

Sicherheit gegenüber ionisierender Strahlung an der TESLA Test Facility, Phase 2 (TTF 2)

A. Leuschner
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Auszug

DESY plant, die TESLA-Test-Facility in ihrer 2. Phase auszubauen. Durch eine Verlängerung kann der Linearbeschleuniger dann Elektronenenergien bis zu 1.6 GeV erreichen. Die Nutzungsschwerpunkte liegen im Test von Beschleunigerkomponenten für den Linear-Collider TESLA und im später zunehmenden Betrieb des Freie-Elektronen-Lasers. Die Aspekte des Strahlenschutzes hinsichtlich einer Änderung des Betriebes werden hier behandelt. Eine Besonderheit von TTF 2 besteht darin, daß sie den bereits existierenden Ringbeschleuniger PETRA kreuzt. Das Strahlenschutzkonzept ist so ausgerichtet, daß sich die beiden Beschleuniger so gering wie nötig beeinträchtigen.

1 Allgemeine Bemerkungen zum Beschleunigerbetrieb

Der Beschleuniger "TESLA Test Facility" in seiner ersten Ausbaustufe (TTF 1) ist in dem Gebäude 28 aufgebaut. In einer 2. Ausbauphase (TTF 2) wird der Linac zu höheren Energien erweitert. Deshalb wird der jetzt 110 m lange Beschleunigerraum bis zum PETRA-Tunnel auf 260 m verlängert. Ein wesentliches Anwendungsziel wird sein, den Beschleuniger als Freie-Elektronen-Laser (FEL) zu nutzen [1]. Es ist geplant, den im Erweiterungsbau produzierten FEL-Strahl (Photonen) in einem Vakuumrohr in gerader Richtung durch den PETRA-Tunnel hindurch, in die Experimentierhalle (FEL-Halle) auf der Außenseite des PETRA-Rings zu führen. Der Elektronenstrahl verläßt den LINAC-Tunnel nicht, sondern wird dort nach unten auf einen Strahlabsorber, den Hauptabsorber, gelenkt. (siehe Abbildungen 1 und 2).

Damit ergeben sich im wesentlichen, wie in der Abbildung 5 skizziert, die Betriebsarten:

- Der **FEL-Betrieb**, bei dem der Elektronenstrahl die Undulatorsektion durchläuft, dabei den FEL-Strahl (Laserlicht mit Wellenlängen in der Größenordnung von 10 nm) erzeugt, und schließlich in den Hauptabsorber gelenkt wird. Der FEL-Strahl gelangt von hier aus quer durch den PETRA-Tunnel in die FEL-Halle.
- Der **Linac-Betrieb**, bei dem der Elektronenstrahl durch den Bypass an den Undulatoren vorbei in den Hauptabsorber geführt wird. Hier stehen Maschinenstudien (Beschleunigungs-module, Injektor u.s.w.) im Vordergrund.

In keiner der Betriebsarten soll der PETRA-Betrieb beeinflußt werden. Insbesondere soll die PETRA-Kreuzung unabhängig vom TTF 2 Betrieb passierbar bleiben. Und umgekehrt soll der Zugang zu TTF 2 Gebieten bei gleichem PETRA-Betrieb möglich sein.

2 Planziele für die Ortsdosen

Um den in der Strahlenschutzverordnung festgeschriebenen Strahlenschutzgrundsätzen zu folgen, wird die Konzeption des Strahlenschutzes und damit die Festlegung von Strahlenschutzbereichen auf der Basis von Planungszielen erarbeitet. Sie werden aus den gesetzlichen Grenzwerten abgeleitet und mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. Ein solches Planungsziel hat dann nicht mehr den Charakter eines Grenzwertes, sondern den eines Richtwertes, mit dem z.B. die Dicke einer Abschirmung berechnet wird.

2.1 Auf dem DESY-Gelände

Die Abschirmung, der Strahlabsorber und die Strahlverschlüsse sollen so ausgelegt sein, daß durch den Strahlbetrieb von TTF 2 außerhalb der Beschleunigergebäude keine Kontrollbereiche eingerichtet werden müssen. Hier gilt folgender gesetzlicher Grenzwert: Nach der Strahlenschutzverordnung ist ein Kontrollbereich einzurichten, wenn eine

Personendosis > 6 mSv pro Arbeitsjahr

auftreten kann. Dabei ist von einer Aufenthaltsdauer von 40 h pro Woche im 50 Wochen im Kalenderjahr auszugehen, sofern keine anderen begründeten Angaben über die Aufenthaltszeit vorliegen.

Der TTF 2 Beschleuniger wird im 24 h Schichtdienst betrieben. Unter Voraussetzung eines ganzjährigen Betriebes und gleichmäßiger zeitlicher Verteilung ist ein Kontrollbereich einzurichten, wenn die Ortsdosis höher als 24 mSv im Kalenderjahr ist. Dies gilt, wenn sich dort Personen das gesamte Arbeitsjahr (2000 h) aufhalten können. Als Planungsziel wird definiert, daß ein **Kontrollbereich** ab einer

$$\text{Ortsdosis} > 4 \text{ mSv pro Kalenderjahr}$$

eingerrichtet wird.

Diese Betrachtungen gelten für konstante Strahlungsfelder bei normalen Betriebsbedingungen. Es können aber auch einmalige Ereignisse auftreten, die zu kurzzeitig erhöhten Dosen führen und deshalb zum Festlegen von Kontrollbereichen berücksichtigt werden müssen. Beim Bestimmen des Planungsziels für ein einmaliges Ereignis geht man davon aus, daß ein solches viel seltener als einmal pro Monat auftritt und daß Ortsdosis und Personendosis für ein Ereignis gleich sind. Deshalb muß ein Kontrollbereich eingerichtet werden, wenn die

$$\text{Personendosis} > 0.5 \text{ mSv pro Ereignis}$$

werden kann. Als Planungsziel wird hier definiert, daß ein **Kontrollbereich** ab einer

$$\text{Ortsdosis} > 0.12 \text{ mSv pro Ereignis}$$

eingerrichtet wird.

2.2 An der Geländegrenze

Der kleinste Abstand eines TTF 2 Kontrollbereichs zur Geländegrenze beträgt etwa 50 m. Mit den oben genannten Planungszielen werden die gesetzlichen Grenzwerte an der Geländegrenze sicher eingehalten.

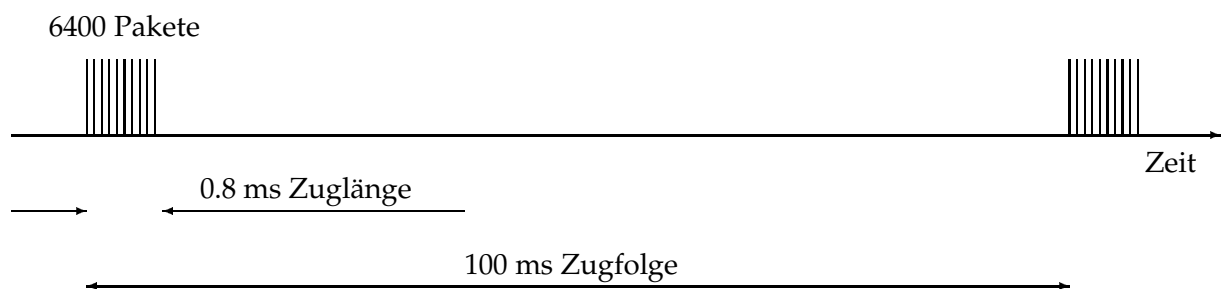
3 Betriebsparameter

In der folgenden Tabelle sind die Betriebsparameter von TTF 2 zusammengestellt, wobei die Parameter von TTF 1 [2] in Klammern hinzugefügt sind. Zwei wesentliche Veränderungen sind herauszustreichen: Die Energie der beschleunigten Elektronen wird verdoppelt und auf der anderen Seite soll der experimentelle Charakter des Beschleunigers letztlich zugunsten eines Nutzerbetriebes für den Freie-Elektronen-Laser aufgegeben werden, was sich in der längeren Betriebsdauer äußert. Für den Strahlenschutz sind nur die maximale Teilchenenergie von 1.6 GeV, die maximale

Teilchenart:	Elektronen	
Ladung pro Teilchenpaket (bunch): 1 nC	= $1 \times 10^{-9} \text{ As}$	= $6.2 \times 10^9 \text{ e}$
Teilchenpakete pro Zug (train)	= 6400	= $4.0 \times 10^{13} \text{ e}$
Länge eines Zuges	= 0.8 ms	
Wiederholfrequenz der Züge	= 10 Hz	
⇒ Zugfolgezeit	= 100 ms	
⇒ mittlere Teilchenrate	= $4.0 \times 10^{14} \text{ e/s}$	= $1.4 \times 10^{18} \text{ e/h}$
⇒ mittlerer Strom	= $64 \mu\text{A}$	
Energie	= 1.6 GeV	(TTF 1: 0.8 GeV)
⇒ Leistung	= 102 kW	(TTF 1: 51 kW)
Betriebszeit	= 7200 h/a	(TTF 1: 1000 h/a)
⇒ Beschleunigte Teilchen	= $1.0 \times 10^{22} \text{ e/a}$	(TTF 1: $1.4 \times 10^{21} \text{ e/a}$)

Anzahl der beschleunigten Elektronen von 4.0×10^{14} pro Sekunde und die maximale Betriebsdauer von 7200 Stunden pro Jahr von Bedeutung. Diese drei Schlüsselparameter allein bestimmen ursächlich die Strahlungsfelder an TTF 2. Alle anderen Parameter können variiert werden, solange diese drei Grenzen eingehalten werden.

Zeitliche Strahlstruktur wird in folgender Skizze gezeigt:



4 Abschirmung des Beschleunigers

Der bisher schon im Betrieb befindliche Teil des Beschleunigers (TTF 1) befindet sich im Gebäude 28. Er bleibt in seinen Betriebsparametern mit Ausnahme der Betriebszeit unverändert bestehen, an seiner Abschirmung ändert sich nichts. Im folgenden wird nur der Teil des Beschleunigers betrachtet, der sich zwischen Gebäude 28 und dem PETRA-Ring befindet (s.Abb.1).

4.1 Grundlagen der Berechnungen

Die Berechnungen der Abschirmungen wurden mit den Methoden durchgeführt, die bei DESY etabliert sind und die sich in der Vergangenheit bewährt haben. Dabei werden Formeln benutzt, deren Parametern aus experimentellen Daten und aus Monte Carlo Simulationen gewonnen wurden.

