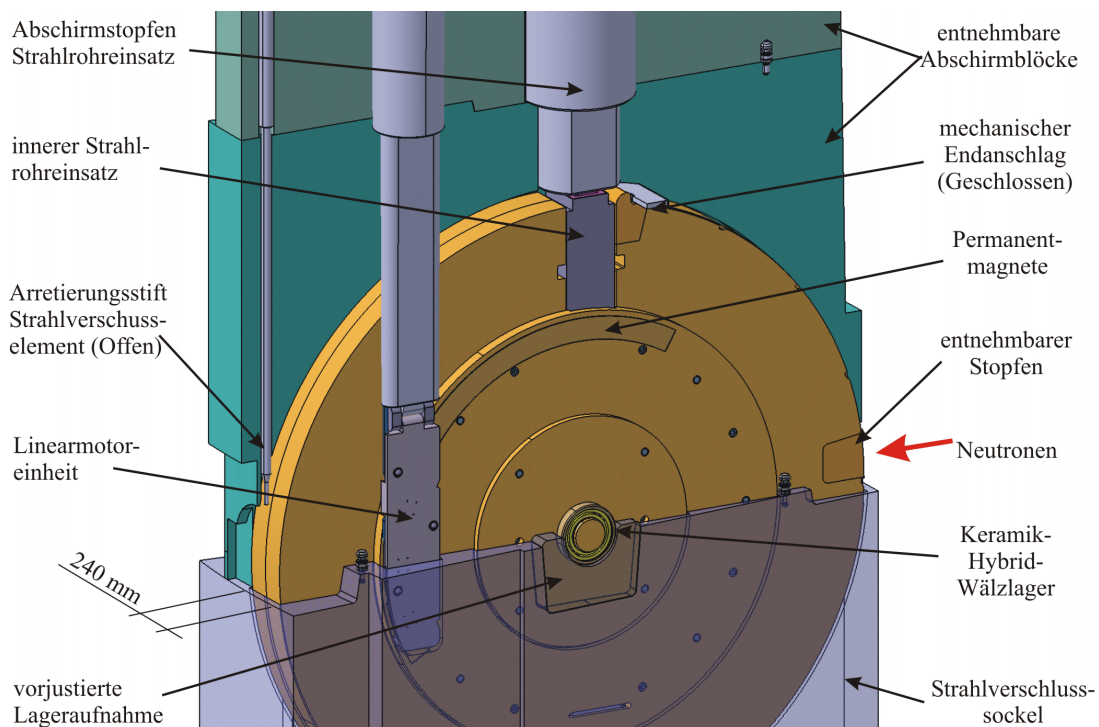


Abb. 5.4-4: Strahlverschlusssystem

5.4.3. Positionierung der Neutronenstrahlrohreinsätze

Die größte Herausforderung bei der konstruktiven Bearbeitung des innerhalb der Targetabschirmung befindlichen Neutronenstrahlrohrsystems liegt in der erforderlichen Positionierungsgenauigkeit sowie der Zugänglichkeit für den Fall des Austausches. Das Strahlrohrsystem innerhalb der Targetabschirmung besteht aus zwei Strahlrohreinsätzen, wovon sich der Äußere im Bereich der äußeren Abschirmung, der Innere innerhalb des Strahlverschlusselementes befindet. Um die Strahlverluste gering und somit die Effizienz der Quelle hoch zu halten, wird als maximaler lateraler Versatz zwischen zwei Strahlrohrabschnitten 1 mm und als maximaler Winkelversatz 0.1° gefordert. Die hohen Toleranzanforderungen der Neutronenleiteranordnung innerhalb der Instrumentenhalle von wenigen hundertstel Millimetern Lateralversatz dienen in erster Linie der Vermeidung von Streustrahlung an den Versatzkanten der Leiter. Diese Streustrahlung würde die notwendige Abschirmung der Neutronenleiter innerhalb der Instrumentenhalle unnötigerweise vergrößern. Da die in diesem Kapitel beschriebenen Strahlrohreinsätze tief innerhalb des Targetabschirmblockes liegen, können hier größere Lateralversätze zugelassen werden. Trotzdem liegt die hier geforderte Positionierungsgenauigkeit der Strahlrohreinsätze weit oberhalb dessen, was beim Aufbau der Abschirmung, des Linersystem und der Strahlverschlüsse mit vertretbarem Aufwand zu erreichen ist. Im Folgenden wird daher ein Konzept beschrieben, welches die Einhaltung der hohen geforderten Positionierungsgenauigkeit weitgehend unabhängig von den Toleranzen der umgebenen Komponenten gewährleistet.

Unabhängig vom verwendeten strahl-optischen System werden Strahlrohreinsätze mit identischen Außenmaßen verwendet. Die strahl-optischen Komponenten innerhalb dieser Einsätze können mit vertretbarem Aufwand bei der Herstellung der Einsätze hochgenau vorjustiert werden. Das hier besprochene Positionierungssystem (Abb. 5.4-5) bezieht sich daher nur auf die Positionierung der Einsätze.

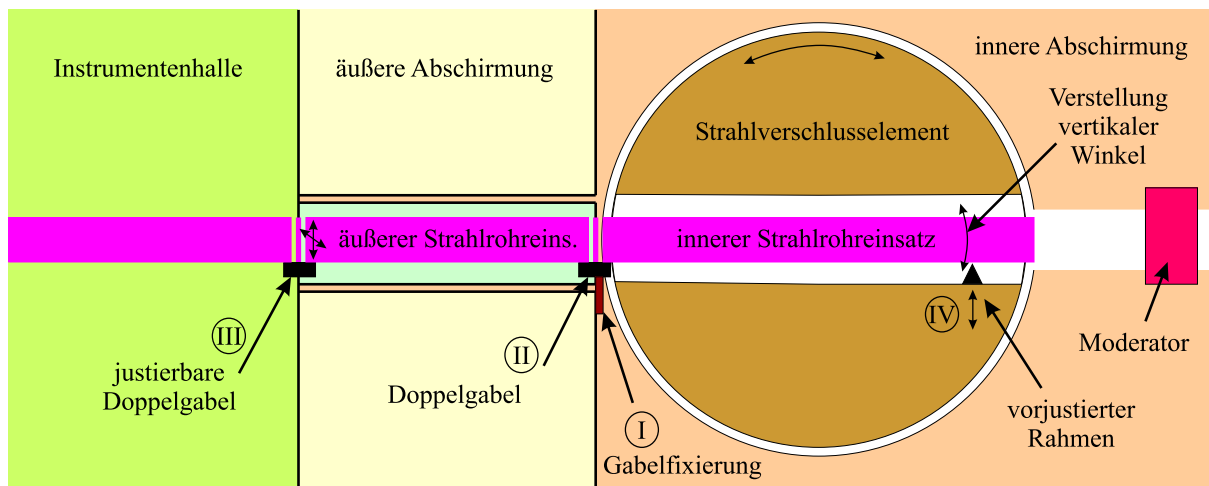


Abb. 5.4-5: Prinzip der Strahlrohrjustierung innerhalb der Targetabschirmung

Fixpunkt des Positionierungssystems ist die Gabelfixierung (I) innerhalb des inneren Liners. Diese wird bei der Erstmontage des Linersystems auf dem Liner verschraubt, mittels geeigneter optischer Messverfahren vermessen und gegebenenfalls nachjustiert sowie anschließend durch Verschweißen endgültig fixiert. Diese Gabelfixierung dient als Aufnahme für die vorne am eingesteckten Hüllrohr befindliche Doppelgabel. Sollte ein Austausch des

innerhalb dieser Doppelgabel befindlichen inneren Neutronenstrahlfensters und somit ein Ausbau des Hüllrohres notwendig werden, ist somit eine reproduzierbare Positionierung sichergestellt. Die aus einem Stück gefertigte Doppelgabel (II) nimmt sowohl das äußere Ende des inneren Einsatzes als auch das innere Ende des äußeren Einsatzes auf und gewährleistet so einen minimalen Lateralversatz deutlich unterhalb dem geforderten einen Millimeter. (Abb. 5.4-6)

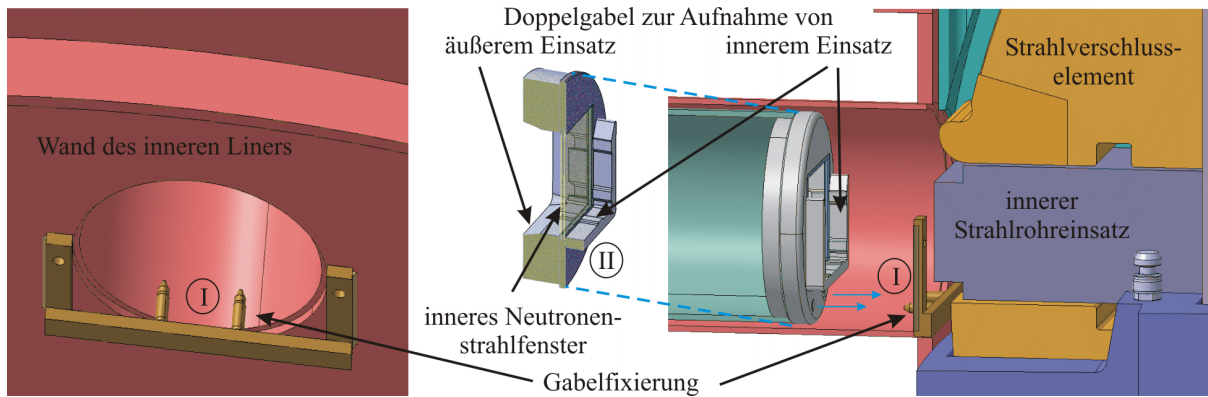


Abb. 5.4-6: Fixierung Doppelgabel

Wird das Strahlverschlusselement in Richtung der Stellung "Geschlossen" verfahren, legt sich der innere Strahlrohreinsetzung in der Doppelgabel (II) ab (Abb. 5.4-7). Bei weiterer Drehung des Strahlverschlusselementes in die gleiche Richtung liegt der innere Einsatz neben der Doppelgabel nur noch auf dem vorjustierten Rahmen innerhalb des Strahlverschlusselementes auf. Während die Höhe der Doppelgabel fest steht, kann durch Veränderung der Endposition des Strahlverschlusselementes die Höhe des vorjustierten Rahmens und somit der vertikale Winkel des inneren Einsatzes justiert werden. Der horizontale Winkel wird durch die horizontale Position des Rahmens innerhalb des Strahlverschlusselementes vorgegeben. Dieser Rahmen wird während des Aufbaus der inneren Abschirmung einmal horizontal vorjustiert, um Aufbautoleranzen des Strahlverschlusssystems auszugleichen. Ab diesem Zeitpunkt gilt der somit eingestellte Horizontalwinkel des Strahlrohreinsetzes als Referenz für das gesamte Strahlrohr und wird später nicht mehr verändert.

Die grundsätzliche Bewegung des Strahlverschlusselementes wird über das linearmotorbasierte Antriebssystem ausgeführt. Der letzte Teil der Bewegung bis zum Erreichen der Endposition wird durch Absenken des Arretierstiftes erreicht (Abb. 5.4-7 rechts). Die endgültige Position des Arretierstiftes kann über eine Feinverstellung justiert werden. Durch die Wahl der Hebelarme "Doppelgabel-Rahmen" sowie "Strahlverschlusselementmitte-Rahmen" kann eine Winkeleinstellung des Einsatzes von $\pm 0.1^\circ$ durch eine Positionierung des Arretierstiftes von ± 5 mm erreicht werden. Die geforderte Winkelgenauigkeit ist daher ohne hohe Toleranzanforderungen an die beteiligten Komponenten einzuhalten.

Thermische Einflüsse auf die Positioniergenauigkeit sind nicht zu erwarten. Die Lagerung des Strahlverschlusselementes ist der innerste Punkt der Abschirmung bzw. des Strukturmaterials, dessen thermisch bedingte Positionsänderung eine Auswirkung auf die Lage des Strahlrohreinsetzes haben könnte. Dieser Punkt liegt mit 3,0 m Abstand zum Target weit außerhalb der thermisch beeinflussten Zone.

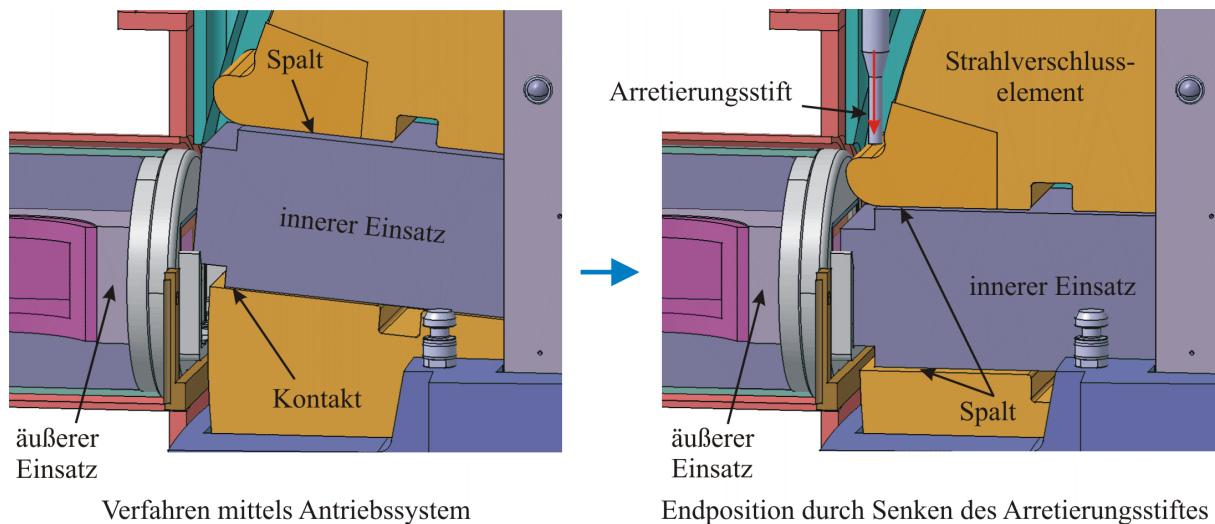


Abb. 5.4-7: Feinjustierung des inneren Strahlrohreinsatzes

Eine der Doppelgabel (II) vergleichbare Konstruktion sorgt an der Stelle (III) (Abb. 5.4-8) für einen minimalen Lateralversatz zwischen dem äußeren Ende des äußeren Strahlrohreinsatzes und dem innern Ende des ersten Segmentes des innerhalb der Instrumentenhalle befindlichen Neutronenleitersystems. Im Gegensatz zur Doppelgabel (II) ist diese (III) sowohl horizontal als auch vertikal justierbar. Somit ist die genaue Winkellage des äußeren Strahlrohreinsatzes unabhängig von der Toleranz des eingeschweißten Strahlrohres einstellbar. Ein Balgsystem sorgt für die notwendige Flexibilität der Anordnung bei gleichzeitiger Wahrung des an dieser Stelle notwendigen Einschlusses. Abbildung 5.4-9 zeigt eine Explosionsdarstellung des gesamten, innerhalb des Targetabschirmblockes befindlichen Neutronenstrahlführungssystem.

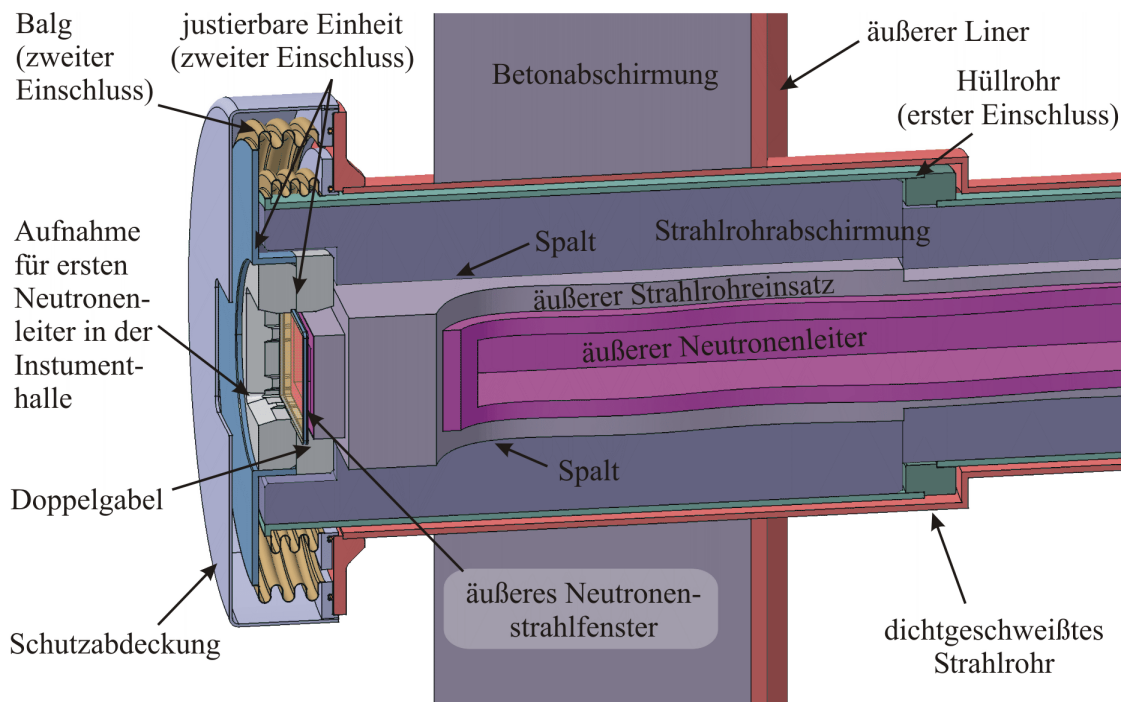


Abb. 5.4-8: Justierung des äußeren Strahlrohreinsatzes

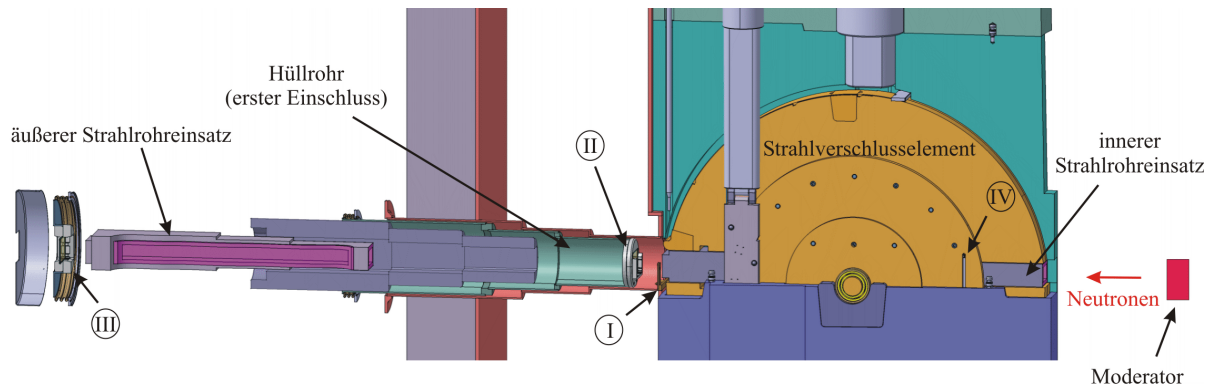


Abb. 5.4-9: Strahlrohrführung innerhalb der Targetabschirmung (Explosionsdarstellung)

