GSI

Report 2001 - 05
Oktober

Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz für die geplante Schwerionentherapieanlage in Heidelberg

G. Fehrenbacher, F. Gutermuth, T. Radon

Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH
Planckstraße 1 • D-64291 Darmstadt • Germany
Postfach 11 05 52 • D-64220 Darmstadt • Germany

Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz für die geplante Schwerionentherapieanlage in Heidelberg

Neutron dose assessments for the shielding of the planned heavy ion cancer therapy facility in Heidelberg

Georg Fehrenbacher Frank Gutermuth Torsten Radon

Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH
Planckstraße 1, D-64291 Darmstadt
Abteilung Sicherheit und Strahlenschutz

Abstract: A heavy ion therapy facility will be built at the Heidelberg university hospital. For a first proof of the radiation shielding planning, dose rate assessments were performed. The major component of potential radiation exposure is neutron radiation which is produced near the treatment units and near areas with losses of the primary beam. The dose rate assessments are based on two types of models. The first one uses the integral approximation of Moyer, the second one is based on Monte Carlo methods. The calculations are applied for primary carbon and proton beams with energies of 400 MeV/u and 250 MeV/u, respectively. The resulting dose rates are compared with the requirements of the German radiation protection ordinance for people occupationally exposed to ionizing radiation and the protection of the public near the hospital. From these shielding calculations recommendations are derived for an improved shielding at the target areas and for the beam transfer lines from the synchrotron to the treatment units.

Zusammenfassung: Zur Zeit befindet sich eine medizinische Anlage zur Tumortherapie mit Schwerionen in Heidelberg in der Planungsphase. Zum Zweck einer ersten Überprüfung der bisher vorliegenden Baupläne auf Aspekte des baulichen Strahlenschutzes werden Abschätzungen der außerhalb des eigentlichen Bestrahlungsraums zu erwartenden Strahlenexposition durchgeführt. Hierzu wird der Transport bzw. die Absorption der entstehenden Neutronenstrahlung durch die vorgesehene Abschirmung zum Einen mit Hilfe einer auf Moyer zurückgehenden Integralmethode, zum Anderen durch ein Monte-Carlo-Verfahren simuliert. Mit diesen beiden Rechenansätzen werden die sich aus verschiedenen Absorbergeometrien ergebenden Strahlenexpositionen im Hinblick auf die Einhaltung der Grenzwerte gemäß Strahlenschutzverordnung betrachtet. Es zeigt sich, dass für den geplanten Betrieb mit 400 MeV/u Kohlenstoffionen der bisher vorgesehene bauliche Strahlenschutz unter Umständen unzureichend ist. Möglicherweise ist in den an die Bestrahlungsräume angrenzenden Räumen ein Kontrollbereich einzurichten. Abschätzungen zum ebenfalls vorgesehenen Betrieb mit 250 MeV Protonen zeigen, dass die für den geplanten Kohlenstoffbetrieb erforderlichen Abschirmmaßnahmen auch den hier erforderlichen Belangen genügen.

1 Einleitung

Der bauliche Strahlenschutz für die geplante Therapieanlage mit Schwerionen in Heidelberg ist so auszulegen, dass angrenzende Bereiche an die Therapieräume bezüglich möglicher Strahlenexpositionen den gesetzlichen Bestimmungen entsprechen (§ 46-48 Strahlenschutzverordnung - Schutz von Bevölkerung und Umwelt). Dies bedeutet im Einzelnen:

- Die Exposition durch Direktstrahlung und Ableitungen darf 1 mSv im Jahr nicht überschreiten
- Die Exposition durch Ableitungen allein darf 0,3 mSv im Jahr nicht überschreiten (hier nicht betrachtet)

Für die Planung der Schwerionenbeschleunigeranlage interessieren im Hinblick auf den Strahlenschutz besonders folgende Aspekte:

- Abschirmung der Beschleunigeranlage (Ionenquelle, Linearbeschleuniger, Synchrotron, Strahlführung und Patientenplatz) gegenüber Röntgen-, Gamma- und Neutronenstrahlung
- Betrachtung der Aktivierung der Bereiche, in denen der Primärstrahl mit den Beschleunigerstrukturen wechselwirkt (hier nicht berücksichtigt).
- Untersuchung der Aktivierung der Bereiche, in denen Neutronenstrahlung auftritt: Targets, Beschleunigerstrukturen, Kühlwasser, Luft, Gebäude und Erdreich (hier nicht berücksichtigt).

Die zu treffenden Abschirmmaßnahmen sind in hohem Maße durch die von den Neutronen verursachte Dosisleistung bestimmt. Neutronen werden primär bei der Abbremsung der Ionen im Patientengewebe erzeugt, aber auch während des Beschleunigungsvorgangs und des Transports der Ionen kann eine Abbremsung der Ionen zur Neutronenproduktion führen. In Abbildung 1 ist die Ansicht für eine Planungsvariante der Anlage mit Gebäude dargestellt. Die wesentlichen Komponenten Ionenquelle, Synchrotron und Strahlführungen zu den drei Therapieplätzen (grün) sind dort eingetragen. Angedeutet sind neben den Schwerionenprimärstrahlen (rot) auch die Strahlenkegel der produzierten Neutronenstrahlung (blau) in einigen Bereichen.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Abschätzung von Dosisleistungen, verursacht durch Neutronenstrahlung, in zu den Therapieräumen und den Strahltransportstrecken vom Synchrotron zum Patientenbestrahlungsplatz benachbarten Bereichen. Mit diesen Abschätzungen ist der bauliche Strahlenschutz nicht vollständig charakterisiert. Die Gammadosisleistung ist in diesen Rechnungen nicht berücksichtigt, obwohl sie unter Umständen bis zu 50% der Gesamtdosisleistung betragen kann. Weiterhin sind die hier entwickelten bzw. angewendeten Modelle auf Basis der Moyer-Integrale [1] nur für einfache Geometrien zu verwenden. Komplizierte Gebäudestrukturen, wie z. B. Zugangslabyrinthe, erfordern zunehmend die Anwendung von Monte-Carlo-Verfahren. Es sind im Wesentlichen zwei Strahlgeometrien zu berücksichtigen sind:

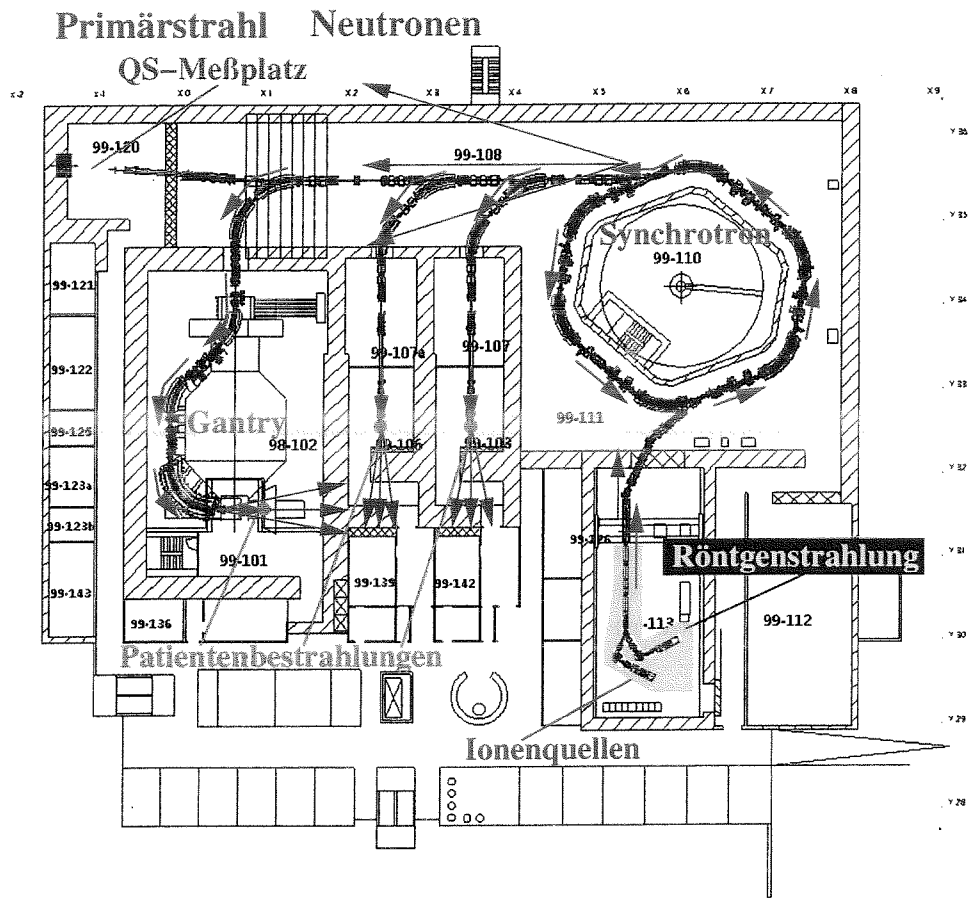


Abbildung 1: Ansicht der bisherigen Planung der Beschleunigeranlage mit Patientenbestrahlungseinheiten und Ionenquellen, Synchrotron, Gantry sowie umgebendem Gebäude. Strahlrichtung des Primärstrahls ist mit roten Pfeilen gekennzeichnet, Beispiele für erzeugte Neutronenkegel mit blauen Pfeilen. Röntgenstrahlung ist vor Allem im Bereich der Ionenquellen zu erwarten.

1. Strahlgeometrie mit kompletter Abbremsung des Ionenstrahls in einem Target und der zugehörigen Abschirmung für die produzierten Neutronen („Patientengeometrie").

2. Strahlgeometrie mit teilweiser Abbremsung des Ionenstrahls während des Beschleunigungsvorgangs und des Transports zum Bestrahlungsplatz des Patienten („seitliche Geometrie").

In Chiba [2] wurden die von einem 400 MeV/u Kohlenstoffstrahl beim Auftreffen auf ein massives Kohlenstofftarget entstehenden Neutronenspektren gemessen. Aus diesen Spektren wurde für die Patientengeometrie die Exposition für verschiedene Abschirmstärken schon rechnerisch von Hartmann [3] abgeschätzt. Weiterhin wurden von Eickhoff et al. [4], basierend auf den Neutronenspektren aus [2], bereits Abschätzungen für Betonabschirmungen in seitlicher Geometrie durchgeführt.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Berechnung von Neutronendosisleistungen mit Kohlenstoffionen als Primärstrahl auf Kohlenstofftarget in der seitlichen und der Patientengeometrie. Basierend auf den in Chiba gemessenen Neutronenspektren [2] wird die Abschwächung in Beton und im Strahlfänger durch neutronenenergieabhängige Schwächungsfaktoren [5] berücksichtigt. Die Dosisleistung wird ermittelt durch Anwendung von Neutronendosisfaktoren, die durch die ICRP veröffentlicht worden sind [6, 7]. Eine Empfehlung für Abschirmdicken in beiden Geometrien wird angegeben. Schließlich werden Vergleiche mit ebenfalls durchgeführten FLUKA-Monte-Carlo-Rechnungen angestellt. Hier wird der Transport der Neutronen vom Target zu den Bereichen außerhalb der Abschirmung simuliert. Diese Methode ist vor allem für die genauere Abschätzung der Dosisleistung durch Streustrahlung besser geeignet.

Die Abschätzung von Neutronendosisleistungen für die vorgegebenen Geometrien muss unter folgenden Randbedingungen durchgeführt werden:

- Strahlgeometrien für Patienten-Bestrahlung und der seitlichen Abschirmung von primärstrahlführenden Systemen mit den typischen Abständen und Abschirmmaterialien

- Räume außerhalb des Behandlungsraums sind als Bereiche anzusehen, die den Regelungen des Schutzes der Bevölkerung nach Strahlenschutzverordnung anzupassen sind, d.h. die Dosisleistung ist bei einem 2000 Stundenbetrieb der Beschleunigeranlage so zu begrenzen, dass gilt:

  $DL < 1,0$ mSv – Inkorporationsdosis/2000 h $\simeq 0,7 \ldots 1,0$ mSv/2000 h

- Die Dosisleistung ist für einen Wert von $3 \cdot 10^8$ Kohlenstoff-Ionen pro Sekunde vorzunehmen.

Die Therapieanlage soll auch für Protonenbehandlungen zur Verfügung stehen. Es werden deshalb auch Berechnungen mit an Wasserstoff angepassten Strahlparametern durchgeführt. Dosisabschätzungen werden für Protonenstrahl der Energie 250 MeV und der Intensität $1,3 \cdot 10^{10}$ Ionen/s für die Patientengeometrie ermittelt. Es werden Vergleiche der notwendigen Abschirmmaßnahmen mit denjenigen für Kohlenstoff gezogen.

2 Methode

2.1 Geometrien der Bestrahlung

Die beiden wichtigsten Geometrien möglicher Strahlenexpositionen sind die seitliche Abschirmung und die Abschirmung für die Patientengeometrie mit der Notwendigkeit der stärksten Abschirmung in 0°-Richtung.

In Abbildung 2 ist die Geometrie für seitliche Abschirmung dargestellt mit der Winkelabhängigkeit bezüglich des einfallenden Ionen-Strahles, charakterisiert durch den Winkel θ. Für kleine Winkel vergrößert sich die effektive Abschirmdicke ($\propto d/\sin(\theta)$). Für große Winkel ist die erzeugte Neutronenflussdichte im Vergleich zur Vorwärtsstreuung in 0°-Richtung erheblich kleiner.

Für die Patientengeometrie (Abbildung 3) ist die Strahlung in 0°-Richtung maßgebend. Hier ist zusätzlich zur Wandabschirmung aus Beton ein Strahlfänger aus Metall anzubringen, um die notwendigen Wanddicken nicht zu stark werden zu lassen. Der Metallstrahlfänger, der aus konstruktiven Gründen sich mit der Gantry mitbewegt bzw. am Horizontalbestrahlungsplatz fest positioniert ist, hat besonders für hochenergetische Neutronen eine effiziente Abschirmwirkung.