Die so berechneten Werte sind Näherungswerte, da im allgemeinen geometrische Vereinfachungen vorgenommen wurden. Dieses Verfahren ist vereinbar mit dem Rahmen der Genauigkeit, der durch Annahmen über Strahlverluste gegeben ist. Die Höhe des Strahlverlusts ist der entscheidende Parameter für die Berechnung der Dosis an einem bestimmten Ort. Daher müssen hier plausible konservative Annahmen über die Anzahl der wechselwirkenden Teilchen gemacht werden. Dazu definiert man im allgemeinen einen wahrscheinlichsten Fall (Normalfall) des Strahlverlustes und nimmt zur Abschätzung der höchstmöglichen Dosiswerte einen, im allgemeinen technisch nicht realisierbaren, pessimistischsten Fall (worst case), den totalen, punktförmigen Strahlverlust an.

Bei der Wechselwirkung hochenergetischer Elektronen mit Materie entstehen sekundäre Teilchen, von denen zur Berechnung von lateralen Abschirmungen im wesentlichen 3 Kategorien zur Dosis beitragen:

- Elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen: Elektronen, Positronen, Photonen
- Neutronen aus Kernphotoeffekten (Riesenresonanzneutronen)
- Neutronen aus Kaskadenprozessen, mit ihren Gleichgewichtsteilchen

Diese Reaktionen haben verschiedene Wirkungsquerschnitte und ihre Teilchen folgen damit in Materie verschiedenen Schwächungskoeffizienten. Nähere Untersuchungen zeigen, daß nach einer gewissen Abschirmdicke die hochenergetischen Neutronen aus den Kaskadenprozessen dominieren und die beiden anderen Kategorien dagegen vernachlässigt werden können (das ist die Definition für "dicke Abschirmung").

Beschleuniger sind im allgemeinen nach außen hin dick abgeschirmt. Nach wenigen Metern Sand muß, wie es bei TTF 2 der Fall ist, nur noch die hochenergetische Neutronenkomponente betrachtet werden.

Die Näherungsformeln zur Bestimmung der Dosen sind in Lit.[3, 4] beschrieben. Die folgenden Rechnungen wurden nach Lit.[3] durchgeführt. Die Dosis H_n , erzeugt durch hochenergetische Neutronen hinter dicker lateraler Abschirmung, ist:

$$H_n = n_e \cdot h_o \cdot \frac{E}{E_o} \cdot f_T \cdot \left(\frac{1}{r}\right)^2 \cdot \exp(-x\rho/\lambda) \quad (1)$$

Die Bedeutung der Symbole und deren Werte sind im folgenden aufgelistet:

n_e		Zahl der wechselwirkenden Elektronen
h_o	$= 4.0 \times 10^{-13} \text{ Sv cm}^2$	Dosisterm
E	$= 1.6 \text{ GeV}$	Energie der Elektronen
E_o	$= 1.0 \text{ GeV}$	Bezugsenergie
f_T		Targeteffizienz
	$= 0.1$	Linienquelle
	$= 1.0$	Absorber
r		Abstand Quelle-Aufpunkt
x		Dicke der Abschirmung (in lateraler Richtung)
ρ		Dichte des Abschirmmaterials
	$= 1.8 \text{ g/cm}^3$	Sand
	$= 2.4 \text{ g/cm}^3$	Beton
	$= 3.7 \text{ g/cm}^3$	Schwerbeton
λ		Schwächungskoeffizient
	$= 100 \text{ g/cm}^2$	Sand
	$= 100 \text{ g/cm}^2$	Beton
	$= 110 \text{ g/cm}^2$	Schwerbeton

4.2 Abschirmung des Beschleunigertunnels

Die Beschleunigerröhre liegt auf Straßenniveau und ist durch eine Sandaufschüttung abgeschirmt, wie in der Abbildung 3 skizziert. Im Querschnitt ist die Aufschüttung trapezförmig angeordnet, so daß die dünnste Stelle schräg nach oben und senkrecht nach oben 3 m beträgt. An der Stelle der früheren Ringstraße kann der Wall mit einer Treppe überquert werden. Durch eine zusätzliche Aufschüttung zwischen der Treppe und der FEL-Halle beträgt die Abschirmung nach oben dort 4 m. Folgende Positionen (s.Abb.3) wurden hinsichtlich Jahresdosis und momentaner Dosisleistung untersucht:

1. Der **Treppenaufgang** an der Stelle der geringsten Abschirmdicke. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit einer Person an dieser Stelle ist gering, nur während der Benutzung der Treppe wird diese Stelle passiert. (Abstand: 500 cm, Abschirmung: 30 cm Beton + 300 cm Sand)
2. Der **Weg auf der Wallkrone** zwischen der Treppe und der FEL-Halle. Hier muß eine höhere Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen angenommen werden, zumal an die FEL-Halle eine Aussichtsplattform angrenzt. (Abstand: 600 cm, Abschirmung: 30 cm Beton + 400 cm Sand)
3. Das **Gelände auf dem Wall**, zwischen dem Treppenübergang und dem Gebäude 28. Dieser Bereich ist bewachsen, es sind keine Installationen angebracht. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen ist hier sehr gering. Dieser Bereich kann auch gesperrt werden. (Abstand: 500 cm, Abschirmung: 30 cm Beton + 300 cm Sand)
4. Die **Gebiete seitlich vom Wall auf Straßenniveau**. Der Aufenthalt darf hier keiner Limitierung unterliegen. (Abstand: 800 cm, Abschirmung: 30 cm Beton + 600 cm Sand)

4.3 Strahlverlustannahmen

Als Normalfall für den Strahlverlust wird angenommen, daß in einem warmen Teil des Beschleunigers ständig 0.3 % des Elektronenstrahls vom Transmissionsmeßsystem unerkannt verloren geht

(s. Abschnitt 5.4.2). Es wird nicht unterschieden, in welchem der beiden Strahlrohre, Undulatorsektion oder Bypass, das passiert. Dabei wird weiter angenommen, daß der Strahl am Vakuumrohr anstreift und so eine Linienquelle von typischerweise 20 m Länge bildet, die von keiner Beschleunigerkomponente abgeschirmt wird. Zur Berechnung werden 5 m dieser Linienquelle zu einer Punktquelle zusammengefasst, die in guter Näherung die Dosis an den genannten Stellen erzeugt, da der Abstand von der Quelle bis zum Aufpunkt etwa 5 m beträgt.

Bei einem punktförmigen Verlust des gesamten Strahls (worst case) kann nicht angenommen werden, daß der Zustand längere Zeit aufrecht erhalten werden kann, denn bei einer mittleren Strahlleistung von 102 kW wird ein Strahlverlust dieser Art schnell zur Zerstörung der Vakuumkammer führen. Zur Abschätzung der Dosis wird deshalb angenommen, daß der Vorgang nach 1/10-tel Stunde zu Ende ist.

Strahlverlust im Normalfall	7.5×10^{18} e/a
Totalverlust	1.4×10^{17} e pro Vorfall

Damit ergeben sich folgende Dosen und Dosisleistungen:

Verlust		1 Elektron	Normalfall	Totalverlust
Ort		Dosis [Sv]	Dosis pro Jahr [mSv]	Dosis pro Vorfall [mSv]
1	Treppenaufgang	5.6×10^{-22}	4.2	0.079
2	Weg auf der Wallkrone	6.5×10^{-23}	0.48	0.009
3	Gelände auf dem Wall	5.6×10^{-22}	4.2	0.079
4	Gebiete seitlich auf Straßenniveau	1.0×10^{-24}	0.008	0.0002
Ziel		–	4.0	0.120

Man sieht, daß das in Kapitel 2 definierte Ziel an allen Stellen erreicht ist. An den Orten mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen (Ort 2 und 4) liegen die Dosen deutlich darunter. Die Dosen, die bei einem totalen Strahlverlust erreicht werden, sind dagegen klein, da nur ein Vorfall betrachtet werden muß.

4.4 Abschirmung des Hauptabsorbers

Der Hauptabsorber besteht aus einem Graphitzylinder, umgeben von Aluminium und Kupfer (Gesamtabmessungen: Länge = 180 cm; Durchmesser = 50 cm). Seine äußere Mantelfläche wird mit Wasser gekühlt. Er ist so dimensioniert, daß er die Energie von einem 1.6 GeV-Elektronenstrahl zu 99 % absorbiert.

Er befindet sich in einer Grube am Ende des Beschleunigertunnels, die nach oben mit 1.6 m Beton abgedeckt ist (Abstand: 1000 cm, Abschirmung: 160 cm Beton + 30 cm Beton + 400 cm Sand). Als Strahlverlust muß dabei der totale Strahl von 1.0×10^{22} e/a eingesetzt werden. Daraus ergibt sich für den Ort 2 über dem Absorber

Verlust		1 Elektron	
Ort		Dosis [Sv]	Dosis pro Jahr [mSv]
2	Weg auf der Wallkrone	5.0×10^{-25}	5.0
Ziel		–	4.0

Dabei ist weder die Selbstabsorption noch der Neigungswinkel des Absorbers berücksichtigt worden. Daher kann mit dem Beitrag des Absorbers an Ort 2 (Weg zwischen Treppe und FEL-Halle) das Ziel von 8 mSv/a erreicht werden.

4.5 Abschirmung des Transportweges

Die Abschirmung des Transportweges besteht aus zwei Teilen, einmal der Abschirmung des Bogens zum Gebäude 49 hin und zum andern aus der Abschirmung des Zugangstors. Die seitliche Abschirmung besteht aus Schwerbetonsteinen, die so angeordnet sind, daß zusammen mit der Tunnelwand eine effektive Abschirmdicke von 200 cm entsteht (Abstand: 600 cm). Die Abschirmung für das Zugangstor befindet sich nahe des Beschleunigers und besteht aus Schwerbeton mit einer Gesamtdicke von 80 cm (Abstand: 3400 cm). Als Strahlquelle für den Normalfall wird wieder eine 0.3%ige Linienquelle angenommen. Der totale, punktförmige Strahlverlust soll wieder maximal 1/10-tel Stunde andauern können. Damit ergeben sich folgende Resultate:

Verlust		1 Elektron	Normalfall	Totalverlust
Ort		Dosis [Sv]	Dosis pro Jahr [mSv]	Dosis pro Vorfall [mSv]
	Zugangstor	7.5×10^{-22}	5.6	0.106
	Seitliche Abschirmung	4.2×10^{-22}	3.1	0.058
Ziel		–	4.0	0.120

Auch hier ist das in Kapitel 2 definierte Ziel erreicht worden.