5.5. Handhabung aktivierter Komponenten

5.5.1. Handhabungskonzept

Entscheidend für die Auslegung der Handhabungssysteme ist die Festlegung der grundlegenden Handhabungsphilosophie für den entsprechenden Teil der Anlage. Je aufwendiger die geforderte Handhabungsaufgabe ist, desto umfangreicher und komplexer müssen die zur Verfügung gestellten Einrichtungen sein. Da neben der Targetstation auch in anderen Teilen der Gesamtanlage mit aktivierten und kontaminierten Komponenten zu rechnen ist, erscheint eine zentrale Heiße-Zellen-Anlage zu Weiterverarbeitung ausgebauter Module und Komponenten bzw. zur endgültigen lagergerechten Verpackung sinnvoll. Damit lassen sich folgende grundlegende Festlegungen für die Handhabung aktivierter und kontaminierter Komponenten innerhalb der Targetstation treffen:

- Alle Systeme und Komponenten, bei denen ein Defekt nicht mit Sicherheit auszuschließen ist, müssen austauschbar sein.
- Alles was darüber hinaus wirtschaftlich vertretbar austauschbar gestaltet werden kann sollte austauschbar sein, um eine möglichst hohe Flexibilität für evtl. spätere Umbauten zu gewährleisten.
- Es werden nur ganze Komponenten bzw. Module getauscht. Eine weitere Zerlegung oder Reparatur innerhalb der Targetstation erfolgt nicht.
- Innerhalb der Targetstation werden aktivierte oder kontaminierte Bauteile weder spanend bearbeitet noch geschweißt. Einziges zulässiges Trennverfahren für nicht lösbare Verbindungen ist (nicht spanendes) Schneiden.
- Wo immer möglich, erfolgt eine Standardisierung von Handhabungsvorgängen um die Anzahl der verschieden benötigten Werkzeuge zu minimieren.
- Soweit als möglich soll eine räumliche Trennung von Handhabungs- und Nutzerbereichen eingehalten werden.

Zusätzlich wird aus Sicherheitsgründen generell gefordert:

- Strahlabschaltung bei allen Handhabungsvorgängen, die einen Eingriff in bewegliche Abschirmungen bedingen.
- Entleerung aller entzündlichen Moderatormaterialien aus den Moderatoren für alle Vorgänge, bei denen ein Eingriff in den inneren Einschluss notwendig ist.
- Abwarten einer sinnvollen Abklingzeit bei allen Komponenten, bei denen signifikante Aktivitäten aufgrund kurzlebiger Nuklide bestehen.
- Gezielter Austausch der Atmosphäre von an den Handhabungsvorgängen beteiligten Einschlusssystemen zur Verhinderung der unkontrollierten Ausbreitung aktivierter Gase.

Als Räumlichkeiten für Handhabungsvorgänge für die Komponenten der direkten Targetumgebung stehen im Wesentlichen der Obere Handhabungsbereich, die Heiße Zelle sowie Teile der Instrumentenhalle zur Verfügung. Der Obere Handhabungsbereich deckt alle Handhabungsvorgänge ab, die einen vertikalen Zugriff auf die zu handhabenden Komponenten erlauben. Dies betrifft neben den Komponenten der Protonenstrahlführung im Wesentlichen Komponenten innerhalb des Targetabschirmblockes. Der Obere Handhabungsbereich erstreckt sich über die gesamte Länge der Targetstation und gestattet somit auch Transportvorgänge von einem Ende zum anderen sowie Schleusvorgänge zwischen dem Oberen Handhabungsbereich und der Heißen Zelle bzw. der nachgeschalteten Dekontaminations- und Transportzelle. Der Obere Handhabungsbereich sollte während der dort ausgeführten Handhabungsvorgänge jederzeit den Aufenthalt von Bedienpersonal ermöglichen. Alle Handhabungsvorgänge müssen daher unter Zuhilfenahme geeigneter Abschirmung bzw. eines mobilen Einschlusses oder anderer geeigneter Verfahren zur Verhinderung der Verschleppung von Kontamination durchgeführt werden.

Der Obere Handhabungsbereich ist mit einem Deckenkran mit einer Traglast von 100 t sowie evtl. mit mobilen Flurfördergeräten ausgestattet. Die oberste Kranhakenposition und damit die Deckenhöhe des Oberen Handhabungsbereiches wird daher maßgeblich von der Höhe der zu verwendenden Wechselflaschen bestimmt. Aufgrund der Ausmaße dieses Bereiches ist eine vollständig dekontaminierbare Innenausstattung wirtschaftlich nicht sinnvoll. Eine weitreichende Kontamination dieses Bereiches während der Handhabungsvorgänge muss daher in jedem Falle wirksam vermieden werden. Im Gegensatz dazu ist die Einrichtung temporärer strahlenschutztechnischer Sperrbereiche bei nicht ausreichender lokaler Abschirmung denkbar, solange dies den eigentlichen Handhabungsvorgang nicht behindert.

Einsatzzweck der Heißen Zelle ist primär der Wechsel des Targets bzw. die Wartung der auf dem Targetwagen befindlichen Komponenten. Dekontaminations- und Transportzelle dienen der Aus- bzw. Einschleusung von zu tauschenden Komponenten. Bei der Heißen Zelle handelt es sich um einen Handhabungsbereich, der während der eigentlichen Handhabungsvorgänge nicht betreten werden kann. Alle Handhabungen müssen daher fernbedient erfolgen, was entsprechende Anforderung an die Komplexität der Handhabungsvorgänge und damit an die Konzeption und Konstruktion der zu handhabenden Komponenten sowie der benutzten Werkzeuge zur Folge hat. Trotzdem sollten alle Systeme innerhalb der Heißen Zelle so gestaltet sein, dass nach Abwarten einer ausreichenden Abklingzeit und der Herstellung einer

vorgegebenen Konfiguration innerhalb der Heißen Zelle diese unter Vollschutz zumindest kurzzeitig zu betreten ist. Dies gestattet im Notfall eine manuelle Reparatur von defekten Einrichtungsgegenständen bzw. Werkzeugen der Heißen Zelle und senkt somit die Anforderungen an die Zelleneinrichtung. Die Zelle ist mit einem Deckenkran mit einer Traglast von 20 t sowie einem Kraftmanipulator mit einer Kapazität von 2 t ausgestattet. Zusätzlich sind Kameras sowie Sichtfenster mit Parallelmanipulatoren vorgesehen. Alle Einrichtungen innerhalb der Heißen Zelle sind dekontaminierbar.

Für einige Handhabungsvorgänge wird sich die Nutzung der Instrumentenhalle nicht vermeiden lassen. Dies gilt insbesondere für den Zugang zu den äußeren Teilen der innerhalb der Targetabschirmung befindlichen Neutronenstrahlrohre sowie der Moderatoren. Bei der Konzeption der Handhabungsabläufe muss hierbei den besonderen Anforderungen der Instrumentenhalle, insbesondere bezüglich Kontaminationsschutz, Rechnung getragen werden. Diese Handhabungsvorgänge entsprechen im Wesentlichen den Handhabungen von horizontalen Einschüben an einem Reaktor und werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Ein wichtiges Kriterium bei der Konzeption des Handhabungsvorganges für eine Komponente ist neben deren Eigenschaften auch die zu erwartende Wechselfrequenz sowie die für den Handhabungsvorgang zur Verfügung stehende Zeit. Tabelle 5.5-1 zeigt den Einfluss der erwarteten Komponentenlebensdauer auf die unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.4 aufgeführten Jahresbetriebszeiten. Tabelle 5.5-2 listet die identifizierten, zu handhabenden Komponenten mit den erwarteten Handhabungsfrequenzen auf, während Tabelle 5.5-3 einen Überblick über die zu erwartenden, handhabungsrelevanten Eigenschaften der jeweiligen Komponenten und Systeme gibt.

Tab. 5.5-1: Einfluss der Lebensdauer auf die Handhabung

Erwartete Lebensdauer	Handhabungszeitraum	Zul. Dauer des Vorganges	Bemerkung
= 5400 h	Kurze planmäßige Abschaltpause SSD (scheduled short shut down period)	14 Tage	Komponenten mit Lebensdauern von weniger als 5400 h sollten auf alle Fälle vermieden werden.
> 5400 h < 40 Jahre	Lange jährliche Abschaltpause SAD (scheduled long annual shutdown)	12 Wochen	Viele Handhabungsvorgänge in dieser Abschaltpause; Für endgültige Auslegung evtl. Konflikte abklären.
~ 40 Jahre (Komponente hat eine endliche Lebensdauer)	Kurze unplanmäßige Abschaltpause USD (unscheduled short shut down)	~ 1 Monat	Betrifft alle Komponenten, die eine endliche Lebensdauer aufweisen (z.B. Verschleiß), aber auf Anlagenlebensdauer ausgelegt sind.
>> 40 Jahre (oder Komponenten ohne definierte endliche Lebensdauer)	Lange unplanmäßige Abschaltpause ULD (unscheduled long shut down)	~ 3 Monate	Betrifft alle Komponenten, die grundsätzlich nicht verschleissen oder aber auf erheblich mehr als die Anlagenlebensdauer ausgelegt sind.
Unabhängig von der Lebensdauer	Unplanmäßige Abschaltung URD (unscheduled shut down for recovery or modification)	nicht definiert	Betrifft Wiederherstellung der Betriebsfähigkeit nach Unfällen sowie Aufrüstungen, Umrüstungen bzw. Leistungssteigerung.

Tab. 5.5-2: Erwartete Handhabungsfrequenzen

System/ Komponente	Anzahl (pro Station)	Erwartete Lebensdauer	Grund**	Gruppe *	Handhab. zeitraum	Anzahl HHV***
Target	1	1,5 - 3 Mon.	StrSch	I	SSD	99 – 199
Protonenstrahlfenster (PBW)	1	1 - 2 Jahre	StrSch	II	SAD	19 – 39
Anschlussbox für PBW	1	>> 40 Jahre	Defekt	III	SAD	0
Moderator-Einschub	2	3 Jahre	StrSch	II	SAD	26
Entkopplerfolie (Moderator)	1	1 Jahr	Abbrand	II	SAD	39
Moderator-System	2	40 Jahre	Umbau	IV	URD	0
Reflektor	1	3 - 5 Jahre	StrSch	II	SAD	7 – 12
innere Strahlrohreinsätze	22	5 Jahre	StrSch/Umbau	II/IV	SAD	154
äußere Strahlrohreinsätze	22	10 Jahre	Umbau	II	SAD	66
Antrieb Strahlverschluss	22	20 Jahre	Defekt	II	USD	22
Kollimator	2	20 Jahre	Defekt	II	USD	2
Strahlstopper	1	20 Jahre	Defekt	II	USD	1
Lagerung Strahlverschluss	22	>> 40 Jahre	Defekt	III	ULD	0
Strahlverschluss (Rad)	22	>> 40 Jahre	Umbau	IV	URD	0
Quecksilberpumpe (Motor)	1	5 Jahre	StrSch	II	SAD	7
Target-Wagen (Wartung)	1	1 Jahr	Wartung	II	SAD	39
Target-Wagen (Umbau)	1	40 Jahre	Defekt/Umbau	III/IV	URD	0
innere Abschirmung	1	>> 40 Jahre	Umbau	IV	URD	0
Magnete der Strahlführung	~ 10	40 Jahre	Defekt	III/IV	ULD	0

* Gruppeneinteilung gemäß Kap. 4.4

** Strahleninduzierte Materialversprödung (StrSch)

*** HHV: Handhabungsvorgänge innerhalb der Anlagenlebensdauer

Tab. 5.5-3: Erwartete Komponenteneigenschaften

System / Modul / Komponente	Aktivität	Kontamination	Größe / Gew.	benutzter Raum
Target Modul	sehr hoch	sehr hoch	gering	Heiße Zelle
Targetwagen	hoch	hoch	sehr hoch	Heiße Zelle
Protonenstrahlfenster	hoch/mittel	mittel	mittel	OHBB
Anschlussbox für PBW	mittel	mittel	mittel	OHBB
Moderator-Einschub	mittel	mittel	hoch	Instrumentenhalle
Entkopplerfolie (Moderator)	hoch	mittel	hoch	Instrumentenhalle
Moderator-System	gering	gering	hoch	OHBB
Reflektor	hoch/mittel	mittel	hoch	OHBB
innere Strahlrohreinsätze	mittel	mittel	gering	OHBB
äußere Strahlrohreinsätze	gering	gering	gering	Instrumentenhalle
Antrieb Strahlverschluss	gering	mittel	gering	OHBB
Kollimator	hoch	mittel	mittel	OHBB
Strahlstopper	hoch/mittel	mittel	mittel	OHBB
Strahlverschlusselement (Rad)	mittel	mittel	hoch	OHBB
Quecksilberpumpe (Motor)	gering	mittel	mittel	Heiße Zelle
Target-Wagen (Wartung)	mittel	mittel	mittel	Heiße Zelle
Target-Wagen (Umbau)	mittel	hoch	hoch	Heiße Zelle
innere Abschirmung	hoch/mittel	mittel	hoch	OHBB
Magnete der Strahlführung	gering	gering	hoch	OHBB

* OHBB: Oberer Handhabungsbereich

5.5.2. Target

Wie aus Tabelle 5.5-2 zu ersehen, ist der Targetwechsel der einzige Handhabungsvorgang der Gruppe I und damit der wichtigste Vorgang, der innerhalb der kurzen Abschaltpause planmäßig zu erfolgen hat. Daher ist hier ein erhöhter Aufwand bei der Auswahl und Konstruktion der Handhabungswerkzeuge sowie der Auslegung der zu handhabenden Komponenten gerechtfertigt. Im Folgenden sind die wichtigsten Randbedingungen, welche bei der Konzeption des Handhabungsvorganges „Targetwechsel“ zu beachten sind, aufgeführt:

- Hochkomplexe Einbausituation, Target befindet sich in einer zentralen Position innerhalb des Abschirmblockes,
- Wechsel muss innerhalb der kurzen Abschaltpause (14 Tagen) durchgeführt werden,
- Hohe Aktivität des Targets und insbesondere des Strahleintrittsbereiches,
- Hohe Aktivität der Medien der zu öffnenden Kreisläufe (Hg und Kühlwasser),
- Verbleib von kleinen Mengen aktiviertem Quecksilber innerhalb des Targets nach Entleeren des Hg-Kreislaufes unvermeidbar (-> Kontaminationsgefahr),
- Nachwärme (wenn auch gering) im Targetbehälter und Quecksilber.

Aufgrund der hohen Aktivitäten der zu handhabenden Teile sowie der Kontaminationsgefahr findet der komplette Handhabungsvorgang innerhalb einer Heißen Zelle statt. Das Target befindet sich am vorderen Ende eines Transportwagens, der neben dem gesamten Quecksilberkreislauf und Teilen der Wasser- und Gassysteme auch den Teil der Abschirmung enthält, der für einen horizontalen Zugang zum Target entfernt werden müsste. Somit kann das Target durch einfaches Verfahren des Targetwagens von der Betriebs- in die Handhabungsposition bewegt werden (Abb. 5.5-1).

Sobald sich das Target innerhalb der Heißen Zelle befindet, wird nach Aufsetzen der Handhabungsmaschine eine Abschirmhaube aufgeschoben, um die Strahlenbelastung der Einrichtungsgegenstände der Heißen Zelle und insbesondere der Kameras zu minimieren (Abb. 5.5-2). Diese Abschirmhaube ist zudem mit Anschlagpunkten für Transport und Handhabung des Targets sowie mit Heiz- und Kühlsystemen ausgestattet und wird zusammen mit dem gebrauchten Target entsorgt.

Um den eigentlichen Wechselvorgang zu beschleunigen, wird das Target zusammen mit der Sicherheitshülle als ein Modul (Abb. 5.2-1) gehandhabt und als Ganzes gewechselt. Somit ist gleichzeitig gewährleistet, dass die Sicherheitshülle nie älter und damit höher strahlen-geschädigt ist als die eigentliche Targethülle selbst.