2.2 Kohlenstoffstrahl

In Zusammenhang mit Design-Studien der japanischen Schwerionentherapieanlage HIMAC in Chiba wurden Neutronenspektren von Kohlenstoff- und Neonionenstrahlen in Kombination mit verschiedenen Targets gemessen und mit aus Simulationsrechnungen erhaltenen Neutronenspektren verglichen [2]. Die Energiemessung beruht auf der Erfassung der Flugzeit mittels Plastikszintillatoren. Diese in Abhängigkeit des Streuwinkels gemessenen

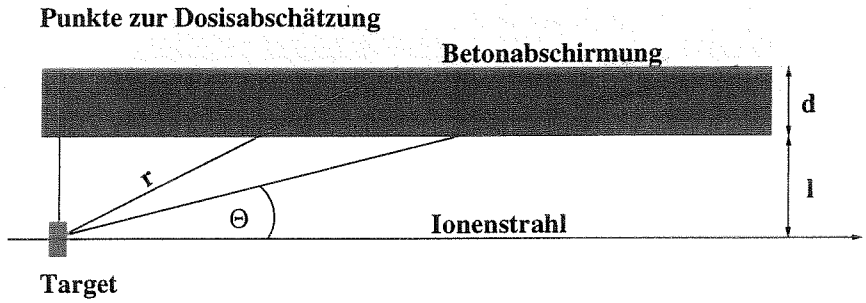


Abbildung 2: Prinzipskizze der Geometrie für Strahltransport und seitliche Abschirmung. Referenzpunkte für die Abschätzung von Strahlenexpositionen als Funktion des Ablenkungwinkels θ vom Zentralstrahl sind hier entlang der Abschirmung zu betrachten. Es sind hier angegeben die Wanddicke d, der laterale Abstand l und der Gesamtabstand r zum Referenzpunkt. Die Abstände d und l sind in Abbildung 8 als $d + l$ angegeben.

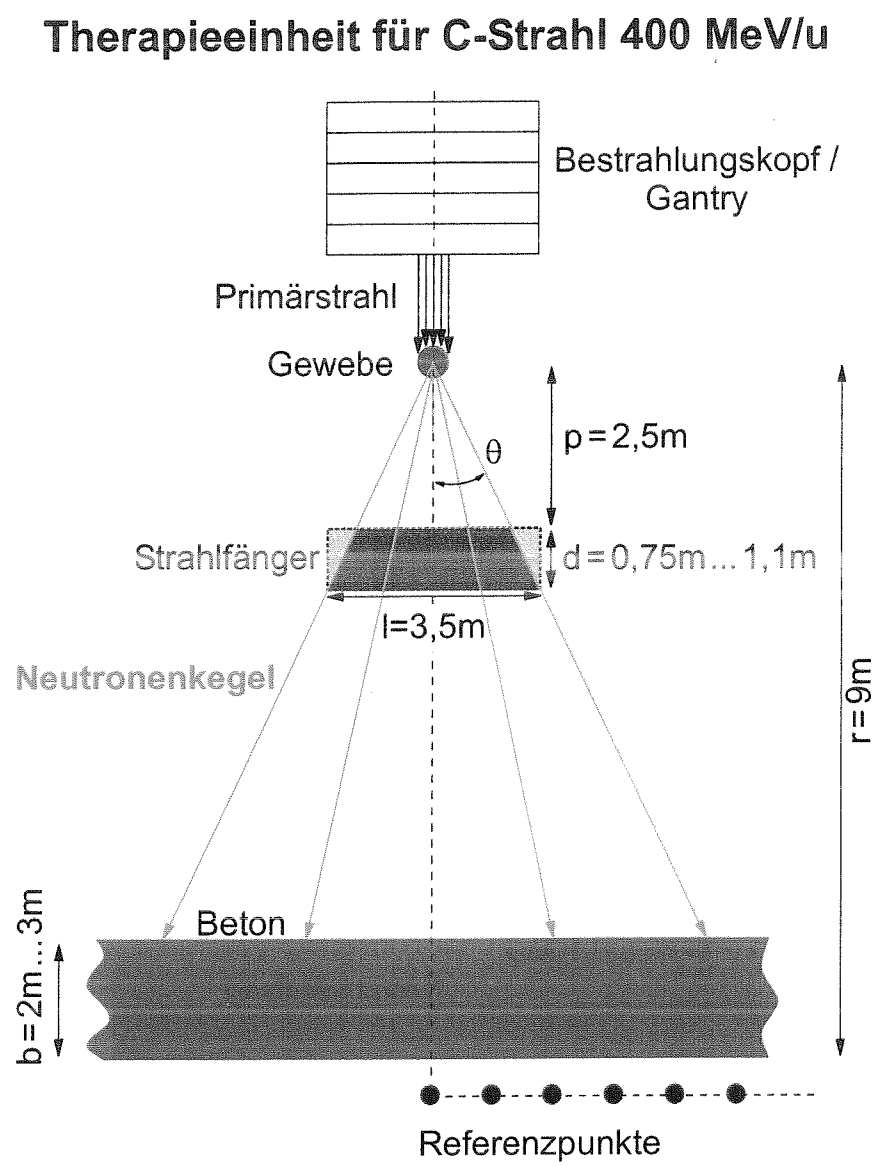


Abbildung 3: Prinzipskizze der Patientengeometrie für die Bestrahlung mit Schwerionen durch eine sogenannte Gantry und der Abschirmung der erzeugten Neutronenstrahlung. Eingetragen sind Referenzpunkte für die Abschätzung von Strahlenexpositionen als Funktion des Ablenkungwinkels θ vom Zentralstrahl.

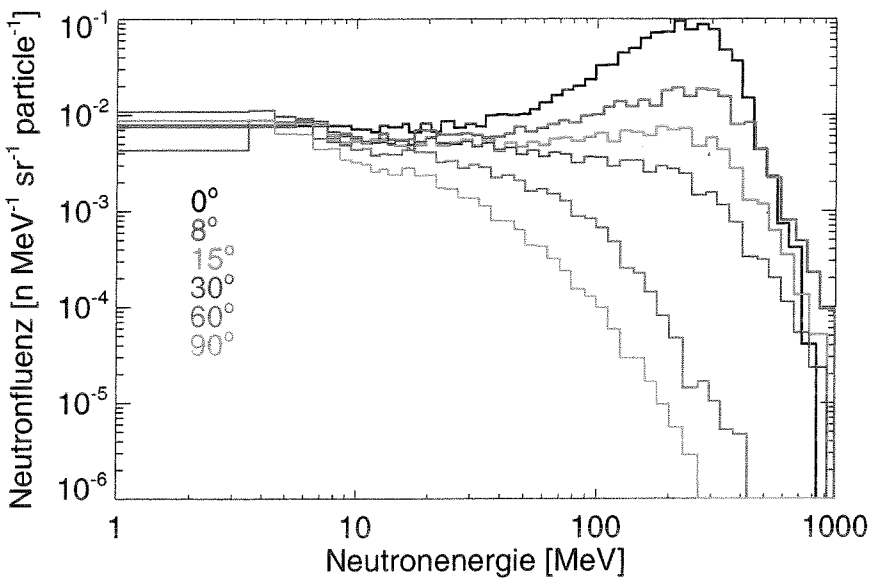


Abbildung 4: Neutronenspektren im Energiebereich von 1 MeV bis ca. 1000 MeV erzeugt durch einen Kohlenstoffionenstrahl auf ein Kohlenstofftarget mit vollständiger Abbremsung des Primärstrahls für Streuwinkel von 0^0 bis 90^0 aus [2].

Neutronenspektren werden hier als Quellterme für weitere Berechnungen im Sinne von Expositionsabschätzungen verwendet. In Abbildung 4 sind die gemessenen Neutronenspektren dargestellt. Für die Spektren unter 0° bis 30°-Emission ist zu erkennen, dass die Neutronen auch höhere Energien als die Einschussenergie von 400 MeV/u haben können, was aufgrund der kinetischen Energie der Nukleonen im Kohlenstoffkern möglich ist.

Da die Schwerionentherapieanlage hauptsächlich mit Kohlenstoff- oder leichteren Ionen betrieben werden wird, stellt eine auf Kohlenstoffionen basierende Expositionsabschätzung ein realistisches Szenario dar. Die Abschätzung von Dosisleistungen für Neutronenstrahlung auf der Basis gemessener Neutronenspektren ist unter Anwendung von sogenannten Dosiskonversionsfaktoren möglich. Es wird die Umrechnung von spektralen Neutronenfluenzen in Dosiswerte, die auf bestimmten Dosisgrößen basieren, vorgenommen. Diese wiederum hängen von physikalischen, strahlenbiologischen und geometrischen Modellannahmen und verwendeten Phantomen ab. Üblicherweise werden Faktoren verwendet, die durch die internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) geprüft und veröffentlicht sind.