5 Internes Sicherheitskonzept

5.1 Konzept des Elektronenstrahleinschlusses

Die Strahlführung in TTF 2 ist in der Abbildung 5 gezeigt. Die Maschine kann in 2 Hauptbetriebsarten gefahren werden:

- **FEL-Betrieb:** Der Elektronenstrahl kommt von rechts, durchläuft nach dem Energiekollimator die Undulatorsektion und wird dann durch den Magneten "D6DUMP" in den Hauptabsorber gelenkt. In der Undulatorsektion (FEL) wird die FEL-Strahlung für die Nutzer erzeugt. Sie läuft im Magneten "D6DUMP" geradeaus, passiert den geöffneten Strahlverschluß "BSH9FLIN" und erreicht die FEL-Halle.
- **LINAC-Betrieb:** Der Elektronenstrahl kommt von rechts, wird von den Magneten "D1BYP" und "D2BYP" in den Bypass und von dort mittels "D1DUMP" in den Hauptabsorber gelenkt. Der Strahlverschluß "BSH9FLIN" ist geschlossen.

Desweiteren ist es möglich, den FEL in längeren Inbetriebnahmephasen aufzusetzen. Der FEL-Strahl wird bereits im LINAC-Tunnel analysiert und nicht Richtung FEL-Halle weitergeleitet. Um die Gebiete hinter dem LINAC-Tunnel zu sichern, wird das FEL-Strahlrohr hinter dem Strahlverschluß "BSH9FLIN" demontiert und durch eine Bleiabschirmung ersetzt. Damit ergibt sich eine weitere Betriebsart

- **Inbetriebnahme:** Der Elektronenstrahl kommt von rechts, durchläuft nach dem Energiekollimator die Undulatorsektion und wird dann durch den Magneten "D6DUMP" in den Hauptabsorber gelenkt. In der Undulatorsektion (FEL) wird die FEL-Strahlung erzeugt. Sie läuft im Magneten "D6DUMP" geradeaus und wird vor dem geschlossenen Strahlverschluß "BSH9FLIN" analysiert.

Unabhängig von der Betriebsart muß der Strahlenschutz für die Gebiete, in denen sich das FEL-Strahlrohr befindet (PETRA-Kreuzung, FEL-Strahlverteilung, FEL-Halle), auf die Wirkungen von Bremsstrahlung, nicht aber von Primärelektronen ausgelegt werden. Voraussetzung dafür sind Maßnahmen, die einen Transport des primären Elektronenstrahls durch das FEL-Strahlrohr aus dem LINAC-Tunnel verhindern, genannt Elektronenstrahleinschluß. Dieses Sicherheitssystem ist redundant ausgelegt bestehend aus einem aktiven und einem passiven System.

5.1.1 Aktives System

Der Dipol "D6DUMP" muß das der Strahlenergie entsprechende Magnetfeld erzeugen, um den Strahl auf den Hauptabsorber abzulenken. Für das Sicherheitskonzept wird ausgenutzt, daß die Magnetfelder von "D1ECOL" und "D7ECOL" auf der einen und das von "D6DUMP" auf der anderen Seite zueinander im gleichen Verhältnis stehen müssen. Paßt die Energie des Elektronenstrahls nicht zu den Magnetfeldern der Dipole, dann geht der Strahl in der Kollimatorstrecke verloren und kann somit nicht in das FEL-Strahlrohr und darin in die FEL-Halle gelangen. Für die Ideallinie wird als Maß für die Elektronenenergie der Magnetstrom von den Dipolen "D1ECOL" und "D7ECOL" verwendet. Dieser wird auf den Sollstrom von "D6DUMP" skaliert und mit dessen Iststrom verglichen. Bei einer Abweichung von mehr als 10% wird der TTF-Betrieb auf elektronischem Wege unterbrochen.

5.1.2 Passives System

Für den äußerst unwahrscheinlichen Fall des Versagens des aktiven Systems ist der Dipolmagnet "D2FLIN" in die FEL-Strahlführung eingesetzt. Sein Magnetfeld wird durch Permanentmagnete erzeugt. Ein 1.6 GeV Elektronenstrahl würde hier mit einem Winkel von mindestens 12 mrad horizontal* abgelenkt und dann mit einer Ablage von 4 cm auf einen Kollimator treffen. Sowohl die große Ablage als auch der zum Konus der Bremsstrahlung ($m_e c^2 / E = 0.511 \text{ MeV} / 1.6 \text{ GeV} = 0.3 \text{ mrad}$) große Ablenkwinkel (12 mrad) verhindern den Transport der Bremsstrahlung durch das FEL-Strahlrohr.

Es ist bekannt, daß Strahlenschäden in Permanentmagneten zu deren Demagnetisierung führen. Daher sind besondere Maßnahmen getroffen, um die Langzeitstabilität des Magnetfeldes von "D2FLIN" zu garantieren:

*Eine Kompensation des "D6DUMP" ist ausgeschlossen, da dieser vertikal ablenkt.

- Der Dipol ist so konstruiert, daß die Permanentmagnete etwa 50 cm Abstand zum Strahlrohr haben (s.Abb.2, Schnitt C-C). Das Magnetfeld im Strahlrohr wird von den Polschuhen aus Eisen aufgebaut.
- Das Magnetfeld des Dipols wird einmal jährlich vermessen.

5.2 Konzept der Bremsstrahlungsabschirmung

Wie bereits oben erwähnt, hat die Bremsstrahlung von 1.6 GeV Elektronen einen Öffnungswinkel von 0.3 mrad. Nach 40 m Driftstrecke hat der Konus einen Durchmesser von 2.5 cm. Also gelangt die Bremsstrahlung in der FEL-Strahlführung ungehindert bis zum ersten Spiegel ("MIR3FBD") und wird dort gestreut. Die Gebiete von TTF 2, in denen die FEL-Strahlführung verläuft, sind in der Abbildung 2 gezeigt. Ziel der Strahlenschutzmaßnahmen ist es, sie in folgender Weise zu sichern:

- Der **LINAC-Tunnel** ist generell bei Betrieb ein durch Interlock gesicherter Sperrbereich, sonst wegen der induzierten Radioaktivität Kontrollbereich [†].
- Die **PETRA-Kreuzung** wird hinsichtlich TTF 2 zu einem Kontrollbereich erklärt. Dieses Gebiet erstreckt sich 10 m zu beiden Seiten des PETRA-Tunnels. Dieser Status ist unabhängig von TTF 2 Betriebsarten.
- Die **FEL-Strahlverteilung** (FBD) ist nur in der Betriebsart "FEL" ein durch ein Interlock gesicherter Sperrbereich. In allen anderen Fällen ist dieses Gebiet Kontrollbereich [‡]. Wesentliche Sicherheitskomponente ist der Strahlverschluß "BSH9FLIN". Er ist so positioniert, daß er nicht vom primären Elektronenstrahl getroffen werden kann (s.Abb.2).
- Das **Hauptgebiet 1** (HG 1) in der FEL-Halle ist nur bei geöffnetem Strahlverschluß "BSH1" in der Betriebsart "FEL" ein durch ein Interlock gesicherter Sperrbereich, sonst Überwachungsbereich. Es ist mit einem Gitterzaun abgesperrt.
- Das **Hauptgebiet 2** (HG 2) in der FEL-Halle ist nur bei geöffnetem Strahlverschluß "BSH2" in der Betriebsart "FEL" ein durch ein Interlock gesicherter Sperrbereich, sonst Überwachungsbereich. Es ist mit einem Gitterzaun abgesperrt.
- Der Rest der **FEL-Halle** ist Überwachungsbereich.

5.3 Konzept der Abschirmung der FEL-Strahlung

TTF 2 erzeugt mit den in Kapitel 3 angegebenen Betriebsparametern FEL-Strahlung mit der Grundharmonischen von 2.4 nm, was einer Energie von 0.5 keV entspricht. Die mittlere maximale Leistung des FEL kann 40 W betragen. Die FEL-Strahlung ist in einem Vakuumsystem eingeschlossen, so daß dessen Wände eine perfekte Abschirmung darstellen. Zur Beurteilung sei die Zehntelwertsschichtdicke von 1 keV Photonen in Eisen von etwa 0.3 μm angegeben.

[†]und wegen Direktstrahlung vom Ringbeschleuniger PETRA.

[‡]Das ist auf den Ringbeschleuniger PETRA und nicht auf TTF 2 zurückzuführen.

Bei der Leistungsdichte der FEL-Strahlung, die TTF 2 erreichen kann, ist mikroskopisch Ablation beobachtet worden. Pro Teilchenpaket ist ein Materialabtrag von 10 nm zu erwarten. Skaliert man dies auf makroskopische Dimensionen, wuerde der FEL-Strahl z.B. durch den Strahlverschluß "BSH9FLIN" innerhalb von 5 min ein Loch schneiden. Aus diesem Grunde darf bei den Hauptbetriebsarten "FEL-Betrieb" und "LINAC-Betrieb" der Strahlverschluß "BSH9FLIN" vom FEL-Strahl nicht getroffen werden. Nur in der Betriebsart "Inbetriebnahme" kann das geschehen. Hier ist die Sicherheit dadurch gegeben, daß das Strahlrohr hinter dem Strahlverschluß abgebaut ist. Der FEL-Strahl würde dann in wenigen Zentimetern Luft absorbiert werden, sollte er Strahlverschluß und Endflansch durchbohrt haben. Die verbleibende Bremsstrahlung wird von einem Bleistapel abgeschirmt. Vor einem Betriebsartenwechsel "Inbetriebnahme" in eine der beiden Hauptbetriebsarten ist der Strahlverschluß "BSH9FLIN" einer Sichtkontrolle zu unterziehen.

5.4 Strahlverlustszenarien und Dosisberechnungen

Um Maßnahmen treffen zu können, die die Sicherheit von Personen gewährleisten, müssen die Dosisfelder in den entsprechenden Gebieten für verschiedene Strahlverlustszenarien berechnet werden. Es werden nur die Zustände betrachtet, die das höchste Gefährdungspotential darstellen.

Wenn einfache Faustformeln zur Dosisberechnung nicht zur Verfügung stehen, ist man auf Monte-Carlo Programme, hier FLUKA99, Version 7.1 [5, 6], angewiesen.

5.4.1 Gasbremsstrahlung aus der Undulatorsektion

Bei der Abschätzung der Dosen durch Gasbremsstrahlung kann auf umfangreiche Monte-Carlo Rechnungen vom SLAC[§] [7] zurückgegriffen werden, die speziell für Synchrotronstrahlungsquellen durchgeführt wurden. Die γ -Dosisleistung im Bremsstrahlungskonus berechnet sich nach der Formel

$$\dot{H} = \dot{h}_\gamma(E) \cdot I \cdot L \cdot p \quad (2)$$

Die Bedeutung der Symbole und deren Werte sind im folgenden aufgelistet:

E	=	1.6 GeV	Energie der Elektronen
$\dot{h}_\gamma(1.6\text{GeV})$	=	$1 \frac{\text{Sv/h}}{\text{A}\cdot\text{m}\cdot\mu\text{Pa}}$	spezifische Konversionskonstante
I	=	64 μA	mittlerer Strahlstrom
L	=	45 m	Länge der Undulatorsektion
p	=	10 μPa	mittlerer Druck im Strahlrohr

Mit diesen Werten erhält man eine Dosisleistung von $\dot{H} = 28.8 \text{ mSv/h}$, die zu einer Jahresdosis von etwa 200 Sv führt. Diese Dosis ist ein rein hypothetischer Wert, sie würde für eine Person auflaufen, die sich in der FEL-Strahlverteilung an der Position des Spiegels "MIR3FBD" (s.Abb.2 und 4, Pos.3) befände, was in der Realität durch das Interlocksystem verhindert wird. Dieser Wert bekommt erst durch die im nächsten Abschnitt folgende Monte-Carlo-Simulation eine praktische Bedeutung.