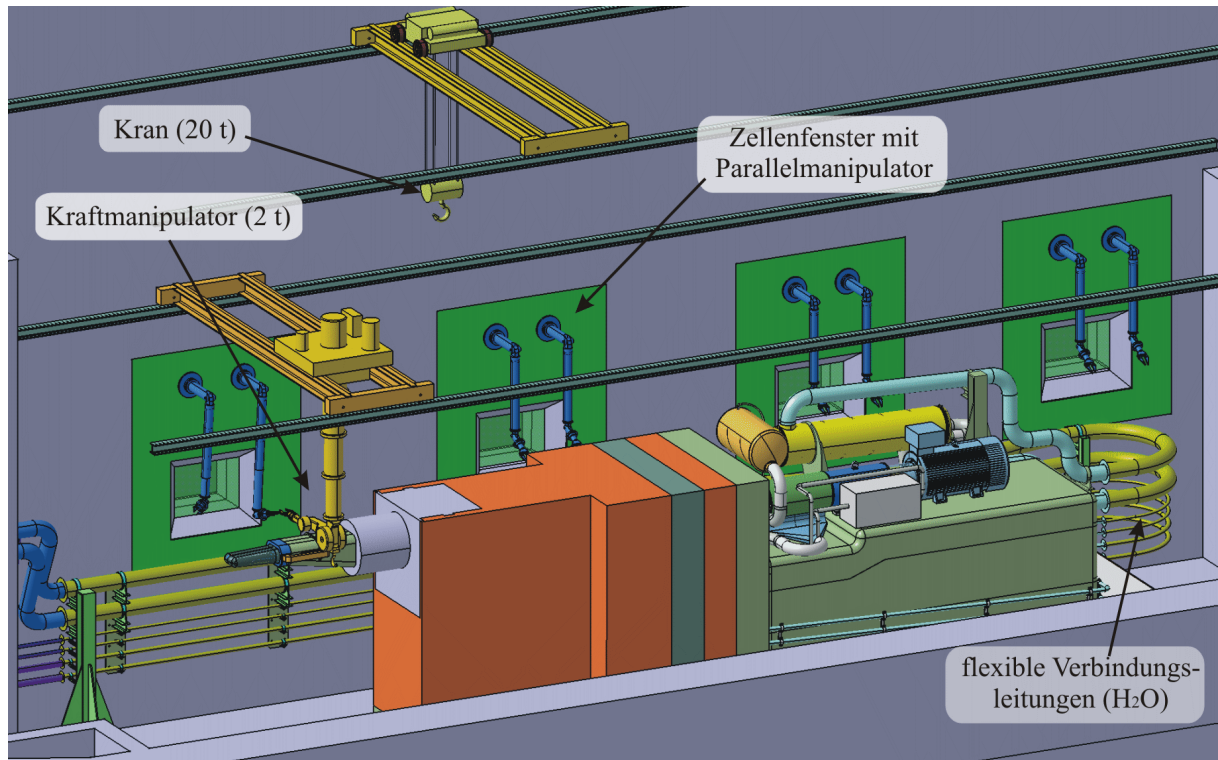


Abb. 5.5-1: Targetwagen innerhalb der Heißen Zelle in Handhabungsposition

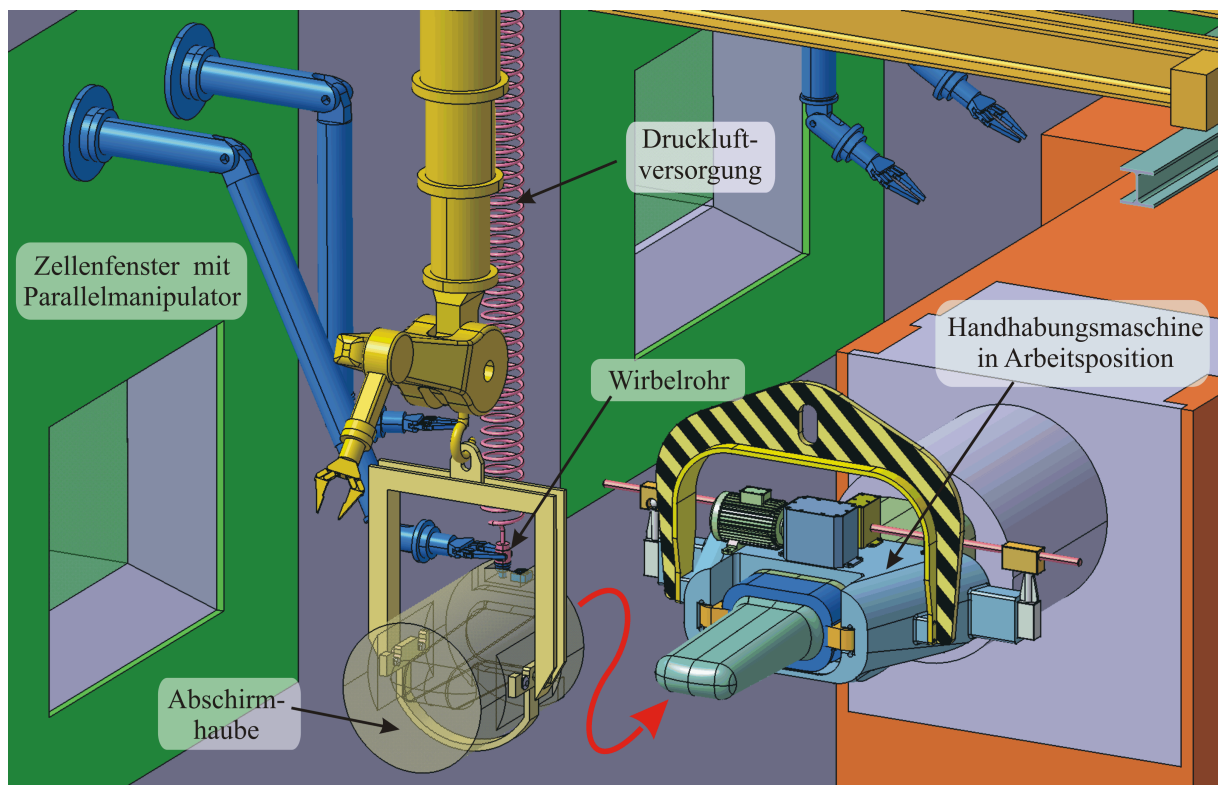


Abb. 5.5-2: Vorbereiten der Abschirmhaube

Die Dichtung zwischen Targetmodul und feststehendem Flanschteil erfolgt mittels strahlungsresistenter Helicoflex-Dichtungen. Die hierfür erforderlichen hohen Klemmkräfte von insgesamt ca. 700 kN für die Flanschverbindung werden mit Hilfe einer Schnellklemmvorrichtung (Abb. 5.5-3) aufgebracht. Aufgrund der hohen Klemmkräfte und somit hohen Flächenpressungen an den Kontaktstellen zwischen Flansch und Klemmelementen beruht der Bewegungsablauf der Klemmverbindung ausschließlich auf Abwälzvorgängen. Gleitvorgänge unter hohen Flächenpressungen sowie der Einsatz von Schmierstoffen konnten so vermieden werden. Die Dichtkraft wird durch eine Dehnung des Zügelementes der Klemmverbindung um etwa 3 mm aufgebracht. Durch die hohe Dehnung erleidet diese Verbindung kaum Vorspannungsverluste aufgrund von Temperaturgradienten innerhalb der Flanschgeometrie, wie sie bei kurzzeitigem Aussetzen und Wiedereinsetzen des Protonenstrahls hervorgerufen werden. Zusätzlich wird die Flanschverbindung somit unanfällig für Maßtoleranzen. Im Gegensatz zu einer Verschraubung mit über 50 Einzelschrauben erlaubt diese Klemmvorrichtung das Öffnen und Schließen der Flanschverbindung innerhalb kurzer Zeit. Um trotzdem eine gleichmäßige Linienpressung der komplexen Dichtungsgeometrie zu gewährleisten, wurde eine hochsteife Flanschkonstruktion gewählt. Das vorbereitete neue Targetmodul ist jeweils mit neuen Dichtungen ausgestattet, so dass innerhalb der Heißen Zelle keine Dichtungen montiert und ausgerichtet werden müssen.

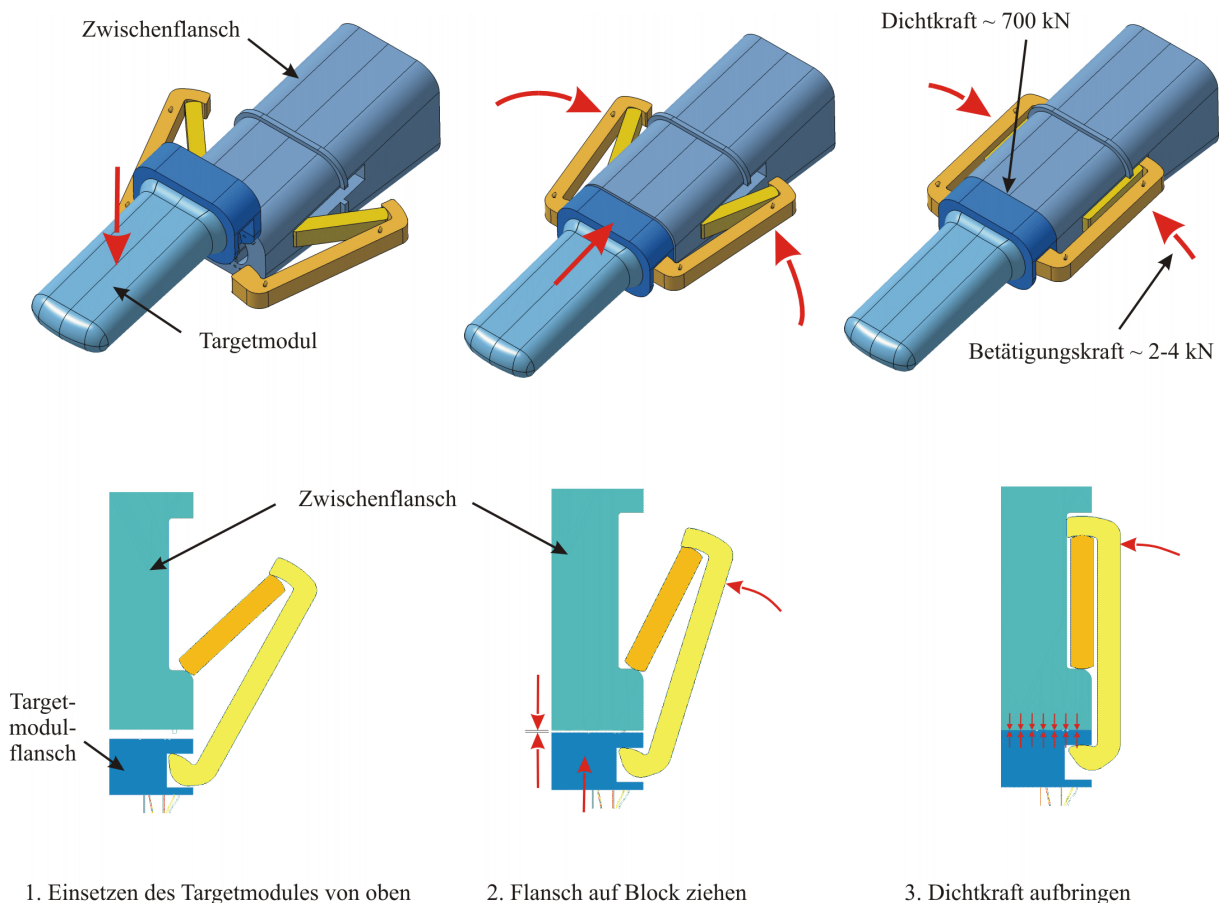


Abb.5.5-3 Schnellklemmverbindung des Targetmodules

Den Öffnen- und Schließvorgang der Schnellklemmverbindung übernimmt eine speziell dafür konzipierte Maschine (Abb. 5.5-4), die vor Aufsetzen der Abschirmhaube über das Targetmodul auf den Zwischenflansch aufgeschoben wird. Dabei gleiten die auf den äußeren

Klemmelementen befindlichen Nocken in eine entsprechende Nut der Handhabungsmaschine. Der Teil der Nut, in dem sich der hintere der beiden Nocken befindet, ist innerhalb der Maschine beweglich angeordnet. Wird dieser Teil der Nut nach außen bewegt (Abb. 5.5-5), so öffnet sich der Schnellklemmverschluss aus seiner Verknüpfung und rückt nach vollständiger Entlastung der Verbindung federbelastet das Targetmodul vom Zwischenflansch ab. In geöffneter Stellung entsteht so ein Spalt zwischen Targetmodul und Zwischenflansch von mehr als 20 mm, der ausreicht, um das Target nach oben aus der Verbindung zu entnehmen. Die Handhabungsmaschine verfügt zusätzlich über eine unterhalb der zu öffnenden Stelle angeordnete Wanne, die diese Stelle nahezu vollständig umschließt. Neben dem Auffangen von aus der Flanschverbindung eventuell austretenden Quecksilbertropfen werden über eine in die Wanne integrierte Entlüftung auch austretende Restquecksilberdämpfe abgesaugt.

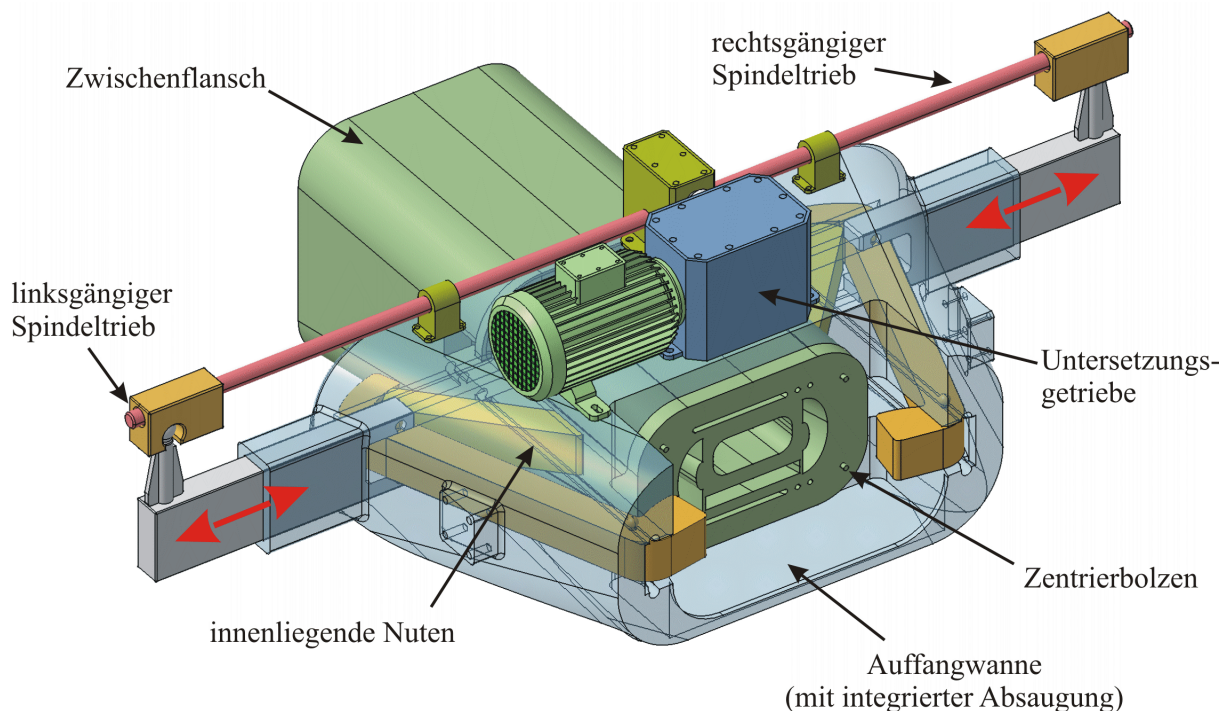
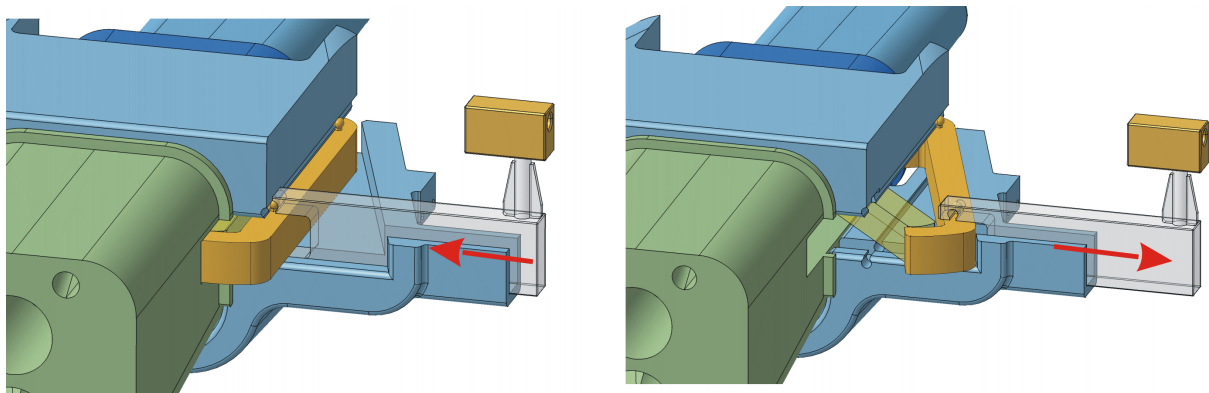


Abb.5.5-4: Handhabungsmaschine



Handhabungsmaschine in Position "Geschlossen"

Handhabungsmaschine in Position "Offen"

Abb.5.5-5: Funktionsweise der Handhabungsmaschine

Das Targetmodul ist an einem Zwischenflansch (Abb. 5.5-6) angebracht, welcher seinerseits lösbar mit der Kreislaufverrohrung auf dem Targetwagen verbunden ist. Dieser Zwischenflansch bietet zum einen die Möglichkeit des Austausches der Dichtungsgegenfläche, sollte diese bei einem Handhabungsvorgang beschädigt worden oder nach einer gewissen Anzahl von Wechsellvorgängen verschlissen sein. Zum anderen beinhaltet der Zwischenflansch die aufwändige Übergangsgeometrie von der einfachen Rohrströmung der Kreislaufverrohrung zum komplexen Anschlussbild des Targetmodules. Gleichzeitig ermöglicht der Austausch des Zwischenflansches einen Wechsel zu einer gänzlich anderen Targetbauform und bietet somit eine maximale Flexibilität bezüglich eventueller späterer Veränderungen.