Die Faktoren werden durch Monte-Carlo-Simulationsrechnungen ermittelt. Für Neutronenstrahlung sind die Veröffentlichungen der ICRP Nr. 51 [6] und 74 [7] zu erwähnen, welche entsprechende Faktoren für die Dosisgröße H_{Made} (Maximum absorbed dose equivalent) und die Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe in einem planparallelen Phantom (ICRP51) sowie für die Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe in einer Kugel (ICRP74) enthalten. Allerdings

enthält die ICRP74 nur Dosiskonversionsfaktoren für Neutronenenergien unterhalb von 200 MeV. Es existieren jedoch Erweiterungen der ICRP74 beispielsweise von Sannikov [8] und von Ferrari und Pellicioni [9] mit verschiedenen Simulations-Codes für Neutronenenergien bis in den TeV-Bereich. In Abbildung 5 sind Konversionsfaktoren für die Dosisgröße H_{Made} (ICRU 39) [11] und die Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe des planparallelen Phantoms für Parallelstrahl H*(10) (ICRP51) angegeben.

Die Berechnung der winkelabhängigen Dosis $H(\theta)$ aus dem Neutronenspektrum $\Phi(\theta, E_n)$, dem Konversionsfaktor $C(E_n)$ und dem Ionenverlust I beschreibt folgende Gleichung:

$$H(\theta) = \frac{I}{r^2} \cdot \sum_n \Phi(\theta, E_n) \cdot C(E_n) \tag{1}$$

Hier ist r als der Abstand von der Quelle zum Referenzpunkt definiert. Die Absorption der Neutronenstrahlung wird üblicherweise durch einen exponentiellen Abfall mit zunehmender Schichtdicke d beschrieben, die Schwächung der Neutronen wird durch einen energieabhängigen Parameter $\lambda(E_n)$ charakterisiert:

$$\frac{H(d)}{H_0} = \exp\left(-\frac{d}{\lambda(E_n)}\right) \tag{2}$$

Die Schwächungsfaktoren der Neutronen in Kupfer und Beton werden Lindenbaum [12] bzw. Patterson [13] und dem IAEA-Report 283 [5] entnommen (siehe Abbildung 6). Die Dosisabschätzung für eine aus zwei Materialen kombinierten Abschirmung ist dann:

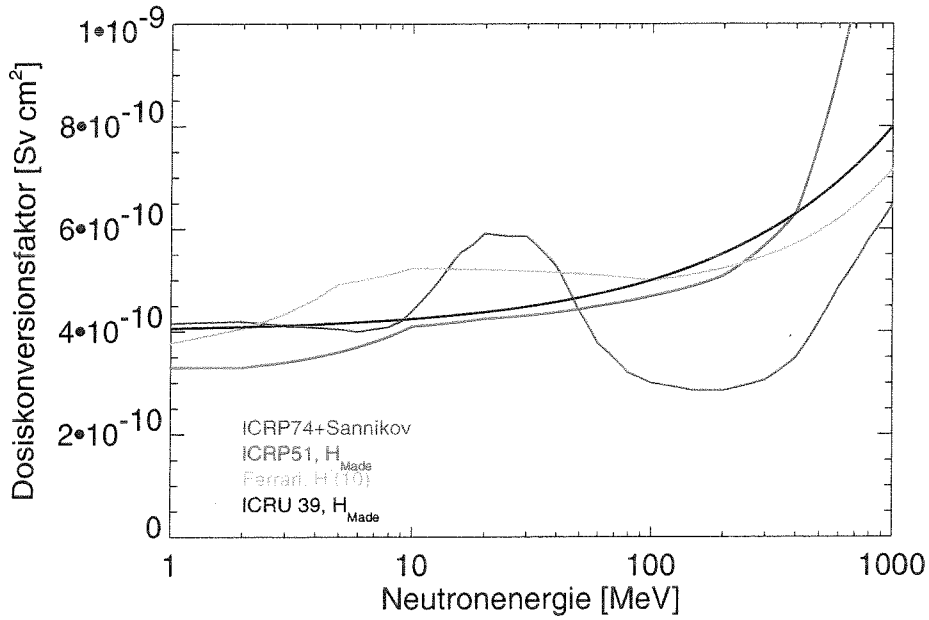


Abbildung 5: Dosiskonversionsfaktoren für Neutronenstrahlung im Energiebereich von 1 MeV bis ca. 1000 MeV zur Umrechnung der spektralen Neutronenfluenz in eine Äquivalentdosis.

$$H(\theta) = \frac{I}{r^{\star 2}} \cdot \sum_n \Phi(\theta, E_n) \cdot C(E_n) \cdot B(E_n) \cdot \exp\left(-\frac{d^\star}{\lambda_1(E_n)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{b^\star}{\lambda_2(E_n)}\right), \quad (3)$$

wobei $r^\star = r/\cos(\theta)$, $b^\star = b/\cos(\theta)$ und $d^\star = d/\cos(\theta)$ entsprechend Abbildung 2 definiert sind. Hier ist zusätzlich der Aufbaueffekt in einer Betonabschirmung durch den energieabhängigen Parameter $B(E_n)$ berücksichtigt. Er wird den in Reich [14] angegebenen Schwächungskurven entnommen und in Tabelle 1 wiedergegeben.

2.3 Protonenstrahl

Die Therapieanlage wird so ausgelegt werden, dass auch Protonentherapiebetrieb möglich sein wird. Die Strahldaten sind unterschiedlich zum Kohlenstoffionenbetrieb. So sind die maximalen Energien wesentlich niedriger aufgrund der höheren Reichweite, die Intensitäten jedoch höher. Typische Werte sind 230 MeV Energie für die Protonen bei einer Intensität von $4 \cdot 10^{10}$ pro Spill, d.h. $1{,}3 \cdot 10^{10}$ Ionen pro Sekunde. Für die Abschätzungen der Dosisleistungen außerhalb der Abschirmung werden drei verschiedene Modellansätze für die Patientengeometrie angewendet:

1. Moyer-Modellansatz nach Sullivan für Neutronenstrahlung [16]

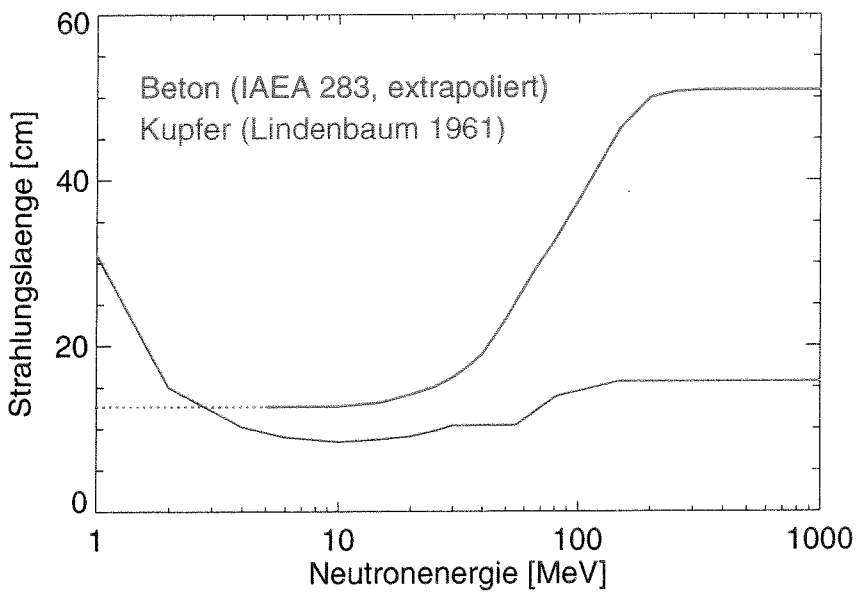


Abbildung 6: Schwächungsfaktoren (auch Strahlungslängen genannt) λ für Neutronenstreuung bzw. Absorption als Funktion der Neutronenenergie für Beton und Kupfer.