[§]Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, Kalifornien

5.4.2 Strahlverlust in der Undulatorsektion

Hier werden sämtliche Möglichkeiten eingeschlossen, bei denen der Primärstrahl auf festes Material trifft (Restgas s.o.). Denkbar ist das Auftreffen des Elektronenstrahls an der Strahlrohrwand durch fehlerhafte Strahloptik oder der Einsatz von Wire-Scannern, wobei zu Diagnosezwecken ein dünner Wolframdraht durch den Strahl gefahren wird.

Für eine konservative Abschätzung wird angenommen, daß ein nadelförmiger Strahl unter einem im Vergleich zum Bremsstrahlungskonus (0.3 mrad) kleinen Winkel von 0.01 mrad auf die Strahlrohrwand (Innendurchmesser: 1.0 cm) trifft. Dadurch gelangt ein Großteil der Bremsstrahlung ohne weitere Wechselwirkungen in der FEL-Strahlführung bis auf den Spiegel "MIR3FBD" in der FEL-Strahlverteilung.

Seitens der Maschine werden große Anstrengungen unternommen, um Strahlverluste in der Undulatorsektion zu vermeiden, denn sie führen zur Demagnetisierung der eng am Strahlrohr anliegenden Permanentmagnete. Das bedeutet, daß die Undulatoren für die Erzeugung der FEL-Strahlung unbrauchbar werden. Zum ersten wird ein Kollimatorsystem eingesetzt, daß den Elektronenstrahl vor Eintritt in die Undulatorsektion reinigt. Zum zweiten gibt es ein spezielles Strahlverlustmonitorsystem im Bereich der Undulatoren, daß bei Verlusten von 10^{-6} des Strahlstroms, entsprechend 10^{16} Elektronen im Jahr, den Beschleuniger abschaltet. Und drittens ist ein davon unabhängiges Transmissionssystem installiert, daß auf dem Niveau von 3×10^{-3} des Strahlstroms wirksam wird. Beide Monitorsysteme sind nicht Bestandteil des Personensicherheitssystems, sie werden aber hier in Betracht gezogen, um Strahlverluste abzuschätzen.

Zur Sicherung der Qualität der Undulatoren wird pro Jahr eine maximale Energiedosis von 10 kGy in den Permanentmagneten festgesetzt. Bei einer Strahlenergie von 1.6 GeV entspricht das einem Verlust von 10^{16} Elektronen, wenn man annimmt, daß der Verlust über die gesamte Undulatorlänge von 45 m gleich verteilt ist. Es sei betont, daß diese Gleichverteilung ein konservatives Moment darstellt: Denn ein lokaler Verlust gleicher Intensität würde den entsprechenden Undulator schädigen. Für den Normalfall wird dementsprechend ein Strahlverlust von 1.0×10^{16} Elektronen konservativ abgeschätzt. Als einmaliger Vorfall wird angenommen, daß das Strahlverlustmonitorsystem ausgefallen ist und nur das Transmissionssystem wirksam ist. Bei 1/10 Stunde langem Betrieb an der Grenze des Transmissionssystems läuft ein Verlust von 4.2×10^{14} Elektronen auf.

Strahlverlust im Normalfall	1.0×10^{16} e/a
Teilverlust	4.2×10^{14} e pro Vorfall

In der Abbildung 7 ist das Dosisprofil durch elektromagnetische Strahlung (e^{\pm}, γ) für den Normalfall dargestellt. Man erkennt deutlich die charakteristischen, nach vorwärts gerichteten Konturen. Die Abbildung 8 zeigt das zugehörige Dosisprofil durch Neutronen, die durch die Photonen (γ) der Bremsstrahlung erzeugt werden. Im Gegensatz zur elektromagnetischen Kaskade erfolgt die Emission der Neutronen nahezu isotrop, was sich in eher kreisrunden Konturen äußert. Die Dosiswerte an interessanten Positionen sind in der folgenden Tabelle eingetragen.

Verlust		Normalfall			Teil- verlust	Gasbrems- strahlung
		el.-magn.	Neutronen	Summe		
Position vgl. Abb. 4		Dosis pro Jahr [mSv/a]			pro Vorfall [mSv]	pro Jahr [mSv/a]
3	FEL-Strahlverteilung Spiegel "MIR3FBD": Sperrbereich	6600000.	130000.	6700000.	280000.	200000.
4	PETRA-Kreuzung am Bleikasten: Kontrollbereich	< 0.3	1.2	1.5	0.063	0.046
5	FEL-Halle Interlocktür: Überwachungsbereich	1.1	0.8	1.9	0.080	0.058
6	FEL-Halle hinter Abschirmung: Überwachungsbereich	0.8	0.2	1.0	0.042	0.030
7	FEL-Halle Spiegel "MIR1FHAL2": Sperrbereich	17.	0.3	17.	0.71	0.52

Die ersten beiden Spalten beschreiben die Position, wobei die Nummern in der 1. Spalte mit denen der Abbildung 4 korrespondieren. Die Spalten 3 bis 5 beinhalten die Jahresdosen für den als Normalfall bezeichneten Strahlverlust. Das Planungsziel wird sowohl in den Überwachungsbereichen der FEL-Halle (Pos.5,6) als auch im Kontrollbereich der PETRA-Kreuzung (Pos.7) eingehalten. In der Spalte 6 wird der einmalige Vorfall eines Teilverlusts beschrieben. Auch hier wird das zugehörige Planungsziel von 0.12 mSv eingehalten. Zum Vergleich sind in der Spalte 7 die Werte durch Gasbremsstrahlung eingetragen, wofür der Normalverlust lediglich mit Hilfe der elektromagnetischen Dosiskomponente im Spiegel "MIR3FBD" (Pos. 3) skaliert wurde (Skalierungsfaktor: $200000/6600000 = 1/33$).

Mit dieser Skalierung erhält man rückwärts, daß die Gasbremsstrahlung mit einem Strahlverlust von 3.0×10^{14} e/a korrespondiert und die Undulatorsektion jährlich mit einer Energiedosis von 300 Gy schädigt.

5.4.3 Wirkung des Strahlverschlusses

Wenn man die FEL-Strahlverteilung zur Wartung betreten will, muß die Bremsstrahlung von dem Strahlverschluß "BSH9FLIN" absorbiert werden. Er steht im LINAC-Tunnel im Bereich "FLIN" in Strahlrichtung hinter dem Permanentmagneten "D2FLIN" (s.Abb.2 und 4). Um die Wirkung des Strahlverschlusses zu bewerten, wird die Dosis im Spiegel "MIR3FBD" (Maximum in FEL-Strahlverteilung) benutzt. Das unterstellt den schlimmsten Fall, daß Komponenten der FEL-Strahlführung demontiert sind und sich an deren Stelle eine Person aufhält. Dazu werden Simulationen mit verschiedenen Dicken des Wolfram-Strahlverschlusses durchgeführt und die Dosen im Spiegel als Funktion der Wolframdicke aufgetragen, wie in der Abbildung 6 gezeigt. Die Rechnungen sind aus Gründen der Statistik nur bis 5 cm möglich. Für größere Dicken muß extrapoliert werden, wobei die Anwendung des Absorptionskoeffizienten im Compton-Minimum die konservative Lösung liefert. Bei Normalverlust ergibt sich für einen 20 cm dicken Wolfram-Strahlverschluß eine Jahresdosis von $4 \mu\text{Sv/a}$ an der Position des Spiegels "MIR3FBD" in der FEL-Strahlverteilung.

5.4.4 Absorbergas zwischen den Druckstufen

Für die Experimente in der FEL-Halle ist es wichtig, die Intensität der FEL-Strahlung über mehrere Zehnerpotenzen variieren zu können. Dafür kann das FEL-Strahlrohr in Bereich "FPET" mit Stickstoff (N_2) als Absorbergas bis zu einem Druck von 10 Pa (10^{-4} bar) gefüllt werden. Zur Simulation wurde das Photonenstrahlrohr der Einfachheit halber mit 0.1 MPa (1 bar) Luft gefüllt, wobei keine signifikante Dosiserhöhung im Bereich der PETRA-Kreuzung (s. Abb.4, Pos.4) festgestellt wurde. Dies gilt natürlich auch für einen 10000 mal kleineren Druck bei reinem Stickstoff als Absorbergas.

5.4.5 Versagen des aktiven Elektronenstrahleinschlusses

Beim Versagen des aktiven Elektroneneinschlusses kann der Elektronenstrahl in die FEL-Strahlführung gelangen. Hier ist der Dipol "D2FLIN" eingesetzt, dessen Magnetfeld durch Permanentmagnete erzeugt wird (s. Abb.2, Schnitt C-C). Er ist so bemessen, daß er 1.6 GeV Elektronen um einen Winkel von 12 mrad horizontal ablenkt. Die Strahlrohrinnendurchmesser und der folgender Kollimator "COL6FLIN" sind so ausgelegt, daß der Strahl mit einer Ablage von 4 cm frontal im Blei gestoppt wird.

Die Ergebnisse der Simulation sind in der Abbildung 9 als Dosisprofil der elektro-magnetischen Strahlung gezeigt. Um den Vergleich zu den statistisch gleichwertigen Daten in Abb.7 zu ermöglichen ist es ebenfalls auf 1.0×10^{16} Elektronen normiert worden. In der Abb.9 findet man keine Energiedepositionen in der PETRA-Kreuzung, in der FEL-Strahlverteilung oder in der FEL-Halle, d.h. der oben angegebene Verlust führt in diesen Bereichen zu Dosen kleiner als 0.01 mSv.

Wird die volle Leistung 1/10-tel Stunde lang (1.4×10^{17} Elektronen) als einmaliger Vorfall in die FEL-Strahlführung geschossen, ergibt das eine Dosis von weniger als 0.1 mSv in den entsprechenden Bereichen. Die Wirkung des passiven Elektronenstrahleinschlusses ist hiermit gezeigt.