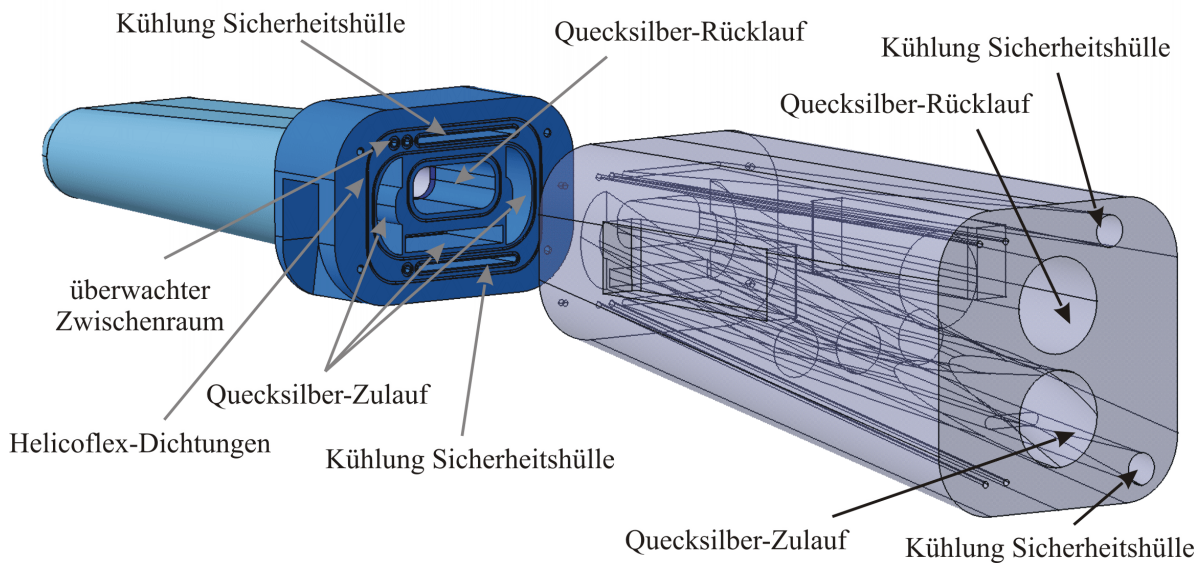


Abb. 5.5-6 Targetmodul und Zwischenflansch

Besonderes Augenmerk verdient die Kopplungsstelle für Fluide und Gase zwischen Targetwagen und Heiße Zelle, welche ein Verfahren des Targetwagens um bis zu 15 Meter zulassen muss. Die Entscheidung fiel hier auf die Verwendung von Vollmetall-Wellenschläuchen für die hochaktivierten Systeme, da sich diese problemlos für die geforderte Lastwechselzahl von weniger als 1000 Verfahrzyklen während der Lebenszeit der Anlage auslegen lassen und einen dichtungslosen Einschluss der Medien gewährleisten. Die hohe Aktivität, insbesondere des Kühlwassers für die Sicherheitshülle, verhindert eine Verwendung von elastomeren Dichtsystemen. Um trotz der Wellenschläuche eine Entleer- und Trockenbarkeit des beim Targetwechsel zu öffnenden Teiles des Kühlwasserkreislaufes für die Sicherheitshülle in einer akzeptablen Zeit zu erlauben, wurden die Absperrventile sowie die zur Trocknung notwendigen Versorgungsleitungen auf den Targetwagen verlegt (Abb. 5.1-9; Fließschema Targetwagen). Alle anderen Absperrventile für die Trocknungssysteme wasserführender Leitungen befinden sich dagegen in der im Keller gelegenen Kühlwasserzentrale.

Um den Austritt von Quecksilberdämpfen beim Targetwechsel und damit die Kontamination der Heißen Zelle zu minimieren, wird das Target nach Entleeren des Quecksilberkreislaufes auf Temperaturen nahe dem Siedepunkt des Quecksilbers ausgeheizt. Gleichzeitig werden die dabei entstehenden Quecksilberdämpfe durch Evakuieren des Kreislaufes abgesaugt. Zum Evakuieren wird dabei eine mit dem Quecksilber aus dem Ablasstank betriebene Wasser-

strahlpumpe eingesetzt, so dass die angesaugten Quecksilberdämpfe im kalten, flüssigen Quecksilber des Ablasstanks auskondensiert werden. Für den eigentlichen Öffnungsvorgang werden sowohl das Target als auch der Zwischenflansch auf Temperaturen von etwa 0°C abgekühlt. Um Kondensation und Ausfrieren von Luftfeuchtigkeit auf den abgekühlten Flächen zu vermeiden, muss die Atmosphäre der Heißen Zelle entsprechend trocken sein. Die Abkühlung erfolgt über Druckluft in einem an die jeweiligen Bauteile angesetzten Wirbelrohr (Abb. 5.5-7). Mittels Wirbelrohren lassen sich größere Kälteleistungen im kW-Bereich ohne Verwendung von bewegten Teilen oder innerhalb der Heißen Zelle problematisch einzusetzenden Fluiden realisieren.

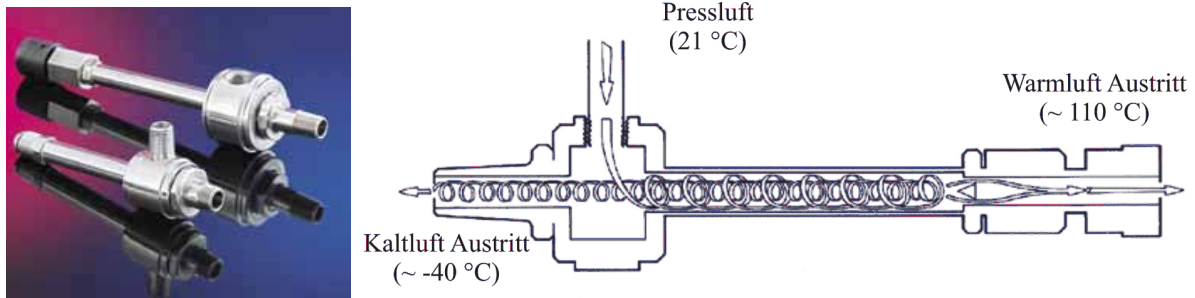


Abb. 5.5-7: Wirbelrohr zur Kälteerzeugung durch Druckluft /ARTX/

Bevor das Quecksilber in den im unteren Teil des Targetwagens integrierten Tank abgelassen wird, erfolgt ein Weiterbetrieb des Hauptkühlkreislauftes für einen Zeitraum von 12 h. Das zur passiven Abfuhr der Nachwärme im Quecksilber vorhandene Wassersystem ist dann in der Lage, die Temperaturen im Quecksilber sowie im Wasser während der vorgegebenen Handhabungsdauer von maximal 14 Tagen ohne aktive Kühlsysteme unterhalb von 100°C zu halten (Abb. 5.5-8).

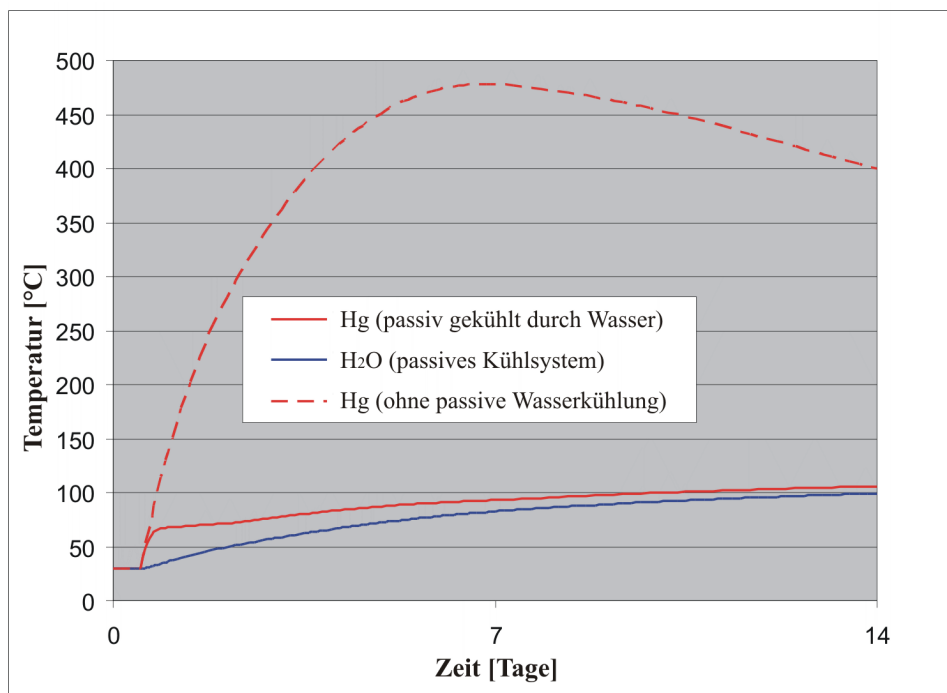


Abb. 5.5-8: Temperaturen des Quecksilbers im Ablasstank mit und ohne passive Nachwärmeabfuhr

Tabelle 5.5-4 listet die notwendigen Arbeitsschritte für den Handhabungsvorgang „Targetwechsel“ mit den zugehörigen Schätzzeiten für die Dauer der einzelnen Vorgänge auf. Da einige der Vorgänge parallel abgearbeitet werden können, ergibt sich die erforderliche Gesamtzeit für den Wechselvorgang anhand einer Ablaufplanung gemäß Abb. 5.5-9. Angenommen wurde hierbei ein 24-Stunden-Schichtbetrieb, der unter den gegebenen Randbedingungen rechtfertigbar scheint. Abb. 5.5-9 zeigt, dass ein Targetwechsel innerhalb der 14-tägigen Abschaltpause sicher durchführbar ist.

Tabelle 5.5-4: Vorgangssequenz beim Wechsel des Targets

Nr.	Vorgang	Bemerkung	Dauer
1	Strahlabschaltung	Beendigung der Neutronenproduktion	0 h
2	Gasaustausch innerer Liner und Entleeren der Moderatoren	Vorbereitung der Öffnung des inneren Liners zur Heißen Zelle	12 h
3	Weiterbetrieb des Hg- und Rückkühlkreislaufes	Aktive Abführung der Nachwärme im Hg für die ersten 12 Stunden	12 h
4	Vorbereitung des Luftkissentransportsystems	Inklusive Entnahme der mobilen Abschirmung unterhalb des Targetwagens	8 h
5	Ablassen des Hg in Ablassstank	Vorbereiten der Öffnung des Hg-Kreislaufes	4 h
6	Entleeren des auf dem Targetwagens befindlichen Teiles des Kühlwasserkreislaufes für die Sicherheitshülle	Vorbereiten der Öffnung des Rückkühlkreislaufes (Demontage Sicherheitshülle)	4 h
7	Trocknung des in (6) entleerten Teiles	Minimierung der Tritiumemission beim Öffnen	24 h
8	Verfahren des Targetwagens in Handhabungsposition	Abb. 5.5-1	4 h
9	Aufsetzen von Handhabungsmaschine und Abschirmhaube; Ausheizen	Ausheizen des Targets bei gleichzeitigem Evakuieren um Rest-Hg im Target zu minimieren	12 h
10	Abkühlen Targetmodul und Zwischenflansch	Abkühlen aller Strukturen in der Nähe der Öffnungsstelle, um den Austritt von Hg-Dämpfen während des Öffnungsvorganges zu minimieren	24 h
11	Kühl- und Abschirmhaube in Kran einhängen und Target-Schnellverbinder lösen	Zuvor Kreislauf mit Inertgas belüften	4 h
12	Targetmodul zusammen mit Kühl- und Abschirmhaube in Transportbehälter verbringen	Transportbehälter wird später über Dekontaminationszelle ausgeschleust	8 h
13	Ansetzen und Verriegeln eines neuen, vorbereiteten Targetmodules	Neues Targetmodul ist bereits mit neuen Dichtungen ausgestattet	4 h
14	Dichtigkeitstest (evakuieren)	Target und Sicherheitshülle	4 h
15	Dichtigkeitstest (6 bar Druckstandsprobe)	Target und Sicherheitshülle	24 h
16	Verfahren des Targetwagens in Betriebsposition	Wagen-Liner-Dichtung aktivieren	4 h
17	Entnahme des Luftkissentransportsystems	Inklusive Rückbau der mobilen Abschirmung unterhalb des Targetwagens	8 h
18	Wiederherstellen der Liner-Betriebsatmosphäre	Inklusive Liner-Dichtigkeitsprüfung	8 h
19	Betriebsbereitschaft Moderatoren herstellen		24 h

- Vermeidung der Verschleppung von Kontamination aus dem inneren Liner in Richtung des Oberen Handhabungsbereiches durch Sicherstellung einer gerichteten Luftströmung.
- Die Verrohrungen zwischen hoch strahlenbelastetem Bereich (Reflektor, gekühlte Abschirmung) und oberhalb der Abschirmung befindlichen Koppelstellen werden in Aluminium ausgeführt, um Rohrleitungsaktivierung durch verzögerte Neutronen im Kühlwasser zu minimieren. Ein Koppeln dieser Verbindung kann somit durch das Bedienpersonal händisch durchgeführt werden.
- Benutzung eines abgeschirmten Handhabungswagens (Abb. 5.5-12). Dieser deckt während des gesamten Handhabungsvorganges die Öffnung innerhalb der Targetabschirmung nach oben hin ab.
- Der Handhabungswagen fungiert nach dem Reflektorwechsel als abgeschirmte Abklingposition für den gebrauchten Reflektor, bevor dieser aus der Targetstation ausgeschleust wird.

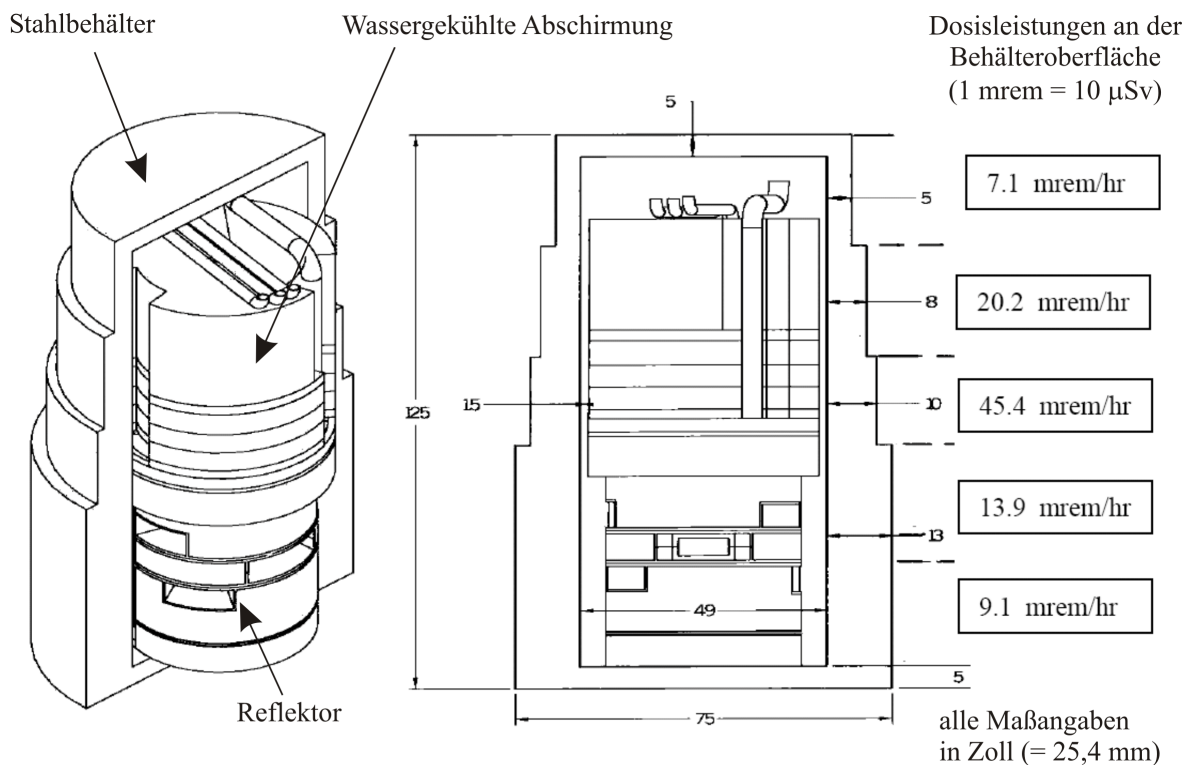


Abb. 5.5-10: Abschirmung der Transportflasche für den Reflektor der Spallationsquelle SNS /GAL 03a/

Abbildung 5.5-11 zeigt die in den Handhabungsvorgang des Reflektors involvierten Komponenten. Tabelle 5.5-4 listet für diese Komponenten die für die Handhabung relevanten Eigenschaften.

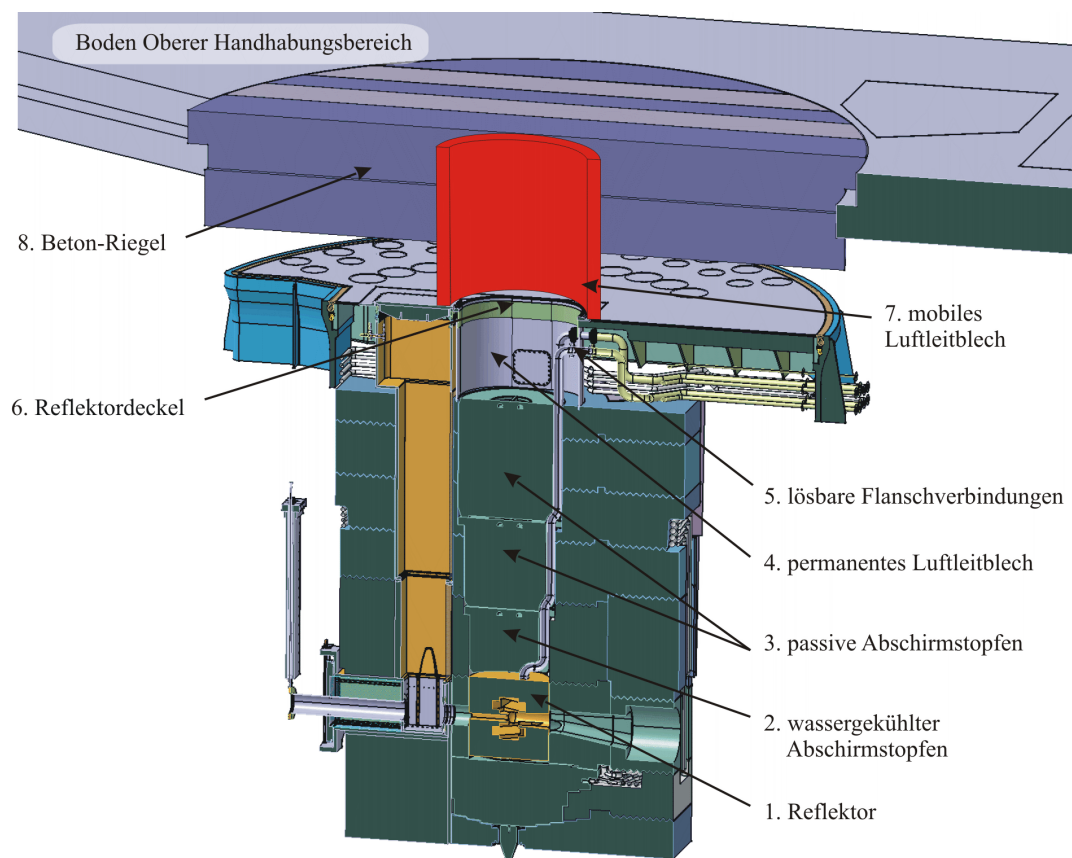


Abb. 5.5-11: Übersicht über alle Komponenten, die in den Wechsellvorgang des Reflektors involviert sind

Tabelle 5.5-5: Eigenschaften der am Reflektorwechsel beteiligten Komponenten

Nr.	Komponente	Eigenschaften / Besonderheiten
1	Reflektor	- Gewicht ~ 9 t / Abmessungen $\varnothing$ 1.2 m x 1.2 m / hohe Aktivierung - Komponente beinhaltet ca. 5,35 m vertikale Rohrleitung
2	wassergekühlter Abschirmstopfen	- Gewicht ~ 8 t / Abmessungen $\varnothing$ 1.36 m x 1 m / hohe Aktivierung - Komponente beinhaltet ca. 4,35 m vertikale Rohrleitung
3	passive Abschirmstopfen	Gewicht ~ 41 t / mittlere bis niedrige Aktivierung
4	permanentes Luftleitblech	- Rohreinsatz zwischen Top-Platte und innerer Abschirmung - Minimale Spalte verhindern unkontrollierte Luftbewegung beim Öffnen des Reflektordeckels in der Top-Platte
5	lösbare Flanschverbindung	einfache Flansche; ohne zusätzlichen Schutz zugänglich
6	Reflektordeckel in der Top-Platte	- doppelt gedichteter Deckel (Überwachung der Dichtigkeit) - kann von Hand geöffnet werden, nachdem Gasaustausch der Atmosphäre des inneren Liners stattgefunden hat
7	mobiles Luftleitblech	- deckt den Spalt zwischen Top-Platte und Unterkante des Handhabungswagens ab - minimale Spalte verhindern unkontrollierte Luftbewegung bei der Handhabung der einzelnen Komponenten - wird nur für den Handhabungsvorgang installiert
8	Beton-Riegel	- mittlere Riegel werden entnommen - restliche Riegel dienen als "Brücke" für den Handhabungswagen

Der Handhabungswagen (Abb. 5.5-12) ist mit je einer Aufnahmebucht für die obere passive Abschirmung, die untere wassergekühlte Abschirmung, den gebrauchten sowie den neuen Reflektor ausgestattet. Um eine Kontamination des Oberen Handhabungsbereiches zu vermeiden, sind die Aufnahmebuchten, wo notwendig, mit Schächten zur Aufnahme der an den Komponenten befestigten Rohrleitungssysteme ausgestattet. Zwischen den einzelnen Handhabungsschritten wird der Wagen nur jeweils um eine Position verfahren und verbleibt somit bis zum Wiedereinsetzen des obersten passiven Abschirmblockes über der Reflektoröffnung.