Tabelle 1: Aufbaufaktoren für Neutronenstrahlung für Betonabschirmungen. Der Wert für Neutronen mit 1000 MeV Energie ist entsprechend dem Gutachten von H.P. Weise, BAM, 1988, gewählt [15].

E_N [MeV]	10	20	33	50	100	200	400	1000
B	1,0	1,2	1,8	1,8	1,5	1,5	3,2	8

2. Monte-Carlo-Rechnungen mit FLUKA für Neutronenstrahlung [17, 18]

3. Moyer-Modellansatz nach Agosteo et al. [19, 20, 21, 22].

Im ersten Ansatz wird die Neutronenfluenzabschätzung von Sullivan für ein Eisen bzw. Kupfertarget verwendet mit:

$$\Phi\left(E_p,\theta\right)=\frac{5000\left(1-e^{-m}\right)}{\left(\theta+\frac{40}{\sqrt{E_P}}\right)^2}, \tag{4}$$

Hier ist $m=3,6\cdot E_P^{1,6}$ mit der Protonenenergie E_P in GeV für einen Energiebereich von 0,05 bis 1 GeV. Die Umrechnung der Neutronenfluenz in eine Dosis erfolgt vereinfachend durch einen Faktor $C=4\cdot 10^{-14}$ Sv pro Neutron/m^2 [16]:

$$H_0\left(E_p,\theta\right)=C\cdot\Phi\left(E_p,\theta\right). \tag{5}$$

Die Berücksichtigung der Abschirmung erfolgt entsprechend dem Abstandsquadratgesetz und einer exponentiellen Abschirmung mit der Wanddicke b, Strahlfängerdicke d und einem winkel- und energieabhängigen Parameter $\lambda(E,\theta)$:

$$H\left(E_p,\theta\right)=\frac{H_0\left(E_p,\theta\right)}{r^2}\exp\left(-\frac{b^{\text{Beton}}(\theta)}{\lambda_\theta^{\text{Beton}}(E_p)}\right)\exp\left(-\frac{d^{\text{Fe}}(\theta)}{\lambda_\theta^{\text{Fe}}(E_p)}\right) \tag{6}$$

Für λ wird eine Näherung angegeben mit asymptotischen Werten für hohe und niedrige Protonenergien:

$$\lambda=\lambda_0\left(1-0,8\cdot e^{-\alpha}\right), \tag{7}$$

mit dem materialabhängigen Parameter λ_0 definiert für Eisen und Beton (132 g/cm^2, 100 g/cm^2) und dem richtungsabhängigen Parameter α. Für seitliche Abschirmung ($\theta=90°$) wird $\alpha=3$, für Vorwärtsstreuung ($\theta=0°$) wird $\alpha=5$ angenommen. Um die Winkelbereiche zwischen 0 und 90° abzudecken werden die Werte für λ interpoliert.

Auf der Basis von FLUKA-Simulationsrechnungen wurden von Agosteo et al. [19] Parameter für ein Modell, das analog dem Moyer-Modell formuliert ist, berechnet (siehe Tabelle 2). Als Target wurden sowohl Eisen als auch biologisches Gewebe gewählt. Hier werden für die Betonabschirmung diese Parameter für das Eisentarget den Abschätzungen zugrunde gelegt. Für die Eisenabschirmung wird wie zuvor auf die Parameter von Sullivan [16] zurückgegriffen. Die ermittelten Parameter sind der Quellterm $H_0(E,\theta)$ und der Schwächungskoeffizient λ_θ. H_0 bezieht sich - im Gegensatz zu den anderen Rechnungen - auf die Gesamtdosis (Neutronen- und Gammadosis).

Tabelle 2: Parameter von Agosteo et al. [19] für die Berechnung von Dosisleistungen in Anlehnung an das Modell von Moyer für ein Eisen- bzw. Gewebetarget und einen 250-MeV-Protonenstrahl. In die hier durchgeführten Rechnungen sind die Parameter für das Eisentarget eingegangen.

Winkel	H_0^{Fe} [Sv m^2/Teilchen]	λ^{Fe} [g/cm^2]	H_0^{Gewebe} [Sv m^2/Teilchen]	λ^{Gewebe} [g/cm^2]
0°	9,0e-15	109,0	7,4e-15	100,0
10°	9,0e-15	109,0	7,4e-15	100,0
20°	7,5e-15	106,0	5,4e-15	101,1
30°	6,8e-15	110,0	3,5e-15	96,7
40°	3,9e-15	98,7	3,3e-15	90,5
50°	3,3e-15	92,9	2,0e-15	84,5
60°	2,5e-15	89,0	1,2e-15	79,8
70°	2,0e-15	83,7	7,1e-16	76,7
80°	8,1e-16	78,2	4,1e-16	68,9
90°	6,2e-16	62,8	2,5e-16	61,8
100°	3,8e-16	60,1	1,6e-16	56,5
110°	2,9e-16	54,9	9,3e-17	56,8
120°	1,9e-16	55,9	8,1e-17	52,4
130°	1,6e-16	52,8	7,5e-17	51,9
140°	1,5e-16	45,9	6,2e-17	50,5
150°	1,3e-16	46,4	5,0e-17	43,0
160°	9,4e-17	37,5	4,6e-17	42,3
170°	8,0e-17	37,3	3,4e-17	40,9
180°	6,5e-17	32,8	3,0e-17	38,0

3 Ergebnisse

3.1 Rechnungen nach Moyer-Integralmethode

Unter Anwendung von Gleichung 3, wird zunächst eine Abschätzung für die Patientengeometrie für eine Betonwandstärke von 2 m (2,3 g/cm^3) und eine Stärke des Strahlfängers von 1 m Kupfer berechnet. Die maximale Dosisleistung beträgt ca. 1 μ Sv/h. Falls der Strahl nicht mehr durch den Strahlfänger geschwächt wird, was für Winkel größer als 30° zutrifft, kann die Dosisleistung bis zu ca. 5 μ Sv/h betragen (siehe Abbildung 7). Somit wäre es notwendig für den Nachbarraum einen Kontrollbereich einzurichten (Grenze: 3 μSvh^{-1}, schwarze Linie in Abbildung 7).

Um die Auswirkung verschiedener Abschirmdicken der Betonwand und des Strahlfängers auf die zu erwartenden Dosisleistungen abschätzen zu können, werden einige Kombinationen betrachtet und die sich ergebenden Dosisleistungen abgeschätzt (siehe Abbil-

dung 7). In Tabelle 3 sind die verschiedenen Abschirmstärken zusammen mit der entsprechenden Dosisleistung bei 0° sowie den Maximalwerten dargestellt. Es zeigt sich, dass der 3 μSv/h-Grenzwert durch eine Kombination von 2,2 m Betonwand und 0,75 m Strahlfänger eingehalten werden könnte und dass für einen Grenzwert von 0,5 μSv/h 3 m Beton und 0,8 m Strahlfänger erforderlich wären.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Abschirmkombinationen für Strahlfänger aus Metall und Betonwand.