6 Einfluß von PETRA

Die beiden Beschleuniger PETRA und TTF 2 sollen unabhängig voneinander betrieben werden. Es ist demnach zu untersuchen, ob zu Zeiten der TTF 2 Wartung die Dosisgrenzwerte sowohl im LINAC-Tunnel (Kontrollbereich) als auch in der FEL-Strahlverteilung (Kontrollbereich) eingehalten werden können. In den folgenden Abschnitten werden die Direktstrahlung durch Protonenverluste und durch Elektronenverluste im PETRA-Beschleuniger betrachtet.

6.1 Protonenverluste

PETRA läuft mit Protonen nur als Vorbeschleuniger für den Protonen-Elektronen-Speicherring HERA. In [8] wurden die Verluste aus der Vorbeschleunigung von jährlich 1.5×10^{16} Protonen abgeschätzt, indem 20% bei einer mittleren Energie von 24 GeV auf dem gesamten Ringumfang

von 2300 m als Verlust verteilt und dann wiederum 10 m zu einer Punktquelle zusammen gezogen wurden. Man erhält somit einen Normalverlust von 1.3×10^{13} Protonen pro Jahr bei einer mittleren Energie von 24 GeV.

Als einmaliger Vorfall wird angenommen, daß bei der Anfangsenergie von 8 GeV die Protonen 1/10 Stunde lang ununterbrochen injiziert werden und dabei genau im Bereich der PETRA-Kreuzung punktförmig verloren gehen. Bei 1.0×10^{12} Protonen pro Injektion und einer Injektionsrate von 0.25 Hz ergibt das für den Totalverlust 9.0×10^{13} Protonen.

Strahlverlust im Normalfall	bei 24 GeV	1.3×10^{13} p/a
Totalverlust	bei 8 GeV	9.0×10^{13} p pro Vorfall

Bei der Wechselwirkung von Protonen mit Materie bilden Neutronen die Hauptdosiskomponente. Zu deren Abschirmung sind die 20 cm dicken Eisenpfropfen "COL1FPET", COL3FPET", "COL11FPET" und "COL13FPET" im Bereich "FPET" eingebaut. Das Neutronendosisprofil für den Normalfall ist in der Abbildung 10 gezeigt. Es ergeben sich für den LINAC-Tunnel (Pos. 1) und die FEL-Strahlverteilung (Pos. 2) Jahresdosen von jeweils 1 mSv. Für den einmaligen Totalverlust erhält man nach obiger Tabelle etwa 2.3 mSv. Dieser Wert ist hier tolerabel, denn die zugehörigen Gebiete sind, wie oben beschrieben, Kontrollbereiche.

6.2 Elektronenverluste

PETRA läuft mit Elektronen sowohl als Vorbeschleuniger für HERA als auch als Speicherring zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung. Bei jährlich 3.8×10^{15} auf 12 GeV vorbeschleunigte Elektronen gehen 15% gleichmäßig auf dem Ringumfang von 2300 m verloren. Wieder 10 m zu einer Punktquelle zusammengezogen ergibt im Normalfall einen Verlust von 2.5×10^{12} Elektronen pro Jahr. Werden weitere 3.8×10^{15} Elektronen im Jahr gespeichert und dabei im Ring verloren, dann wächst der Verlust im Normalfall um 1.7×10^{13} Elektronen.

Als einmaliges Ereignis wird der Totalverlust beim andauernden Füllen angesehen. Bei der Injektion von 1.0×10^{10} Elektronen mit einer Rate von 6 Hz während einer Stunde erhält man 2.2×10^{14} Elektronen als Totalverlust.

Strahlverlust im Normalfall	Vorbeschleuniger	bei 12 GeV	2.5×10^{12} e/a
Strahlverlust im Normalfall	Speicherring	bei 12 GeV	1.7×10^{13} e/a
Strahlverlust im Normalfall	Summe	bei 12 GeV	2.0×10^{13} e/a
Totalverlust		bei 7 GeV	2.2×10^{14} e pro Vorfall

Das Strahlrohr in der PETRA-Kreuzung liegt etwa 50 cm oberhalb des FEL-Strahlrohres in einem Dipol, dessen mehr als 10 cm dickes U-förmiges Eisenjoch zur Ringinnenseite, also in Richtung LINAC-Tunnel, geöffnet ist. Es gibt keinen Sichtkontakt auf den Bleikasten. Das bedeutet, daß sich beim Strahlverlust die elektro-magnetische Kaskade fast vollständig im Eisen des

PETRA-Dipols entwickelt und nicht in die Kanäle von TTF 2 gelangen kann. Die in der elektromagnetischen Kaskade produzierten Neutronen werden isotrop emittiert und können Dosisbeiträge im LINAC-Tunnel und in der FEL-Strahlverteilung liefern. Mit Hilfe des vorigen Abschnittes werden die Dosen wie folgt skaliert: Hinter einer dicken seitlichen Abschirmung erzeugt ein 12 GeV Proton eine 200 mal höhere Neutronendosis als ein 12 GeV Elektron [9]. Für den Normalfall errechnet man für den LINAC-Tunnel (Pos. 1) und die FEL-Strahlverteilung (Pos. 2) Jahresdosen von 0.004 mSv. Beim Totalverlust erhält man 0.024 mSv pro einmaligen Vorfall.

7 Strahlungsüberwachung

Hinter der Abschirmung, in frei zugänglichen Hallenbereichen (Gebäude 28, FEL-Halle), stehen Detektoren, die Strahlung, herrührend von Neutronen und hochenergetischen Photonen, messen können. Bei Überschreitung einer vorwählbaren Dosisleistung wird TTF 2 abgeschaltet. Damit ist gewährleistet, daß der Hallenbereich nicht zum Kontrollbereich werden muß. Ferner wird dadurch mit einer unabhängigen Methode sichergestellt, dass kritische Strahlverlustszenarien nur kurze Zeit anstehen können. Eine vorgewählte Schwelle von $1 \mu\text{Sv/h}$ (Planziel, siehe Kap.2) führt 6 Minuten nach Überschreitung zur Abschaltung, eine Schwelle von $10 \mu\text{Sv/h}$ nach 0.6 Minuten oder 36 Sekunden.

Außerdem werden an allen wichtigen Stellen um den Beschleuniger Detektoren mit Festkörpersdosimetern zur Messung der Ortsdosen und Überwachung der Strahlenschutzbereiche installiert sein.

8 Induzierte Radioaktivität

Bei der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit Materie wird nicht nur Sekundärstrahlung erzeugt, sondern sie hinterläßt auch Restaktivität. Hierbei trägt der Hauptabsorber die Hauptlast von 99% der Strahlleistung. Das fehlende 1% geht entlang des Beschleunigers verloren. Die Praxis zeigt, daß sich die Verluste an neuralgischen Punkten konzentrieren. Diese werden bei Bedarf zusätzlich lokal abgeschirmt. Die Restaktivität entlang des Beschleunigers hat zur Folge, daß der LINAC-Tunnel außerhalb des Betriebes Kontrollbereich ist. Im folgenden wird der Hauptabsorber betrachtet, der in [10] beschrieben ist.

8.1 Restaktivität im Hauptabsorber

Detaillierte Berechnungen der Restaktivität sind für den TTF 1 Hauptabsorber durchgeführt worden [11]. Nach 10-jähriger Betriebszeit des TTF 2 Hauptabsorbers ergibt sich eine Ortsdosisleistung durch Restaktivität (^7Be) in 1 m Abstand von etwa 30 mSv/h . Die Betonburg um den Absorber hat eine Abschwächung von mehr als 1000, d.h. wenige $10 \mu\text{Sv/h}$ sind in zugänglichen Bereichen des Tunnels, der ohnehin Kontrollbereich ist, zu erwarten.

Die Tritium-Produktion wurde auf Basis von [11] für den Graphit-Absorber auf etwa 120 GBq/a skaliert. Das Tritium ist im Graphit, im Aluminium und im Kupfer eingeschlossen. Um freigesetzt zu werden, muß es zuerst aus den Graphitkörnern (Radius 10 μm) diffundieren. Nach [12] berechnet sich die integrale Freisetzung F für $F \leq 0.3$ näherungsweise zu

$$F = \sqrt{\frac{36}{\pi} \cdot \frac{D}{R^2} \cdot t} \quad \text{mit} \quad D = 0.24 \cdot \exp\left(-\frac{2.78 \text{ eV}}{kT}\right) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad (3)$$

Die Gleichung (3) gilt für den Fall, daß das Tritium zur Zeit $t = 0$ produziert wird und danach aus dem Korn diffundiert. Im Hauptabsorber laufen beide Prozesse gleichzeitig ab, d.h die Aktivitätsfreisetzungsrates \dot{A}_F zum Zeitpunkt t berechnet sich aus der Produktionsrate \dot{A}_P zum Zeitpunkt t'

$$\dot{A}_F(t) = \int_0^t \frac{dF}{dt} (t - t') \cdot \dot{A}_P(t') dt' \quad (4)$$

Mit einer konstanten Produktionsrate erhält man

$$\dot{A}_F(t) = \dot{A}_P \cdot \sqrt{\frac{36}{\pi} \cdot \frac{D}{R^2} \cdot t} \quad (5)$$

Nimmt man konservativ an, daß das gesamte Graphit auf Maximaltemperatur von $T = (273 + 80 + 400) \text{ K} = 753 \text{ K}$ gehalten wird, ergibt sich nach dem ersten Jahr eine Freisetzungsrates von $120 \text{ GBq/a} \times 0.005 = 0.6 \text{ GBq/a}$ und nach 10 Jahren von 1.9 GBq/a . Das Tritium vermischt sich allmählich mit der Tunnelluft und wird via Lüftungssystem ausgeblasen. Bei einem Abluftstrom von $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich nach 10 Jahren eine Aktivitätskonzentration von 220 Bq/m^3 , weniger als das Limit der Strahlenschutzverordnung von 1000 Bq/m^3 . Zur Bewertung der hier berechneten Freisetzungsrates muß hinzugefügt werden, daß der größte Teil des Graphits wesentlich kälter als 753 K und damit dessen Diffusion eingefroren ist, andererseits aber gute Adsorptionseigenschaften besitzt.

Die direkte Aktivierung von Kühlwasser ist verglichen mit der des Absorberkörpers gering, da die Kühlschlange außen auf dem Zylindermantel angebracht ist. In der Kühlschlange werden weniger als 10^{-4} der Strahlungsleistung absorbiert. Nach [13] erhält man in Wasser eine Tritium-Produktion von 40 GBq/a . Im Kühlsystem würden dann nach den obigen Annahmen nur 4 MBq/a produziert. Unterstellt man dem Kühlkreislauf ein Volumen von 1 m^3 , hätte man am Jahresende eine Konzentration von 4 MBq/m^3 im Wasser. Das Kühlwasser wird ins Siel gegeben, wobei hier der Grenzwert der Strahlenschutzverordnung bei 100 MBq/m^3 liegt.