Der Wagen besteht aus einer Stahl-Tragstruktur, welche neben allen beweglichen Teilen auch die Auskleidung der Aufnahmebuchten für die zu handhabenden Komponenten beinhaltet. Diese Stahlstruktur ist zu Abschirmzwecken außen entweder mit Betonplatten belegt oder mit Beton vergossen. Der gesamte, im beladenen Zustand ca. 200 t wiegende Wagen wird mittels Luftkissensystemen über den ebenen Boden des Oberen Handhabungsbereiches verfahren. Beim Verfahren in Handhabungsposition dienen die Betonriegel des Abschirmblockes als Brücke (Abb. 5.5-13). Ein permanentes Luftleitblech unterhalb der Top-Platte sowie ein temporäres Luftleitblech zwischen Top-Platte und Unterkante des Handhabungswagens sorgen für die Einhaltung kleiner Spalte und somit für eine gezielte Luftführung in Richtung der inneren Abschirmung. Zu Aufrechterhaltung des Druckgefälles wird die Atmosphäre des inneren Liners kontinuierlich über geeignete Filter abgesaugt.

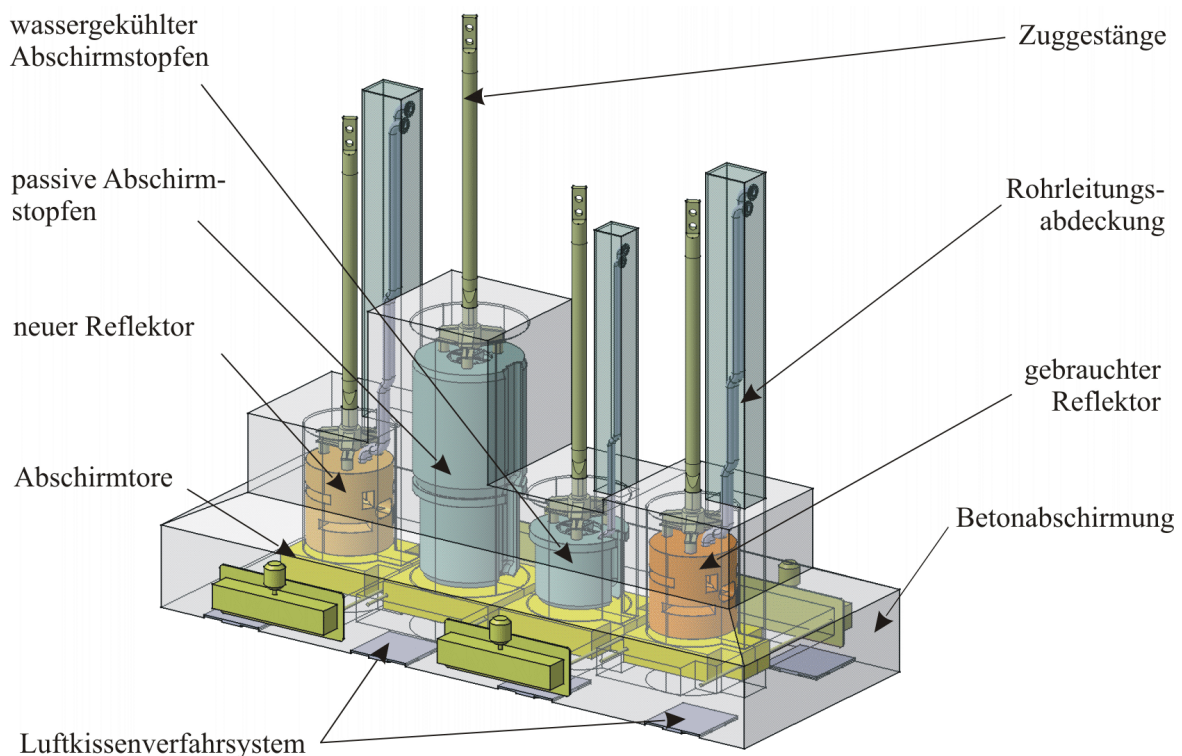


Abb. 5.5-12: Reflektor-Handhabungswagen

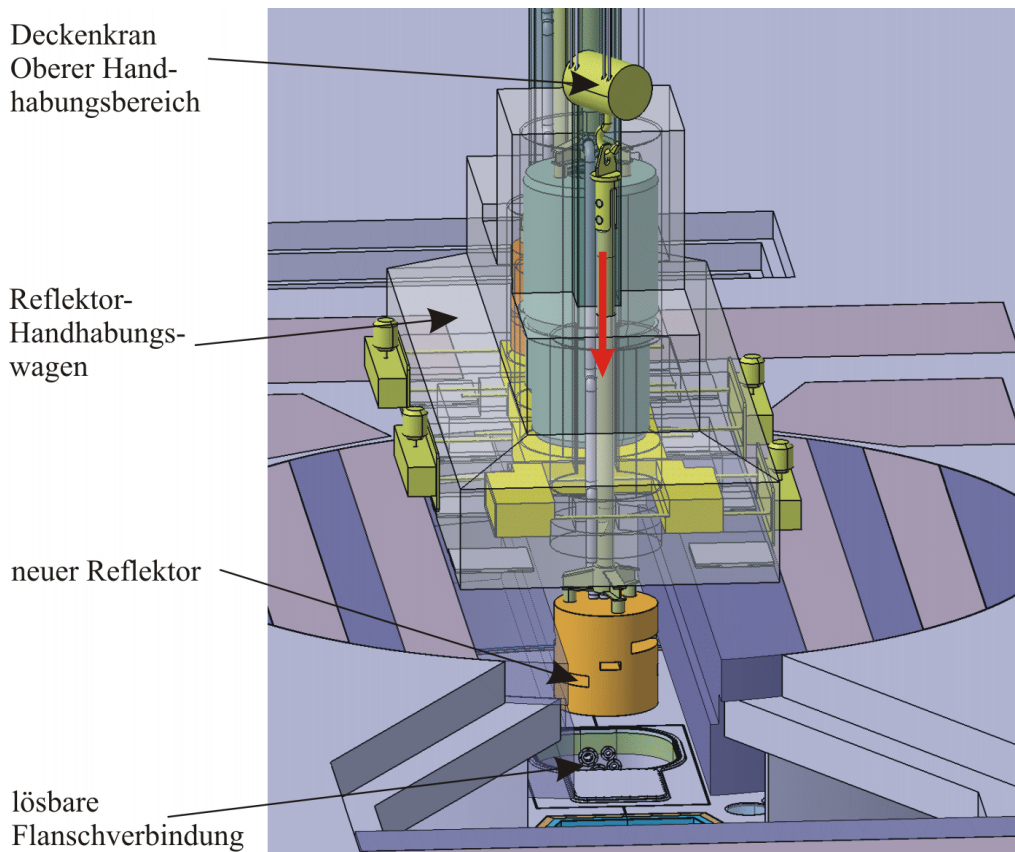


Abb. 5.5-13: Absenken des neuen Reflektors aus dem Handhabungswagen

5.5.4. Strahlverschlüsse und innere Strahlrohreinsätze

Die Grundphilosophie der Handhabung der Komponenten des Strahlverschlusssystems beruht darauf, dass alle Komponenten der Handhabungsgruppe II von oben durch entsprechende Öffnungen in der Top-Platte ohne Ausbau des Strahlverschlusselementes zugänglich sind. Für das Strahlverschlusssystem betrifft dies die Komponenten Antriebssystem, Arretierungsstift sowie dessen Antrieb und den inneren Strahlrohreinsatz (Abb. 5.5-14).

Nach Entnahme eines Teiles der, die Top-Platte abdeckenden Betonriegel, kann der in Frage kommende Flansch in der Top-Platte geöffnet werden. Zuvor ist, wie bei allen Eingriffen in die Atmosphäre des inneren Liners, ein Gasaustausch notwendig. Über einen leichten Unterdruck innerhalb des inneren Liners wird in Kombination mit dem unter jedem Flansch angeordneten Luftleitblech eine gerichtete Strömung vom Oberen Handhabungsbereich hin zum möglicherweise kontaminierten inneren Liner erzeugt und während des gesamten Handhabungsvorganges aufrecht erhalten.

Im Falle des Austausches eines Strahlrohreinsatzes (Abb. 5.5-15) wird zunächst der über diesem angeordnete Abschirmstopfen gezogen und an einer geeigneten Stelle innerhalb des Oberen Handhabungsbereiches abgesetzt. Sollte die Kontamination dieses Abschirmstopfens entgegen den Erwartungen zu hoch sein, kann dieser aus der Handhabungsflasche von oben in die Dekontaminationszelle abgelassen und dort für die Dauer des Handhabungsvorganges zwischengelagert werden.

Der Strahlverschlussantrieb hingegen bildet eine Einheit mit dem zugehörigen Abschirmstopfen. Bei einem Defekt an einem Strahlverschlussantrieb wird dieser als Ganzes in eine

Wechselflasche gezogen und durch einen neuen, vorbereiteten Antriebsstopfen ersetzt. Im Gegensatz zu den meisten anderen aktivierten Komponenten ist hier eine spätere Aufarbeitung bzw. Reparatur innerhalb oder außerhalb der Targetstation denkbar.

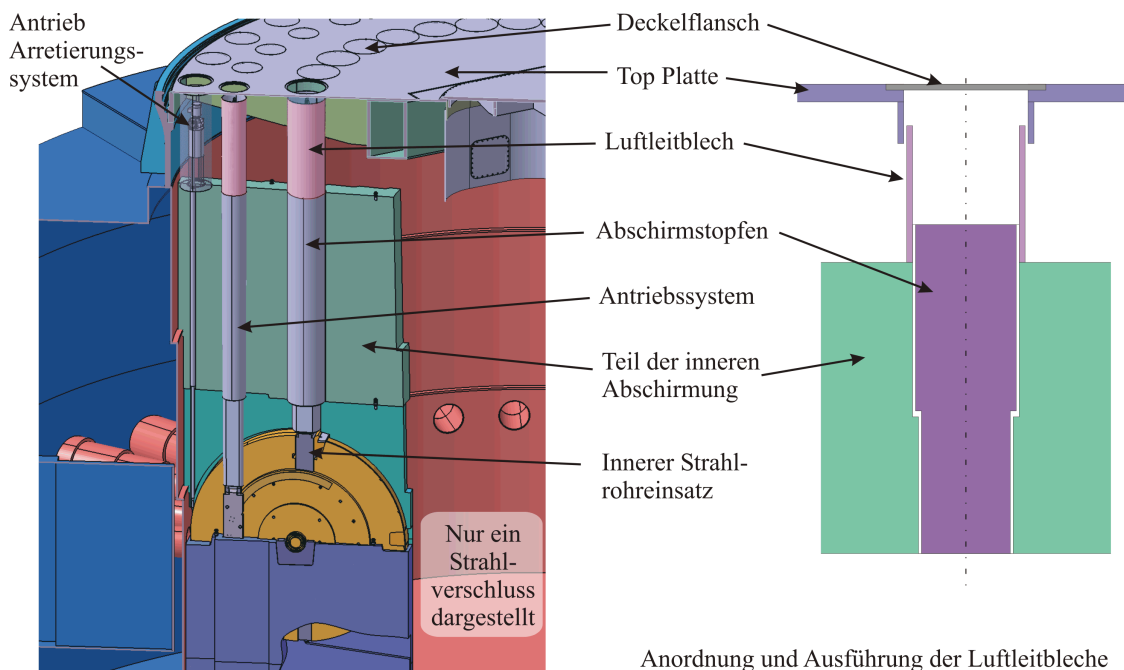


Abb. 5.5-14: Durch die Top-Platte zu handhabende Komponenten des Strahlverschlusssystems / Ausbildung der Luftleitbleche

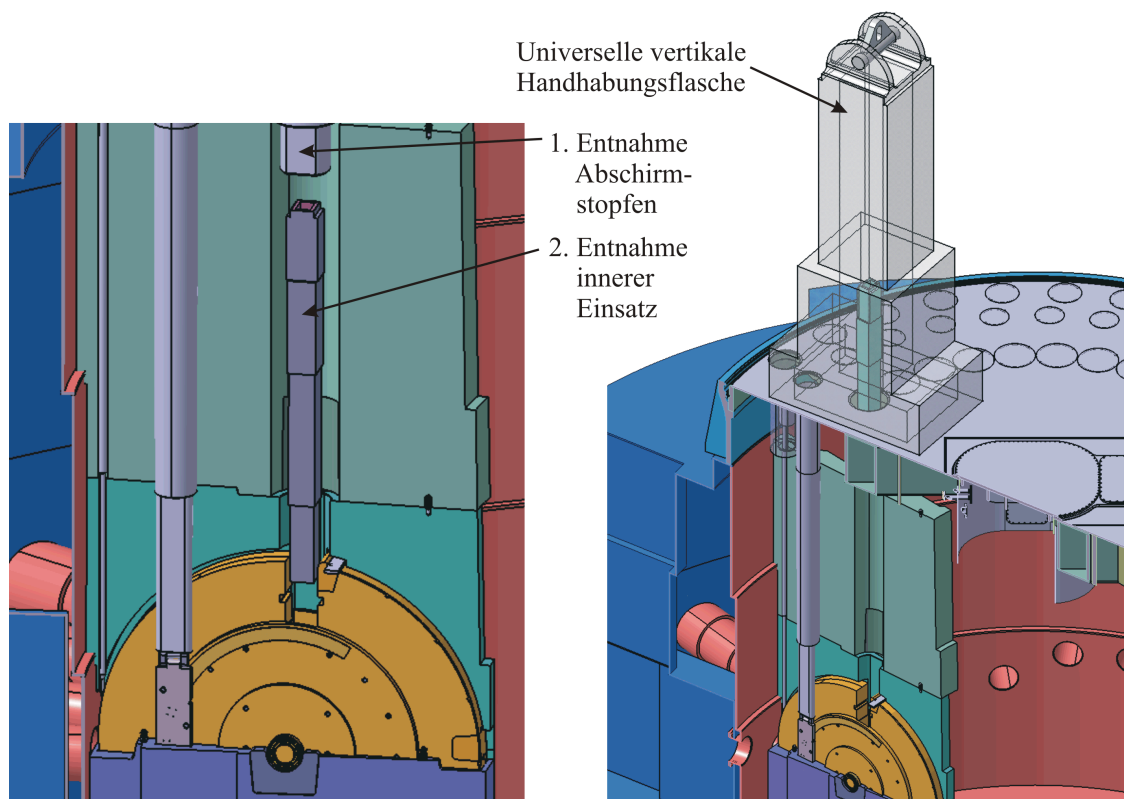


Abb. 5.5-15: Ausbau des inneren Strahlrohreinsatzes nach Entfernen des Abschirmstopfens

Der mögliche Ausfallgrund des Arretierungssystems beschränkt sich auf ein Versagen der Antriebseinheit. Diese ist ohne Verwendung eines speziellen Wechselflaschensystems durch die Öffnung in der Top-Platte frei zugänglich und kann per Hand unter Aufrechterhaltung einer gerichteten Luftströmung gewechselt oder repariert werden.

Für den extrem unwahrscheinlichen Fall eines Lagerschadens ist der Ausbau des Strahlverschlusselementes und somit der Top-Platte notwendig. Dieser Fall stellt eine größere Reparatur dar, daher soll hier nur die grundsätzliche Möglichkeit der Handhabung auch dieses Problems beschrieben werden. Die dazu notwendigen Werkzeuge werden mit hoher Wahrscheinlichkeit erst beim Auftreten eines solchen Falles angefertigt werden. Eine längere Stillstandzeit der Quelle kann trotzdem vermieden werden, wenn es gelingt, das Strahlverschlusselement in die sichere Stellung "Geschlossen" zu verfahren. Bis zur Reparatur ist gegen einen Weiterbetrieb mit nur 21 funktionsfähigen Strahlverschlüssen und somit nutzbaren Strahlrohren aus sicherheitstechnischer Sicht nichts einzuwenden.