Komb.	Beton [cm]	Strahlfänger [cm]	Dosisleistung [μSv/h]	
			bei 0°	maximal
1	200	100	1	5
2	200	110	0,5	5
3	220	100	0,7	3
4	220	75	3	3
5	250	100	0,4	1
6	300	100	0,2	0,5
7	300	80	0,5	0,5

Die Berechnungen ergeben weiterhin, dass konsistente Abschirmkombinationen für das 3 μSv/h-Niveau für 2,2 m und 0,75 m bzw. für das 0,5 μSv/h-Niveau in der Kombination 3,0 m und 0,8 m für Betonabschirmung und Strahlfänger gefunden werden können (siehe Abbildung 3 und Tabelle 3).

Für die seitliche Abschirmgeometrie werden ebenfalls verschiedene Kombinationen aus Abschirmdicke und Abstand betrachtet. Der Verlust des Kohlenstoffstrahls ist immer mit 10% angenommen. Für höhere Verlustraten sind die hier wiedergegebenen Dosisleistungen entsprechend zu skalieren. Die Ergebnisse für die berechneten Neutronendosisleistungen sind in Abbildung 8 für 1,5 m, 2 m und 2,5 m Betonabschirmungen dargestellt. Für 1,5 m bzw. 2 m Betonabschirmungen kann die Neutronendosisleistung über der hier eingetragenen Grenze von 0,5 μSv/h liegen, so dass in der zu planenden Anlage zumindest für die Bereiche, in denen der seitliche Abstand klein ist, höhere Abschirmdicken (z.B. 2,5 m) gewählt werden sollten.

3.2 Monte-Carlo-Rechnungen mit FLUKA

Für die bisher getroffenen Abschätzungen sind Vereinfachungen vorausgesetzt, die nicht grundsätzlich auf alle Geometrien und Berechnungsbeispiele anwendbar sind. So gilt Gleichung 3 strenggenommen nur für Abschirmdicken größer als ca. 5 m und soll nur für einfache Geometrien, wie z.B. die seitliche Geometrie, verwendet werden. Prozesse wie die elastische bzw. inelastische Neutronenstreuung oder die Spallation mit der Produktion von weiteren Neutronen werden hier nicht berücksichtigt.

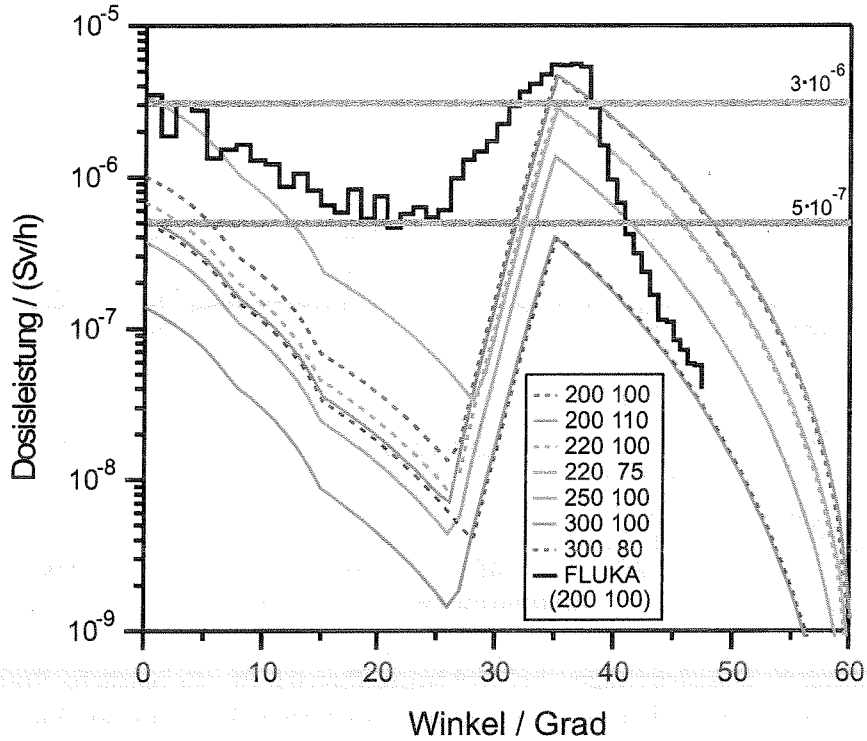


Abbildung 7: Dosisleistungen hinter den Abschirmungen bei Kohlenstoffbetrieb in der Patientengeometrie (Gantry) als Funktion des Ablenkwinkels θ. Ab etwa 30° Ablenkwinkel wird der Strahlfänger aus Metall (Kupfer) zunehmend unwirksam und die Abschirmung wird nur noch durch die Betonwand gewährleistet. Zum Vergleich sind die Ergebnisse aus Monte-Carlo-Rechnungen mit Fluka eingetragen (siehe auch Abbildung 9).

Ein genaueres Berechnungsverfahren stellt die Monte-Carlo-Methode dar. Die Wechselwirkung der Neutronen mit Materie wird hier unter Berücksichtigung der Streu- und Reaktionsprozesse in der interessierenden Geometrie simuliert. Für das Beispiel der Patientengeometrie wird das Monte-Carlo-Programm FLUKA angewendet [17, 18]. Als Eingabe für die Simulation der Neutronentransportprozesse für das Programm werden, wie zuvor die winkelabhängigen Neutronenspektren aus Abbildung 4 verwendet. Dosiswerte werden unter Verwendung der Dosiskonversionsfaktoren nach ICRP74 [7] und Ferrari und Pellicioni [9] für verschiedene Positionen (Winkel) berechnet.

In Abbildung 9 ist das Ergebnis für die Geometrie mit 2 m Betonabschirmung und 1 m Eisenabschirmung im Vergleich zu den Moyer-Rechnungen angegeben. Erwartungsgemäß ist der durch den Strahlfänger bedingte Abfall der Dosisleistung bei 30° nicht so ausgeprägt wie in der Näherung nach Gleichung 3 da hier die Neutronenstreuung berücksichtigt ist. Das Moyer-Modell unterschätzt die Dosisleistungen um einen Faktor 3 bis 6. Dies liegt unter Anderem daran, dass die Abschirmwirkung des Strahlfängers überschätzt wird, da die

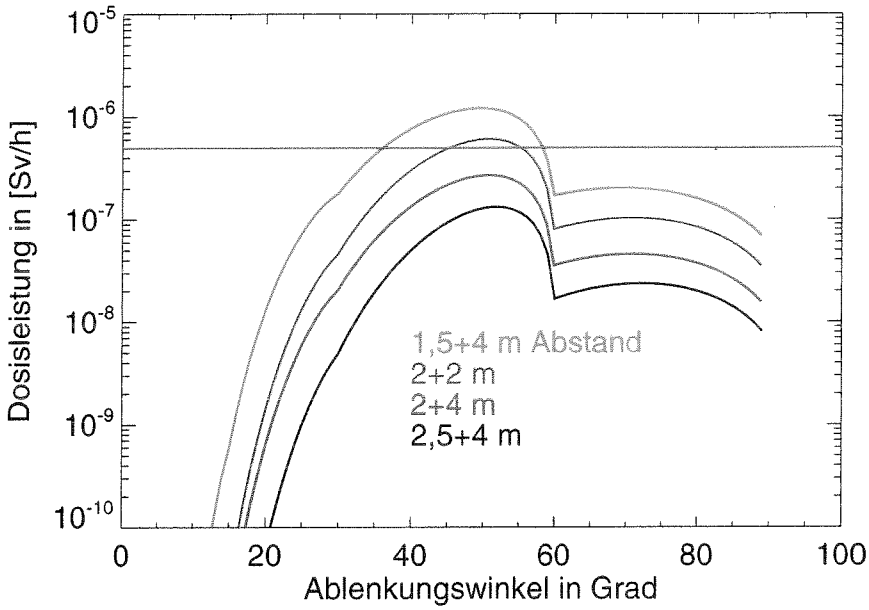


Abbildung 8: Dosisleistungen bei Kohlenstoffbetrieb für die seitliche Strahlgeometrie für verschiedene Abständen und Abschirmdicken. Für den Fall von 2 m Betonabschirmung und 2 m zusätzlichem Abstand oder 1,5 m Betonabschirmung und 4 m seitlichen Abstand werden 0,5 μSv/h bei 50°-Ablenkung bzw. mit 35°- bis 60°-Ablenkung überschritten. Die Unstetigkeit bei 60° ist auf die gemessenen Neutronenspektren zurückzuführen.