8.2 Luftaktivierung am Hauptabsorber

Als Anhaltspunkt kann die Berechnung der Luftaktivierung an einem Kollimator für TESLA [14] dienen. Die relevanten Parameter sind die Elektronenenergie von 250 GeV , die mittlere Leistung von 100 kW und der Tunnelradius von 250 cm . Als Schlüsselnuclid hebt sich ^{41}Ar ($T_{1/2} = 1.8 \text{ h}$) mit einer Sättigungsaktivität von 200 GBq heraus.

Die Aktivierung von Luft in der Nähe des TTF 2 Absorbers ist geringfügig, da er in einen Betonblock eingepaßt ist. Konservativ wird angenommen, daß der Absorber von einem 2.5 cm breitem Luftspalt umgeben ist. Da die Reaktionsrate proportional zur Länge der Photonenspuren

(track length) in Luft ist, muß mit $2.5\text{cm}/250\text{cm} = 0.01$ skaliert werden. Damit ergeben sich 2 GBq Sättigungsaktivität in den Luftspalten um den Hauptabsorber. Diese aktivierte Luft ist gegenüber der Tunnelluft isoliert in dem Sinn, daß ihre Immission in die Tunnelluft länger als 20 Halbwertszeiten, also etwa 1.5 Tage, dauert. Das wird durch das Verputzen von Spalten erreicht. Bei einem Luftstrom von $1000\text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich eine Aktivitätskonzentration von ungefähr $2\text{ Bq}/\text{m}^3$ am Auslaß, wesentlich geringer als das Limit der Strahlenschutzverordnung von $2000\text{ Bq}/\text{m}^3$.

8.3 Aktivierung von Boden und Grundwasser am Hauptabsorber

Die Aktivierung von Boden und Grundwasser wurde im Rahmen des TESLA-Projekts für einen 12 MW Absorber detailliert untersucht [15]. Dafür wurde eine Abschirmung von 3 m Normalbeton angenommen, während der TTF 2 Absorber nur 1 m hat. Mit einer Zehntelwertsschichtdicke von ca. 1 m erhält man den entsprechenden Skalierungsfaktor von $100\text{kW}/12\text{MW} * 100 \approx 1$, d.h. die Verhältnisse von [15] sind direkt übertragbar. Darin wird folgendes zusammenfassend festgestellt: Würde eine Person ihr gesamtes Trinkwasser aus einem Brunnen in 100 m Entfernung zum Absorber entnehmen, dann wäre deren resultierende Dosis kleiner als $30\text{ }\mu\text{Sv}/\text{a}$. In diesem Radius von 100 m vom Hauptabsorber gibt es keine Trinkwasserentnahme bei DESY.

Literatur

- [1] The TESLA Test Facility FEL team. SASE FEL at the TESLA Facility, Phase 2. Bericht TESLA-FEL 2002-01, June 2002.
- [2] K. Tesch and H. Dinter. Sicherheitsbericht zum Antrag auf Errichtungsgenehmigung vom 21.04.95. DESY Genehmigung HH-BA 2/95, April 1995.
- [3] K. Tesch. Shielding against high-energy neutrons from electron accelerators - A review. *Rad.Prot.Dos.*, 22:27, 1988.
- [4] H. Dinter, A. Leuschner, K. Tesch, D. Dworak, and J. Łoskiewicz. Calculation of hadron yields around thick targets and doses behind concrete shielding of high energy electron accelerators. *NIM, A* 455:460–469, 2000.
- [5] A. Fassò, A. Ferrari, and P.R. Sala. Electron-photon transport in FLUKA: status. In A. Kling, F. Barao, M. Nakagawa, L. Tavora, and P. Vaz, editors, *Proceedings of the MonteCarlo 2000 Conference, Lisbon, October 23–26 2000*, pages 955–960. Springer-Verlag Berlin, 2001.
- [6] A. Fassò, A. Ferrari, J. Ranft, and P.R. Sala. FLUKA: Status and Prospective for Hadronic Applications. In A. Kling, F. Barao, M. Nakagawa, L. Tavora, and P. Vaz, editors, *Proceedings of the MonteCarlo 2000 Conference, Lisbon, October 23–26 2000*, pages 955–960. Springer-Verlag Berlin, 2001.
- [7] J. C. Liu, W. R. Nelson, and K. R. Kase. Gas bremsstrahlung and associated photon - neutron shielding calculations for electron storage rings. *Health Phys.*, 68:205–213, 1994.
- [8] K. Tesch and H. Dinter. Antrag auf Errichtungsgenehmigung DESY 3. DESY Genehmigung HH-BA 2/87, Januar 1987.
- [9] A. Leuschner, B. Racky, and N. Tesch. Aktuelle Abschirmungsrechnungen für den Speicherring HERA. Laboratory note DESY D3–116, April 2001.

- [10] M. Maslov et al. Design of a Beam Dump for the TTF-FEL Phase II Project. DESY, unpublished, December 1999.
- [11] K. Tesch and H. Dinter. Antrag auf Betriebsgenehmigung für Beschleuniger vom 17.10.96. DESY Genehmigung HH-BA 3/96, Oktober 1996.
- [12] P.G. Fischer. Verhalten von Tritium in Reaktorgraphiten. Dissertation RWTH Aachen, 1975.
- [13] A. Leuschner and K. Tesch. The residual radioactivity of a water-copper beam dump for the TESLA Test Facility. Interner Bericht DESY D3 92, November 1998.
- [14] H. Dinter and A. Leuschner. Induced radioactivity and dose rates in the vicinity of a collimator at the Linear Collider TESLA. Laboratory note DESY D3-104, September 1999.
- [15] N. Tesch. Soil, Groundwater and Cooling Water Activation at the TESLA Beam Dump. Laboratory note DESY D3-114, March 2001.

Abbildungen

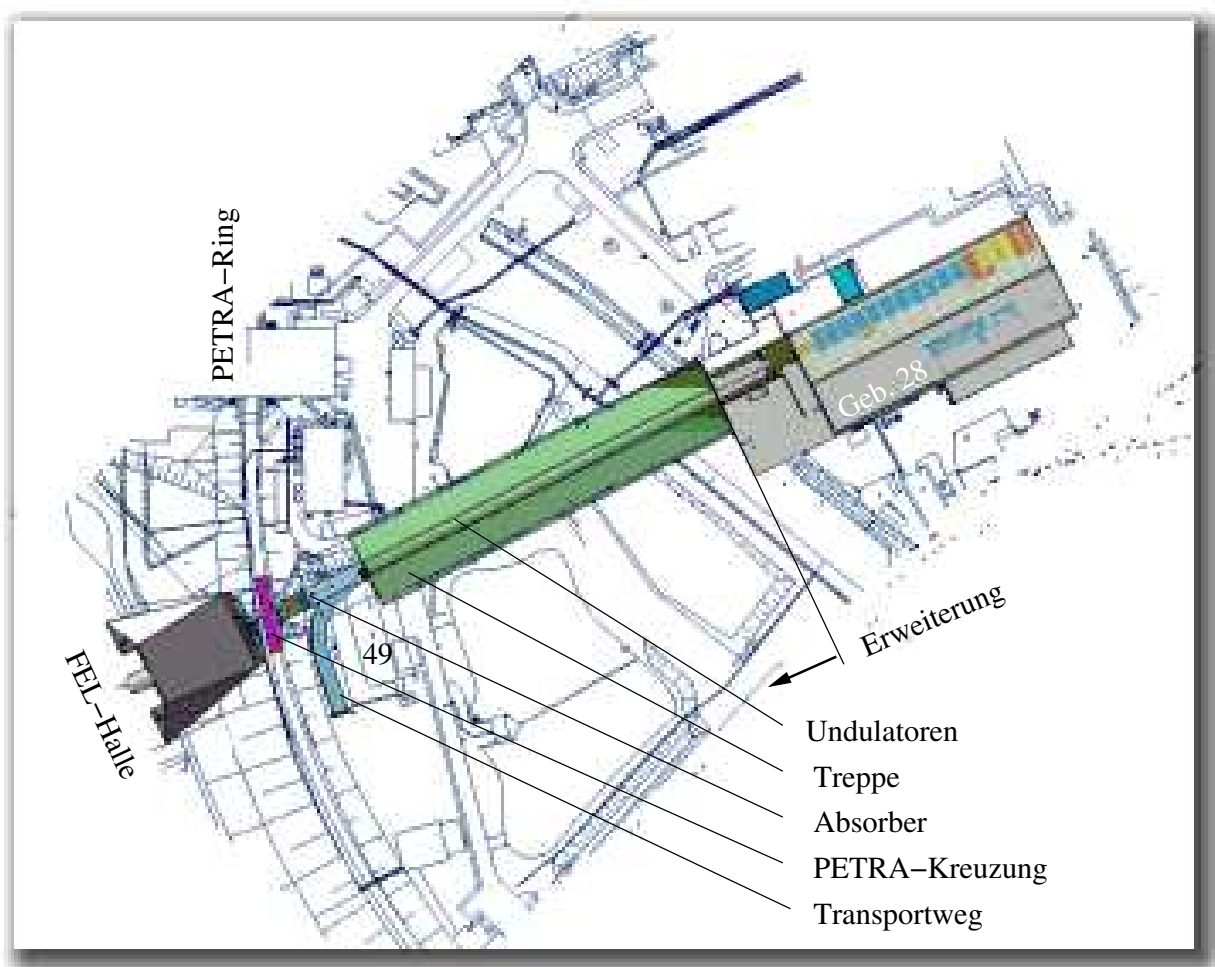


Abbildung 1: TTF 2 Lageplan.

Abbildung 2: Technische Zeichnung der FEL-Strahlführung in Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten). Der FEL-Strahl ist rot eingezeichnet.