Nach Entfernen der Betonriegel und der Top-Platte erfolgt die Handhabung sowohl der zu entnehmenden Abschirmblöcke als auch des Strahlverschlusselementes selbst mittels eines geeigneten Handhabungswagens (Abb. 5.5-16). Um diesen über dem defekten Strahlverschluss positionieren zu können, werden einige der zuvor abgenommenen Betonriegel als Brücke längs zur Neutronenstrahlachse des defekten Systems wieder eingesetzt. Da in diesem Falle die gesamte Top-Platte abgenommen werden muss, sind neben dem Abwarten einer geeignet langen Abklingzeit zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen vorzusehen. Dies kann zum Beispiel über Abdeckfolien oder den lokalen Aufbau eines Zeltes über der Öffnung realisiert werden. Trotzdem wird sich in einem solchen Falle eine leichte Kontamination, zumindest kleinerer Teile des Oberen Handhabungsbereiches, nicht vermeiden lassen.

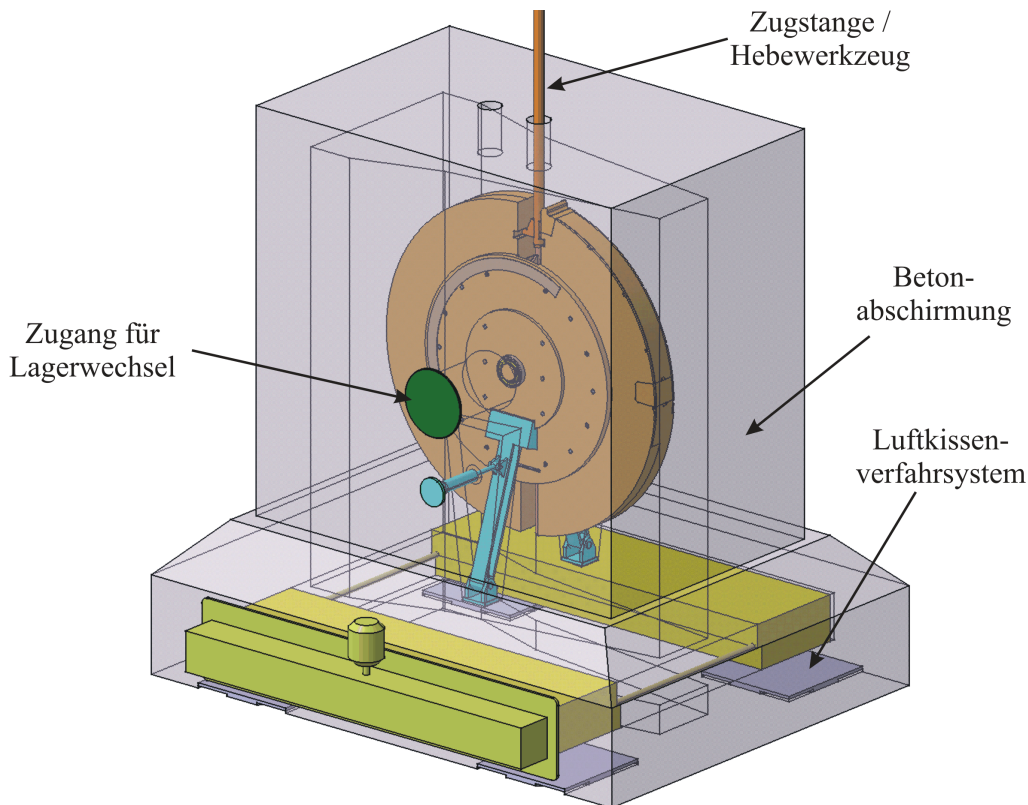


Abb. 5.5-16: Strahlverschluss-Handhabungswagen

Während die entnommenen Abschirmblöcke in der Dekontaminationszelle zwischengelagert werden müssen, verbleibt das Strahlverschlusselement im Handhabungswagen und wird dort geeignet fixiert. Durch seitliche Zugänge können dann die defekten Lager gegen neue ausgetauscht werden. Um das Strahlverschlusselement wieder in seine Position auf dem Strahlverschlussockel absetzen zu können, wird eine Zentrierhilfe in den Aufnahmekanal für den Strahlrohreinsetz eingeführt. Diese Zentrierhilfe verhindert eine Drehbewegung des Strahlverschlusselementes, die es aufgrund seiner konstruktiv bedingten Unwucht ausführen würde, sobald das Absenkwerkzeug zurückgezogen wird. Würde sich das Strahlverschlusselement frei drehen können, würde es aufgrund seiner Unwucht eine Stellung einnehmen, die ein Aufsetzen der Strahlverschlussabdeckung mit dem darin integrierten mechanischen Endanschlag verhindert.

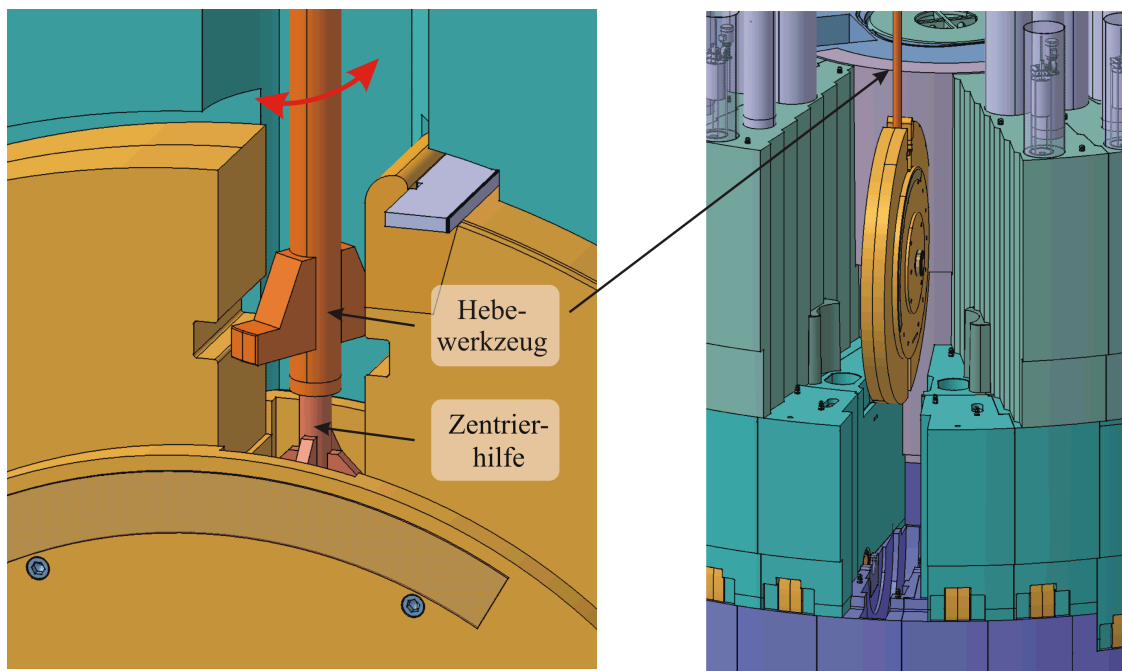


Abb. 5.5-17: Einbau des Strahlverschlusselementes nach Lagerwechsel

5.5.5. Protonenstrahlfenster

Das eigentliche Strahlfenster ist zusammen mit einer optischen Strahldiagnostik zur Vermessung und Korrektur der Protonenstrahllage in einem Modul integriert. Neben dem Fenster enthält dieses Modul auch eine lokale, über das Kühlwasser des Fensters versorgte, gekühlte Abschirmung. Dies ist erforderlich, da die im Fenstermaterial erzeugte Sekundärstrahlung zu einer nicht unerheblichen Wärmedeposition in den benachbarten Strukturen führt. Die Strahldiagnose beruht auf der Messung des durch den Protonenstrahl im Restgas des Strahlführungsvakuums (10^{-5} mbar) erzeugten Lumineszenzeffekt. Die Auswertung des ausgestrahlte Lichtes erfolgt über Photomultiplier, welche sich aus Gründen der Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung in dem über dem Modul befindlichen Abschirmblock befinden. Das zu messende Licht wird über ein Quarzglasfenster sowie ein Spiegelsystem mit integriertem Kollimator aus dem Vakuum ausgekoppelt. Hierdurch wird eine optische Messung bei minimaler Abschwächung der Abschirmung erreicht. Abbildung 5.5-18 zeigt das Protonenstrahlfenstermodul sowie den darüber liegenden Abschirmblock mit Spiegelsystem.

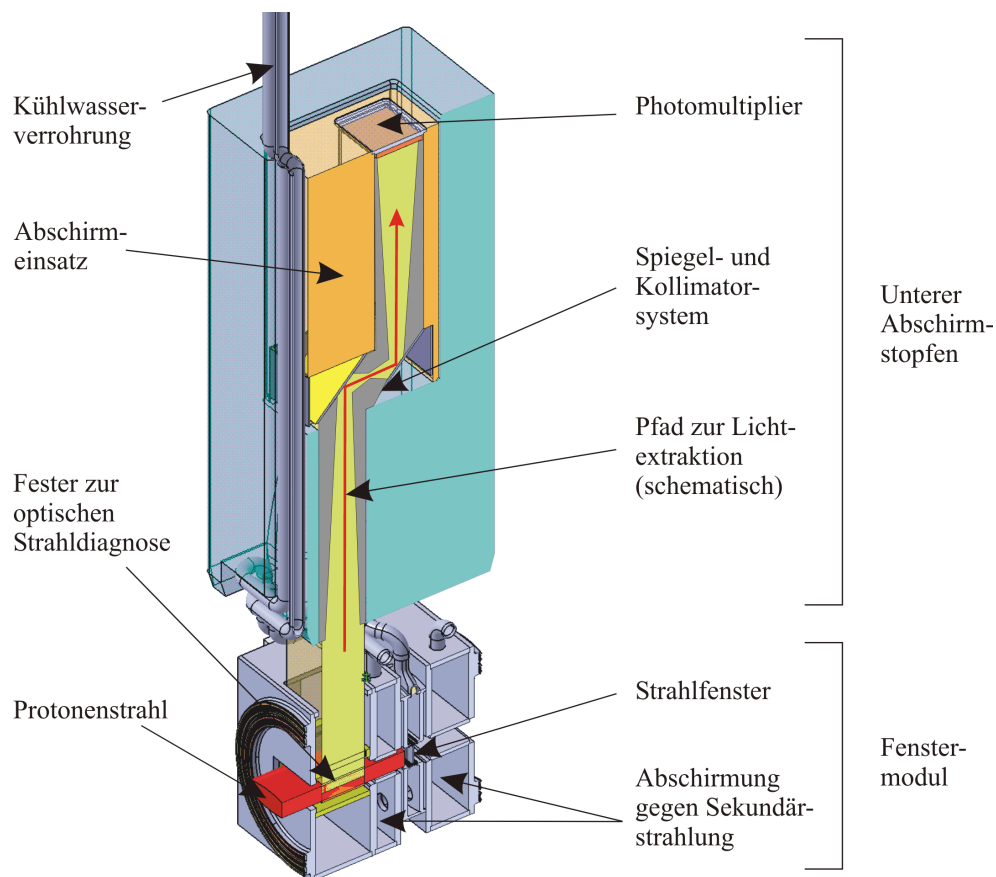


Abb. 5.5-18: Protonenstrahlfenstermodul und darüber liegender Abschirmblock mit integrierter Strahldiagnostik

Das Fenstermodul ist mit aufblasbaren Metalledichtungen ähnlich denen an der Targetwagen-Liner-Dichtlinie ausgestattet. Diese Dichtungen sind nur bedingt tauglich, die hohen Vakuumanforderungen von etwa 10^{-5} mbar innerhalb der Protonenstrahlführung zu erfüllen. Daher wird das Protonenstrahlfenstermodul in einen Schacht eingebaut, der oben dicht an der Top-Platte abschließt und dynamisch auf ein grobes Vorvakuum abgepumpt wird. Um eine Austauschbarkeit der Dichtungsgegenfläche für den Fall der Beschädigung zu gewährleisten, dichtet das Modul nicht gegen die Schachtwand sondern innerhalb einer horizontal austauschbaren Aufnahmebox, die ihrerseits wiederum innerhalb des Schachtes gedichtet ist. Abbildung 5.5-19 zeigt einen Schnitt durch das Modul, die Aufnahmebox und den Schacht. Die Handhabung des Modules erfolgt mittels der für die Handhabung der Kollimatoren, des Strahlfängers und der Strahlverschlusskomponenten ohnehin vorhandenen universellen, vertikalen Handhabungsflasche. Während der Wechsel des Protonenstrahlfenstermodules regelmäßig vorgenommen wird, fällt der Wechsel der Aufnahmebox in die Handhabungsgruppe III (Reparatur). Für diesen Fall müssen Teile der Strahlführung demontiert werden, um einen horizontalen Zugang für den Austausch der Box zu schaffen. Abbildung 5.5-20 zeigt die Demontagesituation der Aufnahmebox.

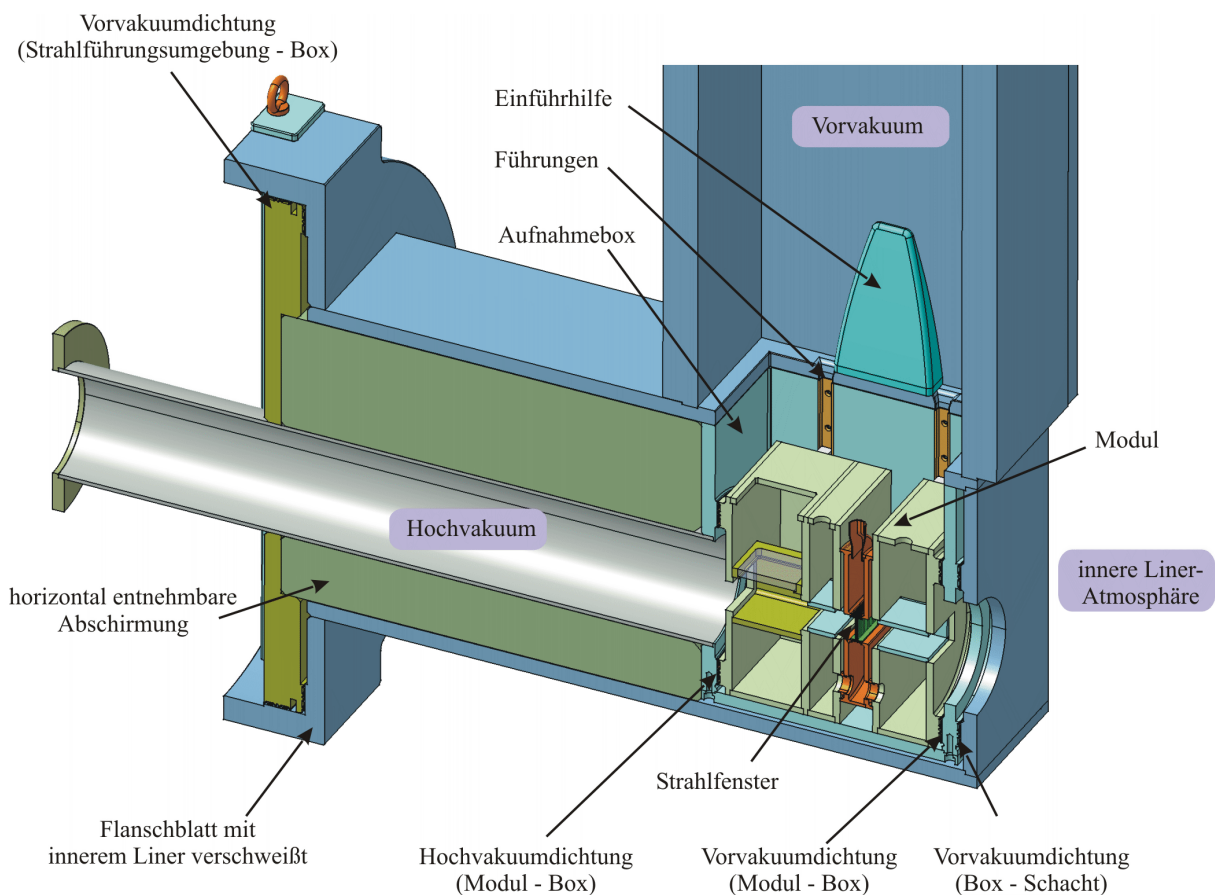


Abb. 5.5-19: Dichtsystem Protonenstrahlfenstermodul und austauschbare Aufnahmebox

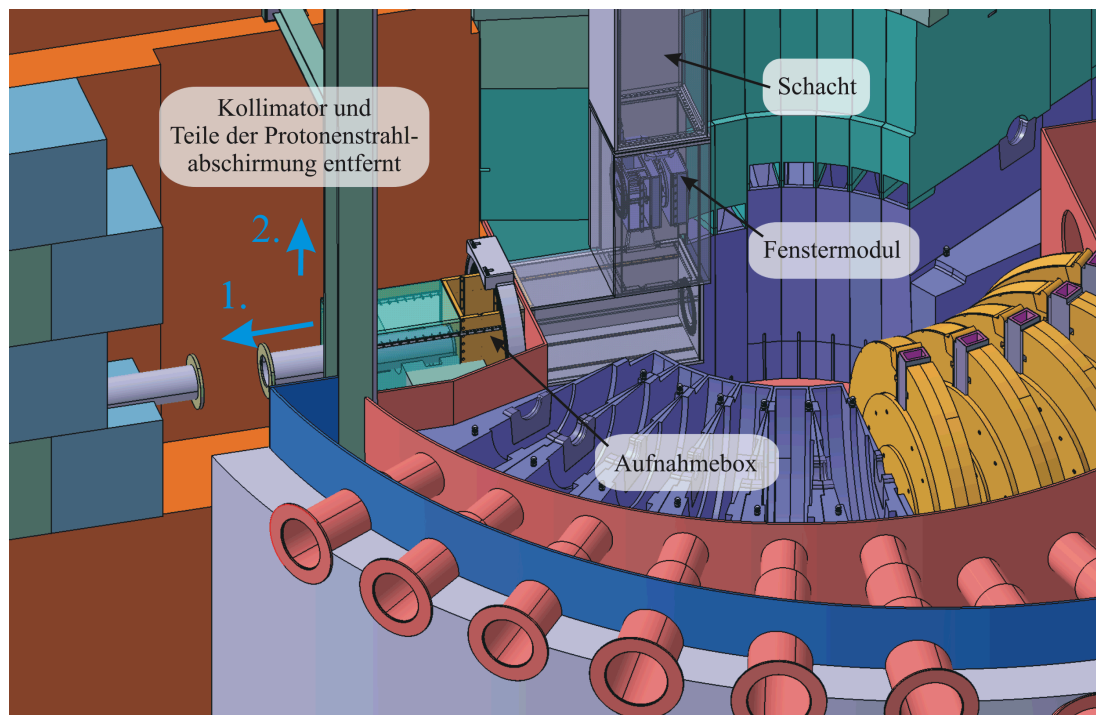


Abb. 5.5-20: Ausbau Aufnahmebox

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der hier vorgestellten Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Targetumgebung für ein Hochleistungsquecksilbertarget mit 5 MW-Strahlleistung sowohl sicherheitstechnisch als auch wirtschaftlich sinnvoll realisierbar ist. Durch den Einsatz kostengünstigen Abschirmmaterials ist es möglich, die in der Strahlenschutzverordnung vorgegebenen Dosisleistungen nicht nur einzuhalten sondern wirtschaftlich vertretbar signifikant zu unterschreiten. Aufgrund des hohen, radiotoxischen Inventars ist im Vergleich zu bestehenden Spallationsquellen ein aufwendigeres Einschlusskonzept erforderlich. Es konnte gezeigt werden, dass eine ausreichende Anzahl an Rückhaltebarrieren besteht und somit eine Grundlage für den sicheren Betrieb der Anlage unter allen denkbaren Umständen gewährleistet ist. Aufgrund der in dieser Arbeit gewählten Konzepte für die technische Umsetzung des Einschlusskonzeptes ist eine Handhabung aller innerhalb der Einschlüsse befindlichen Komponenten mit vertretbarem Aufwand möglich.