Wirkungsquerschnitte, ausgedrückt durch λ, die Summe aller Streu- und Absorptionsprozesse darstellen und hier mit Neutronenabsorption gleichgesetzt werden. Untersuchungen zu dem Schwächungsparameter λ zeigen, dass die veröffentlichten Werte nur für große Schichtdicken anwendbar sind und bei kleinen Abschirmdicken (< 5 m) um bis zu 25% abweichen können [10].

3.3 Abschätzungen zum Protonenbetrieb

Für einen Protonenstrahl der Energie 230-250 MeV und der Intensität $1{,}3{\cdot}10^{10}$ p/sec werden ebenfalls Berechnungen der zu erwartenden Exposition, allerdings nur für Patientengeometrie, durchgeführt. Es ergeben sich Spitzenwerte von 0,5 bis 1 $\mu Sv/h$ für die Geometrie mit 2 m Beton und 1 m Strahlfänger für die Integral-Berechnungen nach Sullivan [16] und die Monte-Carlo-Rechnungen mit FLUKA (siehe Abbildung 10).

Der Ansatz von Agosteo et al. [19, 20, 21, 22] liefert deutlich höhere Dosisleistungen. Für einen Streuwinkel von 26° ergibt sich eine maximale Dosisleistung zu ca. 10 μSv/h. Obwohl bei Agosteo et al. die Gesamtdosisleistung aller Strahlenarten (Neutronen- und Gammastrahlung) berücksichtigt ist, kann dies die beobachteten Unterschiede nicht vollständig erklären.

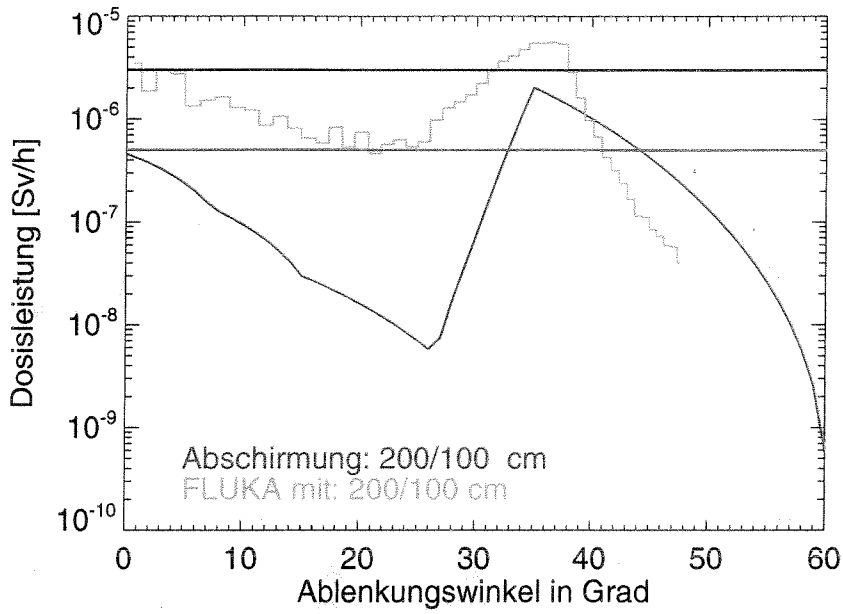


Abbildung 9: Vergleich von mit dem Moyer-Modell ermittelten Dosisleistungen für Kohlenstoffbetrieb in der Patientengeometrie für Abschirmdicken von 200 cm Betonwand und 100 cm Strahlfänger mit FLUKA-Monte-Carlo-Rechnungen in gleicher Geometrie. Beide Abschätzungen basieren auf Konversionsfaktoren nach ICRP74 bzw. Ferrari und Pellicioni.

4 Schlußfolgerungen

Bei einem Kohlenstoffionenbetrieb mit bis zu $3 \cdot 10^8$ Ionen pro Sekunde ergeben sich für die Strahlenschutzauslegungen in der seitlichen Geometrie, bei Einhaltung des 1-mSv-Limits (bei vernachlässigbarer Inkorporationsdosis) für 2000 Stunden Betriebsdauer, Abschirmdicken von 2 m Beton, an manchen Stellen 2,5 m Beton. Für Geometrien mit 2 m zusätzlichem seitlichem Abstand zur Betonabschirmung bzw. für größere seitliche Abstände, aber höheren Strahlverlusten als den hier angesetzten 10 %, kann der sich ergebende Grenzwert von 0,5 μSv/h nicht immer eingehalten werden.

Für die Patientegeometrie können folgenden Ergebnisse zusammengefasst werden: Wird ein betrieblicher Überwachungsbereich um die Therapieräume definiert, so kann z.B. mit einer Kombination von 2,2 m Betonabschirmung und 0,75 m Strahlfänger das Limit von 3 $\mu Sv/h$ eingehalten werden. Ist man gezwungen das Limit von 0,5 $\mu Sv/h$ einzuhalten, so hat man z.B. eine Kombination von 3 m Betonabschirmung und 0,8 m Strahlfänger einzuplanen. Die für Kohlenstoffbetrieb ($3{\cdot}10^8$/s) erforderlichen Abschirmungen werden wahrscheinlich auch den für Protonenbetrieb ($1{,}3{\cdot}10^{10}$/s) notwendigen Maßnahmen genügen.

Das in Anlehnung an das Moyer-Modell entwickelte Verfahren stellt in mehrfacher Hinsicht eine stare Vereinfachung des Strahlungstransports dar. So wird die Streustrahlung lediglich in Form der Aufbaufaktoren berücksichtigt. Die Schwächung der Neutronenstrah-