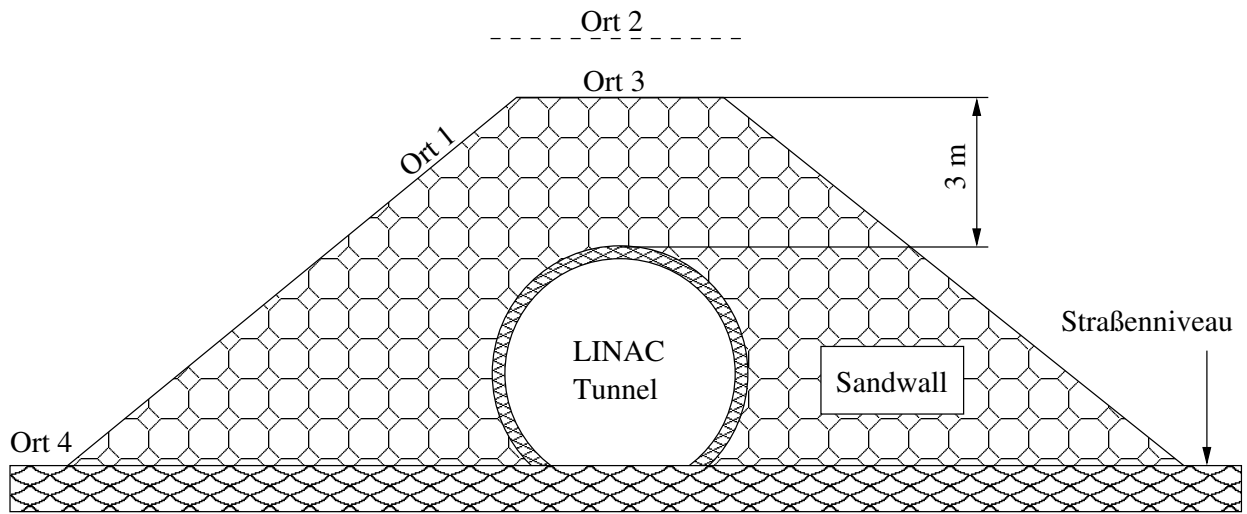


Abbildung 3: Querschnitt durch den LINAC-Tunnel.

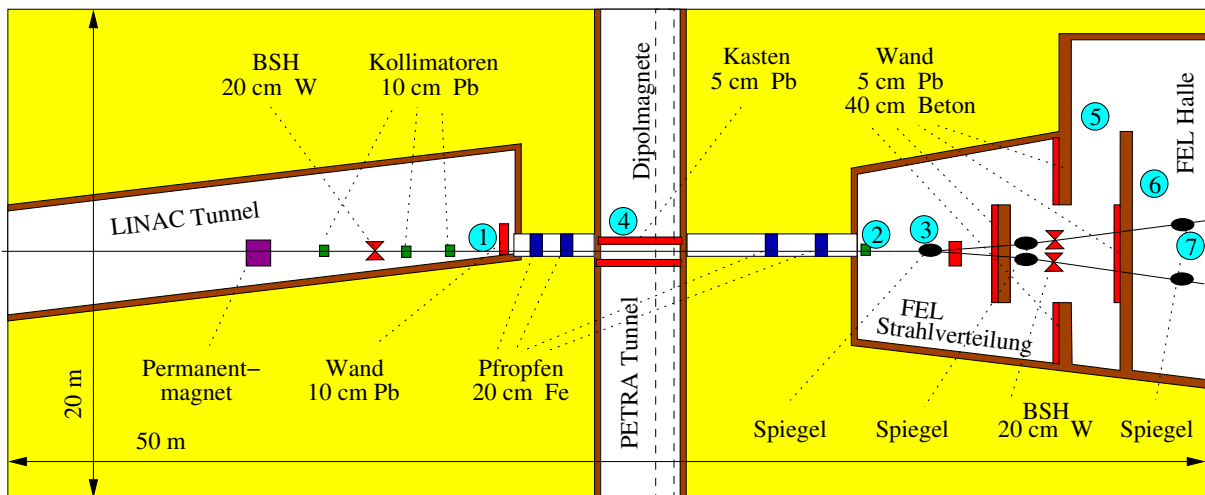


Abbildung 4: Geometrie für die FLUKA Simulationen mit den für den Strahlenschutz relevanten Komponenten. Die Abkürzung BSH steht für Strahlverschluß (beam shutter). Die Zahlen in den Kreisen markieren Positionen, deren Dosiswerte im Text verwendet werden.

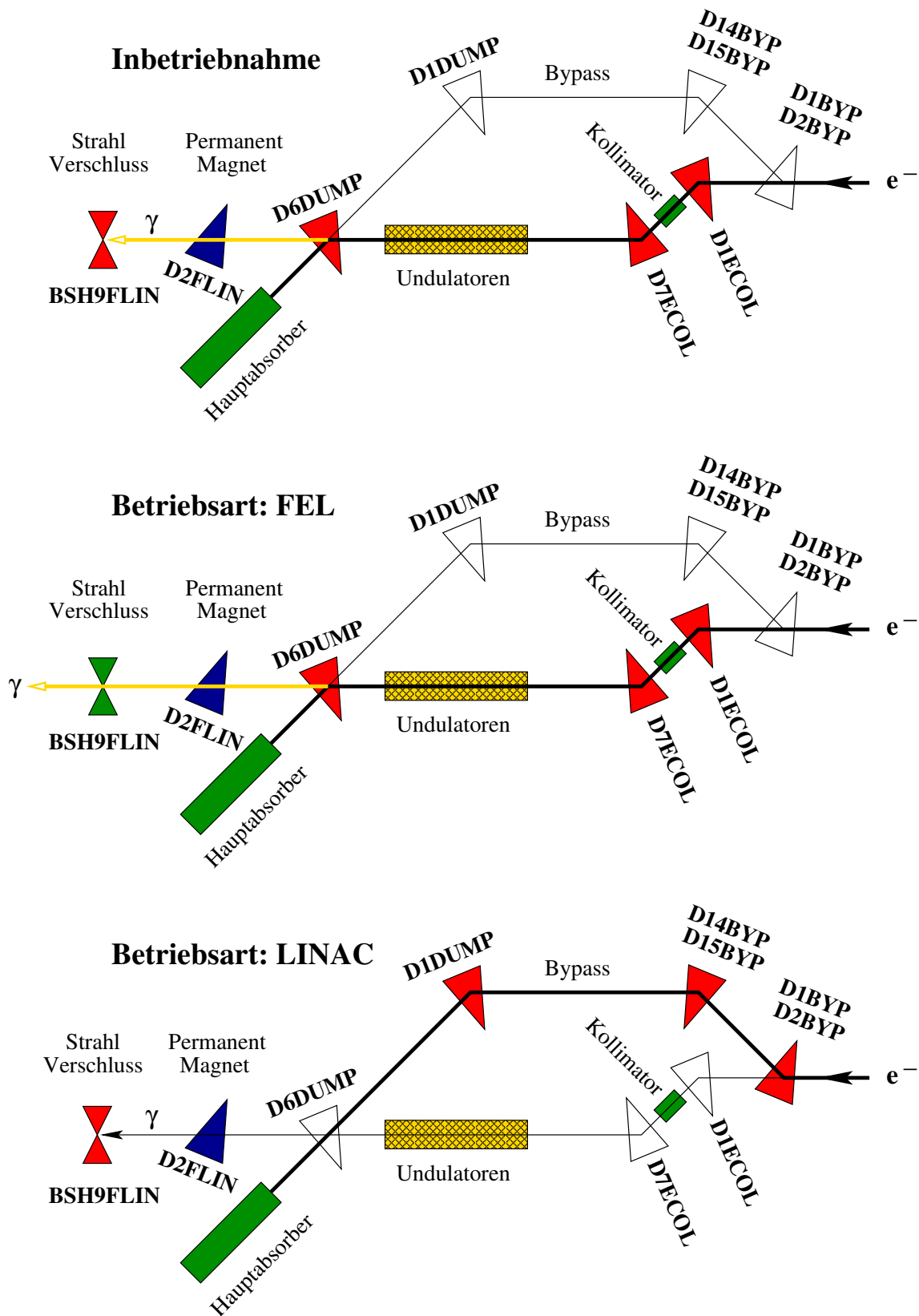


Abbildung 5: Zustände des Strahlverschlusses und der Ablenkmagneten (Dipole) bei den verschiedenen Betriebsarten.

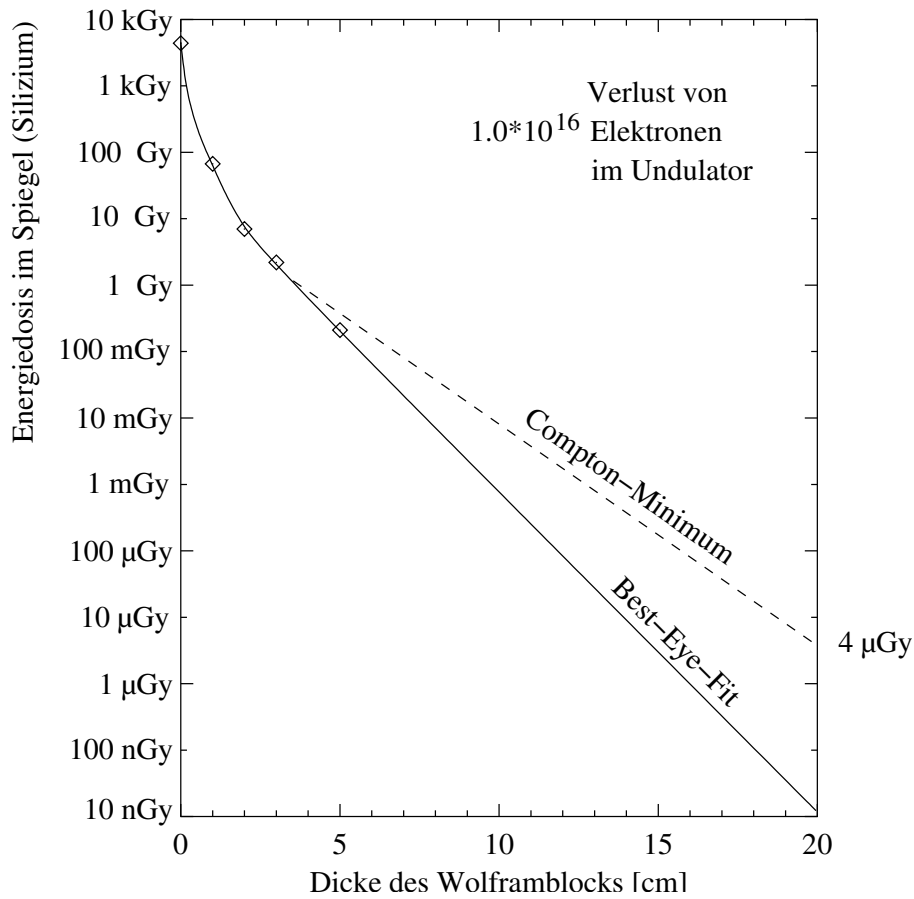


Abbildung 6: Energiedosis im Silizium des Spiegels "MIR3FBD" (Abb.4, Position 3) durch den Verlust von 1.0×10^{16} Elektronen im Undulator als Funktion der Dicke des Wolframblockes des Strahlverschlusses "BSH9FLIN". Die Symbole stehen für FLUKA-Rechnungen. Die Linien sind Extrapolationen bis zu 20 cm Dicke. Die gestrichelte Linie basiert auf dem Absorptionskoeffizienten im Compton-Minimum und stellt damit das Dosismaximum dar. Die Vollinie ist ein Best-Eye-Fit.