Für die kritischste Komponente des Einschlussystems, das hoch strahlenbelastete Protonenstrahlfenster, wurde eine Lösung gefunden, die eine vertretbare Standzeit erwarten lässt sowie ausreichende Reserven für eventuelle Leistungserhöhung zur Verfügung stellt. Durch den Einsatz einer neuartigen, hermetisch dichten Quecksilberpumpe konnte der Einschluss des hoch aktivierten und im betriebswarmen Zustand hochflüchtigen Quecksilbers ohne typischerweise anfällige, bewegliche Dichtsysteme ausgeführt werden. Die bei dem regelmäßig durchzuführenden Wechsellvorgang des Targetbehälters austretende Menge an Quecksilber kann durch die hier aufgezeigte Handhabungsprozedur sowie die konstruktive Auslegung der Handhabungshilfsmittel auf ein Minimum begrenzt werden. Durch den Einsatz von kombinierten Rekombinations- und Expansionsbehältern wird ebenfalls die Emission von Tritium aus den Kühlwasserkreisläufen minimiert, wenn nicht sogar gänzlich unterbunden.

Es wird ein Konzept für die Strahlverschlüsse dargelegt, das einen Strahlrohrwinkelabstand von nur 11° zulässt und gleichzeitig die Dreiteilung des innerhalb des Abschirmblockes liegenden Teiles der Neutronenleiter mit allen negativen Konsequenzen für deren Handhabung vermeidet. Durch die Verwendung von Drehverschlüssen wird eine im Vergleich zu den sonst üblichen Hubverschlüssen wesentlich geringere, lokale Abschwächung der Targetabschirmung erreicht. Alle Komponenten des Strahlverschlusssystems sind entweder auf die Lebensdauer der Anlage auslegbar oder aber im Versagensfall einfach auszutauschen bzw. redundant ausgelegt. Für die Positionierung der innerhalb der Abschirmung liegenden Neutronenstrahleinsätze wird eine Lösung aufgezeigt die es ermöglicht, die hohen geforderten Genauigkeiten zu erreichen ohne entsprechende Toleranzanforderungen an die großen und schweren Komponenten der Abschirmung sowie des Strahlverschlusssystems zu stellen.

Trotzdem hat die hier vorgelegte Arbeit aufgezeigt, dass der Handhabungsaufwand beim Betrieb einer Spallationsquelle dieser Leistungsklasse mit einer feststehenden Targethülle und einer hohen Anzahl von Strukturmaterialien in direkter Targetnähe beträchtlich ist. Trotz der Optimierung der Handhabungsvorgänge sowie einer möglichst handhabungsgerechten Konstruktion der Systeme bleibt die Notwendigkeit eines mehrfach jährlichen Wechsels des Targetmodules sowie eine nur 3-jährige Standzeit des Reflektors. Während das Grundkonzept der geplanten Spallationsquelle ESS durch die hier gezeigten technischen Konzeptlösungen umsetzbar erscheint, wird für die Targetumgebung von zukünftigen Spallationsquellen oberhalb 10 MW-Strahlleistung ein gänzlich anderes Grundkonzept notwendig sein.

Möglich wird dies z.B. durch die Verwendung eines kombinierten Target-Reflektor-Pools, bei dem sowohl das Target als auch der Reflektor aus flüssigem Blei bzw. Blei-Wismut bestehen. Die Unterscheidung zwischen Target und Reflektor ergibt sich dabei lediglich durch die funktionalen Bereiche innerhalb des Pools. Ein trennendes Strukturmaterial ist nicht notwendig. Der Strahleinschuss erfolgt von oben in den Mittelpunkt der Poolanordnung über ein mit Gasdruck beaufschlagtes, auswechselbares Tauchrohr, mit dessen Hilfe ein Einschusskanal im Flüssigmetall erzeugt wird. Die atmosphärische Trennung von Beschleuniger-vakuum und Gasdruck im Tauchrohr kann auch für höhere Strahlleistungen mittels des in dieser Arbeit vorgestellten Protonenstrahlfensters außerhalb der Poolanordnung realisiert werden. Bei einem Defekt des Tauchrohres kommt es lediglich zu einer Anhebung des Flüssigmetallspiegels. Dies ist sowohl leicht zu detektieren als auch sicherheitstechnisch unbedenklich.

Alle in unmittelbarer Targetnähe benötigten Komponenten würden als auswechselbare Einschübe ausgebildet, welche von der oben gelegenen Heißen Zelle aus fernbedient handhabbar sind. Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes liegt in der völligen Abstinenz von Kühlwasser in der unmittelbaren Nähe des Targets und somit einer extrem reduzierten Tritiumproduktionsrate. Zudem ist das hochaktivierte Target-/Reflektormaterial bei Raumtemperatur fest und kann somit, bei einem unterstellten katastrophalen Störfall, als weitgehend nicht flüchtig angesehen werden. Zur technischen Umsetzung eines solchen Konzeptes wären jedoch noch weitere, umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig.

7. Literaturverzeichnis

- /ANS 88/ C. D. West, *The U.S. Advanced Neutron Source*, ICANS X, United States, Los Alamos National Laboratory and Argonne National Laboratory, October 3 - 7, 1988, p.643
- /ARS 96/ P. Arsenault et al., *Stainless Steel Coatings for Corrosion Protection of Steel Rebars*, Thermal Spray: Practical Solutions for Engineer Problems, Proceeding of the 9th National Thermal Spray Conference, 7-11 October 1996, Cincinnati, Ohio, USA, ISBN: 0-87170-583-4
- /ARTX/ ARTX Ltd., 1770 West Lexington St., Cincinnati, Ohio 45212, USA, (<http://www.artxltd.com>)
- /BAR 93/ W. Bartknecht, *Explosionsschutz – Grundlagen und Anwendungen*, Springer Verlag, 1993, ISBN 3540554645
- /BAR 01/ J. Bartonicek, *Lebensdauermanagement mechanischer Bauteile*, Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar, Neckarwestheim, 27. MPA-Seminar, 4. und 5. Oktober 2001
- /BAU 86/ G.S. Bauer, *Neutron Sources - Their Prospects and Their Problems*, Kernforschungsanlage Jülich, FRG, ICANS IX, 22.- 26.09.1986, S.141ff
- /BAU 98a/ G S. Bauer, *SINQ as of 1998 (Status Report)*, 14. Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Starved Rock Lodge, Utica, Ill., USA, June 14-19, 1998
- /BAU 98b/ G.S. Bauer, *Operation Experience and Development Projects at SINQ (Part I)*, PSI Bericht Nr. 98-04, April 1998
- /BAU 98c/ G.S. Bauer, *Operation and development of the new spallation neutron source SINQ at the Paul Scherrer Institut*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 139 (1998), S. 65-71
- /BAW 01/ H. Barnert-Wiemer, *Conceptual Design of a Cold Methane Moderator System for the European Spallation Source (ESS)*, Berichte des Forschungszentrums Jülich, Jül-3967, ISSN 0944-2952
- /BEL 93/ A. Beljakov et al., *First experience of cold moderator operation and solid methane irradiation at the IBR-2 pulsed reactor*, Abingdon, Oxfordshire, U.K, ICANS XII, 24.-28. Mai 1993
- /BIR 91/ A. Birolini, *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*, Springer Verlag, 1991, ISBN 3-540-54067-9
- /BRO 93/ T.A. Broome, *Operational Consequences of Induced Activity on the ISIS Target Station*, Abingdon, Oxfordshire, U.K, ICANS XII, 24.-28. Mai 1993, S. T20-T25
- /BRO 01/ mündlich T.A. Broome
- /BUT 02/ M. Butzek, *New Layout of ESS Target Shielding*, 4th International Workshop on Mercury Target Development; Jülich, July 12. - 16. 2002

- /BUT 03a/ M. Butzek et al., *Mercury pump using rotating permanent magnets*, 11th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, April 20-23, 2003
- /BUT 03b/ M. Butzek, R. Hanslik, T. Kulesa, M. Lüdeke, A. Müller, J. Bajus, U. Quade, *Layout of the ESS Target Shielding*, ICONE 11, April 20-23, 2003, Tokyo, Japan
- /BUT 03c/ M. Butzek, J. Bajus, R. Hanslik, T. Kulesa, M. Lüdeke, A. Müller, *ESS Target Station Overall Layout*, Report ESS 03-145-T, December 2003
- /BUT 03d/ M. Butzek, T. Kulesa, J. Wolters, *Proton Beam Window for High Current Densities*, Report ESS 03-147-T, December 2003
- /CAR 81/ J. M. Carpenter, *Status of Argonne's Intense Pulsed Neutron Source IPNS-I*, ICANS-V, Proceedings of the 5th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Jülich, June 22 - 26, 1981
- /CER 82/ P. Beynel, P. Maier, H. Schönbacher, *Compilation of Radiation Damage Test Data*, CERN 82-10 Health and Safety Department, 4 November 1982
- /CHE 03/ J. Chen et al., *Summary of the results from post-irradiation examination of spent targets at the FZ-Juelich*, Journal of Nuclear Materials, Vol. 318, 2003, S. 56–69
- /DES 88/ *Design Guides for Radioactive Material Handling Facilities & Equipment*, Compiled by D.R. Doman, Design Guides Committee Chairman, American Nuclear Society, 1988 (ANS order number 690014)
- /DOE 97/ Department of Energy, Office of Energy Research: *Department of Energy Review of the National Spallation Neutron Source Project*, DOE/ER-0705, Juni 1997
- /EAT 86/ G. H. Eaton, T.A. Broome, M.J. Bly, *Activation of the heavy water coolant of the ISIS target*, Kernforschungsanlage Jülich, FRG, ICANS IX, 22.-26.09.1986, S. 245ff
- /ES1 97/ *ESS - A Next Generation Neutron Source for Europe: Volume I – The European Spallation Source*, ISBN 090 237 6 6500, März 1997
- /ES3 97/ *ESS - A Next Generation Neutron Source for Europe: Volume III: The Technical Study*, ISBN 090 237 6 6500, März 1997
- /ES3 02/ *The ESS Project, Volume III, Technical Report*, 2002, ISBN 3-89366-303-3
- /FIL 92/ D. Filges, *Moderne Monte Carlo Teilchentransport-Simulationsverfahren für sicherheitstechnische Anwendungen und Fragestellungen in der Beschleunigertechnik und in der Raumfahrt*, ISSN 0366-0885, Report Jül-2609, FZ Jülich, 1992
- /FIL 95/ D. Filges, R. D. Neef and H. Schaal, *Nuclear Studies of Different Target Systems for the European Spallation Source (ESS)*, ICANS-XIII, Report PSI-Proc., 95-02, Vol. 2, S. 537ff, (1995)
- /FIL 96/ D. Filges et. al., *Damage Studies for Structure- and Beam Window Materials for the ESS Mercury Target*, ESS-Report ESS 96-52T, 1996

- /FIL 00/ D. Filges et. al., *Radiation Shielding and Protection of the European Spallation Neutron Source (ESS)*, J. Nuclear Science and Technology, Supp. 1, S. 30-34, (March 2000)
- /FIL 03/ D. Filges, F. Goldenbaum, B. Lensing, K. Nünighoff, Ch. Pohl, H.Schaal, G. Sterzenbach, *Determination of Radioactivity, Energy Deposition and Radiation Damage in the TMR Components of ESS*, ICANS-XVI, May 12 – 15, 2003 Düsseldorf-Neuss, Germany
- /FIN 90/ J. L. Finney, *ISIS Status Report*, ICANS-XI, 11th International Collaboration on Advanced Neutron Sources, KEK, Tsukuba October 22-26, 1990
- /FUJ 02/ H. Fujimori et. al., *High Intensity Proton Accelerator Facility Accelerator Technical Design Report*, 2NBT 2002-01a, 15.Januar 2002
- /GAL 03/ mündl. F. Gallmeier, SNS-Projekt, ORNL, Oak Ridge, USA, 2003
- /GAL 03a/ F. Gallmeier, I. Remec, *The Radiation Environment for the Change-out Scenarios of the SNS Inner Plug and the Proton Beam Window Insert*, AccApp'03, June 01 – 05, 2003, San Diego, USA
- /GAR 76/ D.I. Garber and R.R. Kinsey, *Neutron Cross Sections Volume II*, Curves, National Neutron Cross section Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, January 1976
- /GAS 02/ *Assessment on Neutron Spallation Sources for Fusion R&D*, prepared by the Fusion Materials Irradiation Device Group (M. Gasparotto, chairman) of the European Fusion Development Agreement, EFDA Report T-RE-5.0, Sept. 2002
- /GRA 86/ D. A .Gray, *Status Report on ISIS, The Spallation Neutron Source at RAL*, 9th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Villigen, Schweiz, September 22 - 26, 1986
- /HAF 03/ B. Haff, *Optimierung der Neutronenstromdichten komplexer Target-Moderator-Reflektor-Anordnungen einer Spallationsneutronenquelle der nächsten Generation*, Eingereichte Dissertation, noch nicht veröffentlicht, Bergische Universität Wuppertal, November 2003
- /HEY 98/ H. Heyck, B. Amrein, G.S. Bauer, K. Geissmann, *Lessons learned from the First 500 mAh of Beam on SINQ*, ICANS-XIV, 14th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Starved Rock Lodge, Utica Ill., USA, S. 374ff (1998)
- /ICRP 91/ International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Report No. 60, 1991
- /IKE 03/ Y. Ikeda, *IMW Pulse Spallation Neutron Source (JSNS) under The High Intensity Proton Accelerator Project*, ICANS-XVI, 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Düsseldorf-Neuss, Germany, May 12 – 15, 2003
- /INO 79/ K. Inoue et al., Atomic Energy Soc. Japan, 21 (1979), S 865

- /KIN 03/ H. Kinoshita, M. Kaminaga, K. Haga, R. Hino, *Mercury Erosion Experiments for Spallation Target System*, ICONE 11, April 20-23, 2003, paper no. 36079
- /KLO 80/ W. Klose, H. Stiller, *The status of the German spallation source project (SNQ)*, 4th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, KEK, Tsukuba, October 20-24, 1980
- /KNE 02/ J.U. Knebel, *Auslegung eines geschlossenen 4 MW-Targetmoduls mit Wärmeabfuhrsystem für eine ADS-Anordnung*, FZKA 6687, Forschungszentrum Karlsruhe (2002)
- /KOP 00/ I. Koprivnikar, E. Schachinger, *Deep Penetration Monte Carlo Calculations for the European Spallation Source ESS*, International Conference on Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications (MC-2000), 23-26 October, 2000, Lisbon, Portugal
- /KOP 02/ I. Koprivnikar, E. Schachinger, *The Biological Shield of a Hoch 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
- /KRI 98/ H. Krieger, *Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz*, Band 1 Grundlagen, B.G. Teubner Stuttgart, 1998, (ISBN 3-519-33052-0)
- /LIL 99/ R. Scott Lillard, Darryl P. Butt, *A Method for Measuring the Corrosion Rate of Materials in Spallation Neutron Source Target/Blanket Cooling Loops*, Materials Characterization, 43 (1999), S. 135-145
- /MEZ 02/ F. Mezei, *General instrumentation issues: beam extraction news*, TMT Meeting n°4, 6 February 2002, Jülich
- /MOL 91/ J. Moll, *Die Bereitstellung computergestützter Methoden zur Analyse der Strahlungssituation an Teilchenbeschleunigern und deren exemplarische Anwendung auf das Cooler-Synchrotron COSY*, ISSN 0366-0885, Report Jül-2435, FZ Jülich, 1991
- /MÜN 83/ Erwin Münch, *Tatsachen über Kernenergie*, Energiewirtschaft- und Technik- Verlagsgesellschaft, 1983, ISBN 3-7736-0351-7
- /NAK 00/ T. Nakamura, *Overview of Radiation Shielding Research*, J. Nuclear Science and Technology, Supp. 1, S. 27-29, (March 2000)
- /ORNL 97/ *National Spallation Neutron Source - Executive Summary*, Oak Ridge National Laboratory, May 1997
- /PAT 73/ H. Wade Patterson and Ralph H. Thomas, *Accelerator Health Physics*, Academic Press New York and London, 1973
- /PAW 01/ S.J. Pawel, J.R. DiStefano, E.T. Mannes Schmidt, *Thermal gradient mass transfer of type 316L stainless steel and alloy 718 in flowing mercury*, Journal of Nuclear Materials 296 (2001), S. 210-218
- /PSA 00/ *Preliminary Safety Analysis Report*, Westinghouse Safety Management Solutions LLC (WSMS), 28.02.2000