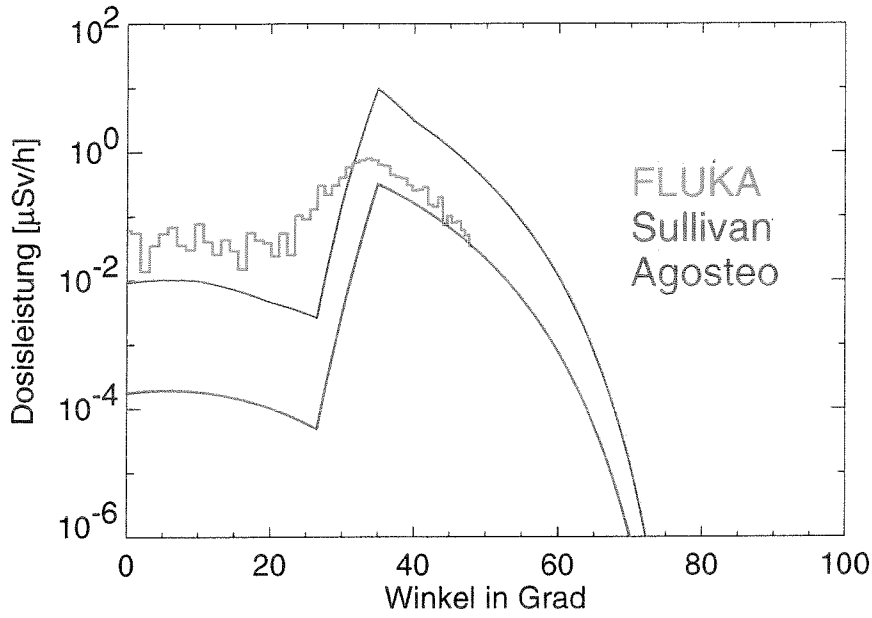


Abbildung 10: Zu erwartenden Dosisleistungen in der Patientengeometrie für Protonenstrahlbetrieb

lung wird im Kupferstrahlfänger überschätzt ebenso die Schwächung in Beton, die nach neueren Arbeiten mit schichtdickenabhängigen Parametern λ berechnet werden müssten. Bei den hier getroffenen Abschätzungen wird nur die Neutronendosisleistung, nicht jedoch die Gammadosisleistung, die bis zu 50 % der Gesamtdosisleistung betragen kann, berücksichtigt.

Ein Vergleich mit Ergebnissen für die Patientengeometrie aus Monte-Carlo-Rechnungen mit Hilfe von FLUKA zeigt, dass die mit dem empirischen Modell berechneten Dosisleistungen eher zu einer Unter- als zu einer Überschätzung der möglichen Strahlenexpositionen führen. Weiterhin sind in den hier durchgeführten Abschätzungen Streueffekte durch andere Anlagen– und Gebäudeteile außer den primären Abschirmungen nicht berücksichtigt. Durch Streuung kann es in bestimmten Bereichen zu größeren als den hier angenommenen Expositionen kommen. Somit sind die Empfehlungen für die notwendigen Abschirmdicken als Minimalwerte anzusehen und gegebenenfalls zu höheren Werten hin zu korrigieren.

Die hier angestellten Überlegungen zum Strahlenschutz in Patientengeometrie sind möglicherweise auch auf den Gebäudebereich des Qualitätssicherungs-Messplatzes zu übertragen, abhängig von den Strahlparametern die dort zum Tragen kommen. Es sind weitere Untersuchungen bezüglich des baulichen Strahlenschutzes notwendig im Bereich der Ionenquellen zur Abschirmung der Röntgenstrahlung sowie Maßnahmen zur Neutronenabschirmung zum Gebäudebereich des Synchrotrons. Eine detaillierte Analyse der Zugangsbereiche zu den Patientenbestrahlungsräumen wie anderen Bereichen wie z.B. Ionenquellen oder Qualitätssicherungs-Meßplatz sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Gruppe aus Chiba für die Überlassung der Neutronenspektren [2] sowie bei Herrn Dr. H. Eickhoff, GSI, für zahlreiche Diskussionen.

Literatur

[1] B. J. Moyer; Evaluation of shielding required for the improved Bevatron, Lawrence Berkley Laboratory Report UCL–9769 (1961)

[2] T. Kurosawa; T. Nakamura; N. Nakao; T. Shibata; Y. Uwamino; N. Nakanishi; A. Fukumura; Y. Kumamoto; Measurement of secondary neutrons produced from thick targets bombarded by heavy ions. Conference Proceedings. International conference on Nuclear data for Science and Technology; Ed. G. Reffo; A. Ventura; C. Grandi; Trieste, May, 1997.

[3] G. Hartmann; DKFZ Heidelberg, persönliche Mitteilung

[4] H. Eickhoff et al., HICAT, Heavy Ion Cancer Therapy Accelerator Facility for the clinic in Heidelberg, Technical Description, interner Bericht ohne Signatur (2000)

[5] IAEA Report 283; Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators; 1988.

[6] Annals of the ICRP; Nr. 51; Data for Use in Protection against External Radiation 1987; Vol. 17 No. 2/3; Pergamon Press.

[7] Annals of the ICRP; Nr. 74; Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation Vol. 26 No. 3/4, 1996; Pergamon Press.

[8] A.V. Sannikov, E.N. Savitskaya; Ambient Dose Equivalent Conversion Factors for high energy Neutrons based on the new ICRP Recommendations; IHEP 95-98, Protvino 1995.

[9] A. Ferrari, M. Pellicioni; Fluence to Dose equivalent Conversion Data and effective Quality Factors for high energy Neutrons, Rad.Prot.Dos., Vol. 76, No. 4, 215-224, 1998.

[10] T. Kato, T. Nakamura; Analytical method for calculating neutron bulk shielding in a medium-energy accelerator facility; Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 174 (2001) 482-490.

[11] Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. ICRU Report 39, Bethesda (1985).

[12] S.J. Lindenbaum, Shielding of High Energy Accelerators, Ann. Rev. Nucl. Sci. 11, 213 (1961).

[13] H. Wade Patterson and Ralph H. Thomas; Accelerator Health Physics; Academic Press New York/London; 1973.

[14] H. Reich, Dosimetrie ionisierender Strahlung; B.G. Teubner, Stuttgart, 1990, S. 362.

[15] H.P. Weise, R. Neider; Abschirmung des geplanten Schwerionen-Synchrotrons der Gesellschaft für Schwerionenforschung; Gutachten der Bundesanstalt für Materialprüfung BAM, Berlin; 11.06.1986.

[16] A.H. Sullivan, A Guide to Radiation and Radioactivity Levels near High Energy Particle Accelerators, Nuclear Technology Publishing Ashford, Kent (1992).

[17] A. Fasso, J. Ferrari, J. Ranft, P.R. Sala; FLUKA: Present Status and future developments; Proc. IV Int. Conf. on Calorimetry in High Energy Physics, La Biodala (Italy) 21-26 September 1993, Ed. A. Menzione and A. Scribano, World Scientific, p. 493-502.

[18] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft, P.R. Sala: New developments in FLUKA, modelling hadronic and EM interactions Proc. 3rd Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, KEK, Tsukuba (Japan) 7-9 May 1997. Ed. H. Hirayama, KEK Proceedings 97-5 (1997), p. 32-43.

[19] S. Agosteo, A. Fasso, A. Ferrari, P.R. Sala, M. Silari, P. Tabarelli de Fatis; Attenuation curves in concrete for neutrons produced by 710 MeV α-particles on steel and water and by 337-390 MeV/u Ne ions on Al, Cu and Pb; Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 155 (1999) 102-109.

[20] S. Agosteo, C. Birattari, M.G. Corrado, M. Silari; Maze design of a gantry room for proton therapy; Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 382 (1996) 573-582.

[21] Stefano Agosteo, Gianluigi Arduini, Giorgio Bodei, Stefano Monti, Franca Padoani, Marco Silari, Renato Tinti, Giuliana Tromba; Shielding calculations for a 250 MeV hospital-based proton accelerator; Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 374 (1996) 254-268.

[22] S. Agosteo, A. Fasso, A. Ferrari, P.R. Sala, M. Silari, P. Tabarelli de Fatis; Double differential distributions and attenuation in concrete for neutrons produced by 100-400 MeV protons on iron and tissue targets; Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 114 (1996) 70-80.

[23] A.B. Chilton; Principles of Radiation Shielding; Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, USA, 1984.