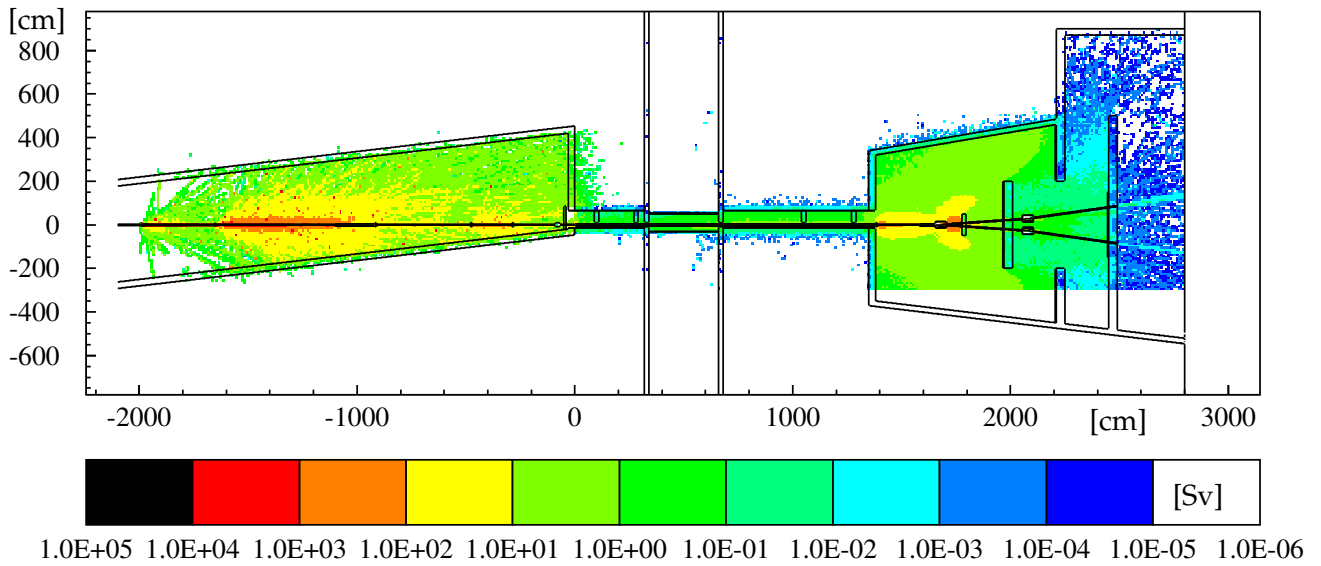


Abbildung 7: Äquivalentdosis durch elektro-magnetische Strahlung bei einem Strahlverlust von 1.0×10^{16} Elektronen im Undulator.

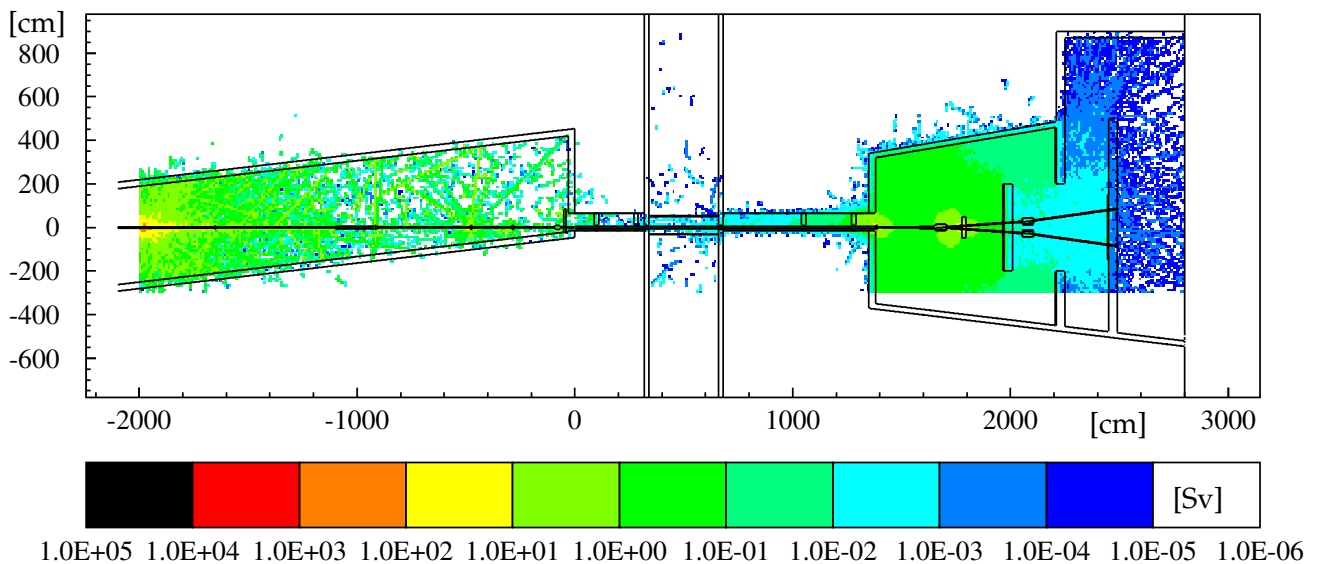


Abbildung 8: Äquivalentdosis durch Neutronen bei einem Strahlverlust von 1.0×10^{16} Elektronen im Undulator.

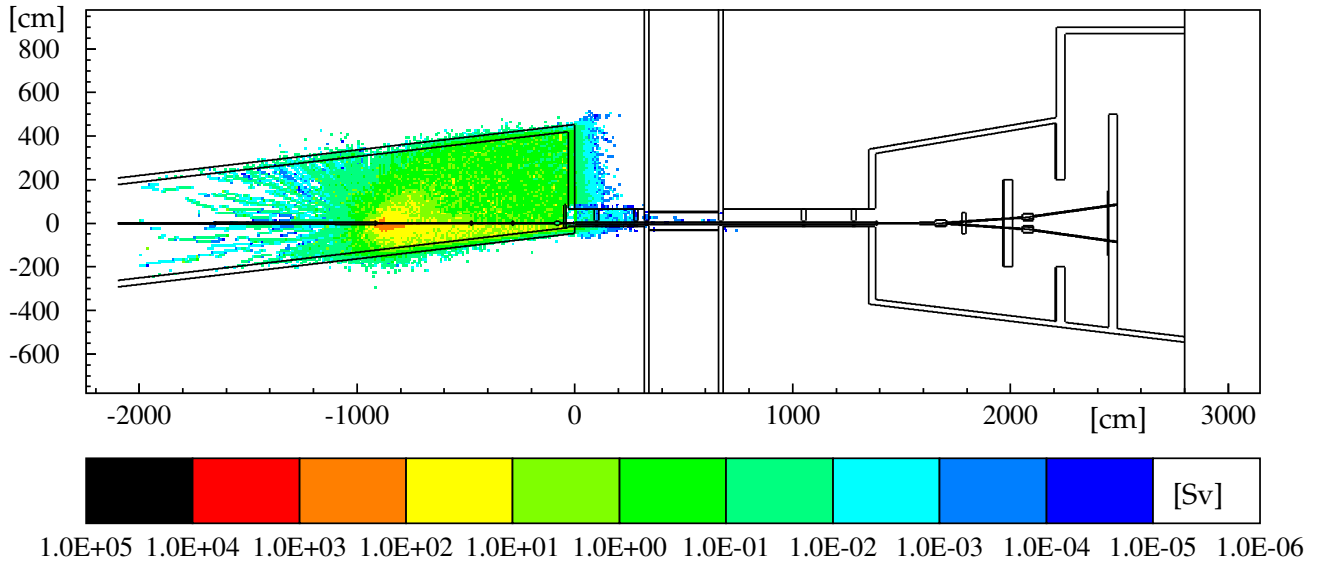


Abbildung 9: Äquivalentdosis durch elektro-magnetische Strahlung bei einem Strahlverlust von 1.0×10^{16} Elektronen hinter dem Permanentmagneten "D2FLIN" (Ablenkung 12 mrad).

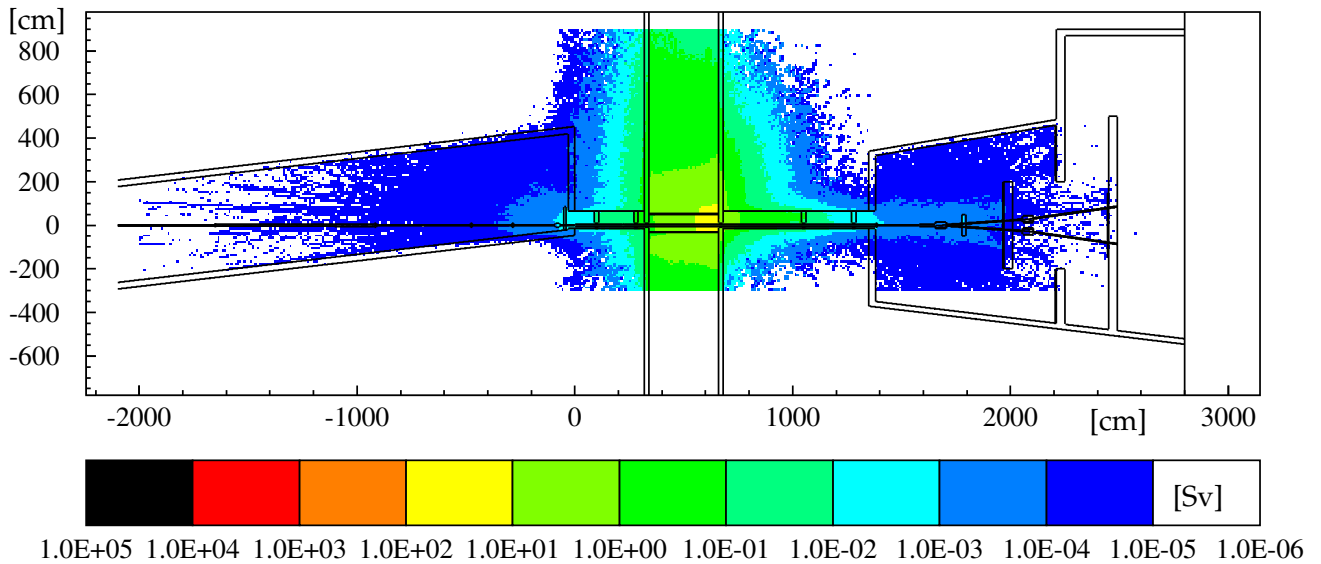


Abbildung 10: Äquivalentdosis durch Neutronen bei einem Strahlverlust von 1.3×10^{13} Protonen bei 24 GeV im PETRA-Dipolmagneten direkt über dem FEL-Strahlrohr in der PETRA-Kreuzung.