- /RAH 79/ *Rahmenspezifikation „Basissicherheit von druckführenden Komponenten“*
2. Anhang zu den RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren (2. Ausgabe
vom 24. Januar 1979) Kapitel 4.2 Rahmenspezifikation Basissicherheit von
druckführenden Komponenten Stand: 25.04.1979
- /ROE 02/ Römpp, Georg Thieme Verlag, 2002, „www.roempp.com“
- /SCH 96/ H. Schaal, D. Filges et al., *Shielding Calculations for ESS using the CASL
Computer Codes (Computer Aided Shield Layout)*, Forschungszentrum
Jülich GmbH, ESS 96-43-T, July 1996
- /SHI 91/ K. Shin et. al., *Transmission of Intermediate-Energy Neutrons and
Associated Gamma Rays Through Iron, Lead, Graphite and Concrete
Shields*, Nuclear Science and Technology Vol. 109, S. 380, (1991)
- /SIM 02/ W. Quade et al., *ESS Target Shielding Selection of Materials*, Siempelkamp
Nukleartechnik GmbH, Krefeld, Germany, 2002
- /SIN 97/ *Sicherheitsbericht zur Spallations-Neutronenquelle SINQ am Paul Scherrer
Institut (PSI)*, Villingen, 15. Mai 1997 (1. Revision)
- /SSV 01/ *Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum
Strahlenschutz vom 20. Juli 2001* (Umsetzung der Richtlinie
96/29/EURATOM und 97/43/EURATOM), Bundesgesetzblatt Nr. 38,
Ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2001
- /STE 71/ F. Stelzer, *Wärmeübertragung und Strömung*, Thiemig-Taschenbücher
Band 18, Verlag Karl Thiemig KG, München, 1971
- /TAF 93/ *High Velocity, Oxygen Fuel (HVOF) Stainless Steel Coatings*, Technical
Data Bulletin 1.3.2.6.1.3, TAFI Incorporated, Concord, NH, USA, 1993
- /TIE 03/ H. Tietze-Jaensch, M. Butzek, K. Clausen, H. Conrad, R.S. Eccleston,
D. Filges, F. Goldenbaum, T. Gutberlet, F. Mezei, *The ESS Moderator
Concept and Instrument Layout of the Short Pulse and Long Pulse Target
Stations*, ICANS-XVI, May 12 – 15, 2003 Düsseldorf-Neuss, Germany
- /TMT 02/ *The ESS Party line*, TMT Meeting n°11, CEA/Paris, Orme des Merisiers,
15.10.2002
- /TTF 01/ T. Burgess, M. Butzek, D. Felde, V. Graves, G. Rennich, S. Schrock, P.
Spampinato, *Summary Report of Target Test Facility R&D (WBS 1.1.10)*,
SNS-Report SNS-101100000-TR0003-R00, October 2001
- /VOL 03/ M. Volkmer, *Radioaktivität und Strahlenschutz*, Informationskreis
Kernenergie, Januar 2003
- /WOL 96/ B. Wolfertz, *Entwicklung eines ingenieurmäßigen Simulationssystems zur
Berechnung von Strahlenschutzparametern an Protonenstrahl-
beschleunigern im Energiebereich bis 3 GeV*, ISSN 0944-2952, Report Jül-
3197, FZ Jülich, 1996

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1-1:	Anteil der Nutzung von Neutronen, aufgeteilt auf die verschiedenen Wissenschaftsgebiete	3
Abb. 2.2-1:	Entwicklung der Neutronenquellen seit der Entdeckung des Neutrons	4
Abb. 2.2-2:	Die Spallationsneutronenquelle ESS	5
Abb. 4.1-1:	Bereiche unterschiedlicher Zugangsanforderungen innerhalb des Gebäudes der Targetstation	18
Abb. 4.2-1:	Aktivität und Nachwärme im Quecksilber nach Strahlabschaltung	21
Abb. 4.2-2:	Dosisleistung innerhalb der Kühlzentrale während der ersten 2 mAh Betrieb an SINQ am 04.12.1996	26
Abb. 4.2-3:	Neutronenspektrum von verschiedenen tiefkalten Moderatormaterialien	27
Abb. 4.2-4:	Explosionsgrenzen für ein Wasserstoff-Methan Gemisch an Luft	28
Abb. 4.2-5:	Sicherheitsrelevanter vierfacher coaxialer Einschluss von tiefkalten brennbaren Medien	29
Abb. 4.3-1:	Neutronenspektren verschiedener Quellen	34
Abb. 4.3-2:	Wirkungsquerschnitt für die Wechselwirkung von Neutronen mit Fe	36
Abb. 4.3-3:	Arten der Materialschädigung in Abhängigkeit von der Temperatur	39
Abb. 4.3-4:	Strahlenschädigung von Inconel 718 und 1.4926	40
Abb. 4.3-5:	Wärmedeposition in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle	42
Abb. 4.3-6:	Neutronenleiter	44
Abb. 4.3-7:	Prinzip der Moderatoranordnung für Kurzpuls- (SPTS) und Langpulsstation (LPTS)	44
Abb. 4.4-1:	Handhabungsgruppen – Austauschfrequenz und deren Auswirkung auf die Handhabungsphilosophie	46
Abb. 4.4-2:	Direkte und indirekte Strahlung bei der Handhabung aktiver Komponenten	47
Abb. 4.4-3:	Handhabung kontaminierter Komponenten (Handschuhbox/Heiße Zelle)	48
Abb. 5.1-1:	Modell der Targetstation ISIS	49
Abb. 5.1-2:	Grundsätzlicher Aufbau der Targetstation / Längsschnitt	50
Abb. 5.1-3:	Grundsätzlicher Aufbau der Targetstation / Aufsicht	51
Abb. 5.1-4:	Anordnung von Target, Moderatoren und Reflektor	52
Abb. 5.1-5:	Prinzip der multi-spektralen Extraktion	53
Abb. 5.1-6:	Platzverhältnisse für ein Strahlrohr innerhalb des Target-Abschirmblockes unter Berücksichtigung der Position des Strahlverschlusses	53

Abb. 5.1-7:	Strahlrohrverschluss mit separatem Gehäuse	54
Abb. 5.1-8:	Targetwagen	56
Abb. 5.1-9:	Fließschema Kreisläufe auf dem Targetwagen	57
Abb. 5.1-10:	Quecksilberpumpe „Prinzip der rotierenden Permanentmagnete“ mit Lagerung und Antrieb	58
Abb. 5.1-11:	Temperaturverlauf im Quecksilber mit und ohne passive Nachwärmeabfuhr	59
Abb. 5.1-12:	Anordnung der Kühlsysteme und Verbraucher	61
Abb. 5.1-13:	Räume für Aktivwassersysteme unterhalb des Bodens des Oberen Handhabungsbereiches	61
Abb. 5.2-1:	Target Behälter inklusive Sicherheitshülle und Anschlussflansch	63
Abb. 5.2-2:	Kombinierte Expansions- und Rekombinationsbehälter an der Spallationsquelle SINQ	66
Abb. 5.2-3:	Grundlegendes Einschlusskonzept der ANS Reaktor Studie	69
Abb. 5.2-4:	Einschlusskonzept im Längsschnitt, schematisch	71
Abb. 5.2-5:	Einschlusskonzept im Querschnitt mit Moderatoren und Neutronenstrahlrohr, schematisch	71
Abb. 5.2-6:	Ventilanordnung der Überwachungsstränge für die Zwischenräume der Doppeldichtsysteme	74
Abb. 5.2-7:	Linersystem mit Top-Platte	76
Abb. 5.2-8:	Top-Platte	77
Abb. 5.2-9:	Dichtungs- und Verriegelungssystem zwischen Top-Platte und innerem Liner	78
Abb. 5.2-10:	Strahlrohrdurchführung	79
Abb. 5.2-11:	Strahlprofil des Protonenstrahls vor dem Target	80
Abb. 5.2-12:	Wandtemperaturen in Abhängigkeit von der Wandstärke für Aluminium und Inconel 718	81
Abb. 5.2-13:	Halbkugelförmiges Strahlfenster der Spallationsquelle SINQ (Aluminium)	82
Abb. 5.2-14:	Fenster als Rohrbündelanordnung (Panflötenfenster)	83
Abb. 5.2-15:	Temperaturen und Spannungen im Fenster bei 10 bar Kühlwasserdruck, 1 bar Differenzdruck und $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ maximaler Strahlstromdichte	83
Abb. 5.2-16:	Aufblasbare Metalldichtung zwischen innerem Liner und Targetwagen	84
Abb. 5.3-1:	Neutronenspektrum in Abhängigkeit vom Winkel zur Protonenstrahlachse	88
Abb. 5.3-2:	Hauptabmaße des Abschirmblockes	89

Abb. 5.3-3:	Verschiedene Bereiche der Abschirmung	94
Abb. 5.3-4:	Abschirmwirkung als rechnerisch gemittelte Materialdichte verschiedener Spaltformen und Verfüllungen	96
Abb. 5.3-5:	Verankerung der untersten Blockebene in der Basisplatte	97
Abb. 5.3-6:	Anordnung und Gestaltung der Blöcke der äußeren Abschirmung	97
Abb. 5.3-7:	Aufbau der inneren Abschirmung	98
Abb. 5.3-8:	Schnitt durch den Aufbau der inneren Abschirmung längs zur Protonenstrahlachse	99
Abb. 5.3-9:	Abflussleitung im Boden des inneren Liners	99
Abb. 5.3-10:	Ansicht der wassergekühlten Abschirmung mit Verrohrung	100
Abb. 5.3-11:	Längsschnitt durch die Abschirmung der Protonenstrahlführung	101
Abb. 5.3-12:	Querschnitt durch die Abschirmung der Protonenstrahlführung	102
Abb. 5.3-13:	Aufbau der Protonenstrahlführung der Spallationsquelle SNS	102
Abb. 5.3-14:	links: Modul der Protonenstrahlführung bei SINQ / rechts: Strahlfänger bestehend aus vier Modulen	103
Abb. 5.3-15:	Zusätzliche mobile Abschirmung innerhalb der Instrumentenhalle, falls der Kollimator im Bereich der Engstelle liegt	103
Abb. 5.4-1:	Vergleich der Konzepte Hub- und Drehverschluss	105
Abb. 5.4-2:	Platzverhältnisse der Strahlverschlussanordnung an der dem Moderator zugewandten Seite	107
Abb. 5.4-3:	Strahlverschluss-Antriebssystem	108
Abb. 5.4-4:	Strahlverschlussssystem	108
Abb. 5.4-5:	Prinzip der Strahlrohrjustierung innerhalb der Targetabschirmung	109
Abb. 5.4-6:	Fixierung Doppelgabel	110
Abb. 5.4-7:	Feinjustierung des inneren Strahlrohreinsatzes	111
Abb. 5.4-8:	Justierung des äußeren Strahlrohreinsatzes	111
Abb. 5.4-9:	Strahlrohrführung innerhalb der Targetabschirmung (Explosionsdarstellung)	112
Abb. 5.5-1:	Targetwagen innerhalb der Heißen Zelle in Handhabungsposition	117
Abb. 5.5-2:	Vorbereitung der Abschirmhaube	117
Abb. 5.5-3:	Schnellklemmverbindung des Targetmodules	118
Abb. 5.5-4:	Handhabungsmaschine	119
Abb. 5.5-5:	Funktionsweise der Handhabungsmaschine	119
Abb. 5.5-6:	Targetmodul und Zwischenflansch	120
Abb. 5.5-7:	Wirbelrohr zur Kälteerzeugung durch Druckluft	121

Abb. 5.5-8:	Temperaturen des Quecksilbers im Ablasstank mit und ohne passive Nachwärmeabfuhr	121
Abb. 5.5-9:	Zeitlicher Ablauf des Wechselvorganges	123
Abb. 5.5-10:	Abschirmung der Transportflasche für den Reflektor der Spallationsquelle SNS	124
Abb. 5.5-11:	Übersicht über alle Komponenten, die in den Wechselvorgang des Reflektors involviert sind	125
Abb. 5.5-12:	Reflektor-Handhabungswagen	126
Abb. 5.5-13:	Absenken des Reflektors aus dem Handhabungswagen	127
Abb. 5.5-14:	Durch die Top-Platte zu handhabende Komponenten des Strahlverschlusssystems / Ausbildung der Luftleitbleche	128
Abb. 5.5-15:	Ausbau des inneren Strahlrohreinsatzes nach Entfernen des Abschirmstopfens	128
Abb. 5.5-16:	Strahlverschluss-Handhabungswagen	129
Abb. 5.5-17:	Einbau des Strahlverschlusselementes nach Lagerwechsel	130
Abb. 5.5-18:	Protonenstrahlfenstermodul und darüber liegender Abschirmblock mit integrierter Strahldiagnostik	131
Abb. 5.5-19:	Dichtsystem Protonenstrahlfenstermodul und austauschbare Aufnahmebox	132
Abb. 5.5-20:	Ausbau Aufnahmebox	132

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2-1:	Technisch-physikalische Parameter der Spallationsquelle ESS	6
Tabelle 3.1-1:	Ebenen eines möglichen, gestaffelten Sicherheitskonzeptes	8
Tabelle 3.2-1:	Beispiele postulierter Störfälle nach PSAR / SNS	11
Tabelle 3.3-1:	Beispiele für die Angabe der Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen	13
Tabelle 4.1-1:	Bereiche der Targetstation	18
Tabelle 4.2-1:	Physikalische Eigenschaften verschiedener Flüssigmetalle	21
Tabelle 4.2-2:	Isotope des Quecksilbers und sicherheitsrelevante Spallationsprodukte im ESS Target	22
Tabelle 4.2-3:	Physikalische Eigenschaften von H ₂ O und D ₂ O	23
Tabelle 4.2-4:	Im Kühlwasser zu erwartende Nuklide	25
Tabelle 4.2-5:	Physikalische Eigenschaften von H ₂ und CH ₄	28
Tabelle 4.3-1:	Strahlungswichtungsfaktoren für verschiedene Strahlungsarten	32
Tabelle 4.3-2:	Strahlenschutzbereiche gemäß Strahlenschutzverordnung	33
Tabelle 4.3-3:	Typische Aktivierungen bei Beschleunigeranlagen	38
Tabelle 4.3-4:	Strahlenschädigung für Strukturmaterialien in unmittelbarer Nähe des Spallationstargets	41
Tabelle 4.3-5:	Wärmedeposition im Target, den targetnahen Komponenten sowie der Abschirmung	43
Tabelle 5.1-1:	Wichtige thermohydraulische Basisparameter des Quecksilberkreislaufes	57
Tabelle 5.2-1:	Medien und deren zu erwartende Betriebsbedingungen innerhalb des Target -Nahbereiches	65
Tabelle 5.2-2:	Medien und deren zu erwartende Betriebsbedingungen innerhalb der Heißen Zelle	66
Tabelle 5.2-3:	Ausbreitungspfade für Quecksilber (geforderter Einschluss:3-fach)	72
Tabelle 5.2-4:	Ausbreitungspfade für titiumhaltige Medien (geforderter Einschluss:2-fach)	73
Tabelle 5.2-5:	Aufstellung der wichtigsten Gassysteme	74
Tabelle 5.3-1:	Betriebsart: Strahlbetrieb	85
Tabelle 5.3-2:	Betriebsart: Wartung (kurz nach Strahlabschaltung)	86
Tabelle 5.3-3:	Betriebsart: Reparatur (längere Zeit nach Strahlabschaltung)	86
Tabelle 5.3-4:	Betriebsart: Anormaler Betrieb	86
Tabelle 5.3-5:	Vergleich verschiedener Abschirmrechnungen (HETC-ANISI, CASL, MCNPX)	89

Tabelle 5.3-6:	Vergleich der gewählten Abschirmdicken mit geplanten oder im Bau befindlichen Spallationsquellen	90
Tabelle 5.3-7:	Notwendige Abschirmdicken der Protonenstrahlabschirmung	91
Tabelle 5.3-8:	Vor- und Nachteile der Stahlarten zur Nutzung für die Abschirmung	92
Tabelle 5.3-9:	Herstellungskosten eines 10 t Blockes unter Verwendung verschiedener Herstellungsverfahren	93
Tabelle 5.5-1:	Einfluss der Lebensdauer auf die Handhabung	114
Tabelle 5.5-2:	Erwartete Handhabungsfrequenzen	115
Tabelle 5.5-3:	Erwartete Komponenteneigenschaften	115
Tabelle 5.5-4:	Vorgangssequenz beim Wechsel des Targets	122
Tabelle 5.5-5:	Eigenschaften der am Reflektorwechsel beteiligten Komponenten	125

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir diese Arbeit ermöglicht haben, aufgrund ihrer fachlichen Kompetenz zum Gelingen maßgeblich beigetragen bzw. mich anderweitig bei der Fertigstellung der Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Danke gilt Herrn Prof. Dr. D. Filges, der mich zu dieser Arbeit ermuntert hat und ohne dessen wertvolle Ratschläge und Unterstützung diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Prof. Dr. rer. nat. S. Hartwig danke ich für die kritische Durchsicht im Rahmen des Co-Referates.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe „ESS Target Station Engineering“ ohne die diese Arbeit nie zu dem geworden wäre, was sie jetzt ist. Frau A. Müller, Herrn J. Bajus, Herrn R. Hanslik, Herrn T. Kulessa und Herrn Dr. M. Lüdeke möchte ich für die wertvolle Unterstützung bei der detaillierten Ausarbeitung der in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte sowie der zeitweise kontroversen und anstrengenden aber immer sehr fruchtbaren Diskussionen danken.

Des weiteren möchte ich mich bei den Kollegen der Spallationsquellen SNS (USA) sowie J-SNS (Japan) für die freundliche Zusammenarbeit und den immer offenen Informationsaustausch bedanken. Getreu meinem Motto „The only way to learn is to learn from mistakes, but the smart way to learn is to learn from mistakes made by others“, habe ich viel aus den Problemen lernen können, auf die sie bei der Umsetzung ihrer Konzepte gestoßen sind.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Familie und insbesondere meiner Frau Bärbel für die Geduld und das Verständnis für meine zeitweise Abwesenheit vom Familienleben während vieler am Computer verbrachter Nächte. Neben meinen Eltern gilt ihr der Dank für die Bereinigung der Arbeit von meiner, zum Teil recht kreativen, Orthographie.

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Jül-4175
Juni 2005
ISSN 0944-2952