

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

**FZR-345**

März 2002

ISSN 1437-322X



**Archiv-Ex.:**

*Bärbel Naumann*

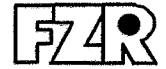
**Berechnung des Strahlungsuntergrundes in  
der Umgebung der Strahlfänger an der  
Strahlungsquelle ELBE**

Herausgeber:  
Forschungszentrum Rossendorf e.V.  
Postfach 51 01 19  
D-01314 Dresden  
Telefon +49 351 26 00  
Telefax +49 351 2 69 04 61  
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt  
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE



**FZR-345**

März 2002

*Bärbel Naumann\**

**Berechnung des Strahlungsuntergrundes in  
der Umgebung der Strahlfänger an der  
Strahlungsquelle ELBE**

\*Technische Universität Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik

## Zusammenfassung

An der Strahlungsquelle ELBE werden an den einzelnen Experimentierplätzen Strahlfänger eingesetzt, welche den primären Elektronenstrahl sowie die erzeugte Sekundärstrahlung absorbieren. Der Strahlfänger besteht aus einem Absorber aus Reinstgraphit, welcher von einem wassergekühlten Edelmantel umgeben ist. Für die Abschirmung der Untergrundstrahlung wird Eisen, Blei und Schwerbeton verwendet. Die Strahlparameter und die Positionierung der Strahlfänger unterscheiden sich an den verschiedenen Experimentierplätzen. Zur Bestimmung der Ortsabhängigkeit der Photonen- und Neutronenfluenzen sowie der Äquivalentdosisleistungen am Kühlmantel des Strahlfängers wurden Simulationsrechnungen mit dem Programm FLUKA durchgeführt. Betrachtet wurden Strahlenergien von 20 MeV und 50 MeV bei einer Elektronenstromstärke von 1 mA. Die räumlichen und energetischen Verteilungen der Äquivalentdosisleistung können als Grundlage zur Dimensionierung der Abschirmung verwendet werden. Die berechneten Verteilungen der Energiedosisleistung im Strahlfänger dienen der Beurteilung der thermischen Materialbelastung und der Auslegung des Kühlsystems.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Geometrie und Materialparameter</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Ortsverteilungen der Fluenzen</b>	<b>9</b>
3.1	Fluenzspektren bei Strahlenergie $E_0 = 20$ MeV . . . . .	9
3.2	Fluenzspektren bei Strahlenergie $E_0 = 50$ MeV . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Flussdichten und Äquivalentdosisleistungen</b>	<b>23</b>
4.1	Verteilungen der Teilchenflussdichten . . . . .	23
4.2	Verteilungen der Äquivalentdosisleistungen . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Energiebilanzen und Energiedosisleistungen im Strahlfänger</b>	<b>27</b>
5.1	Energiebilanzen . . . . .	27
5.2	Energiedosisleistungen im Strahlfänger basierend auf $\Delta E$ . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>30</b>

# 1 Einleitung

Im Forschungszentrum Rossendorf wird die Strahlungsquelle ELBE aufgebaut, die mit Hilfe verschiedener Arten von Strahlung wissenschaftliche Untersuchungen ermöglicht. Das Herzstück von ELBE ist ein supraleitender Elektronenbeschleuniger der quasi-kontinuierliche (cw) Strahlen hoher Brillanz und geringer Emittanz liefert.

Die Strahlenergie von ELBE kann zwischen 12 und 40 MeV variiert werden. Es können Elektronenstromstärken bis etwa 1 mA mit einer großen Variabilität in der Pulsstruktur erzeugt werden. Neben Anwendungen für kern- und festkörperphysikalische Experimente werden die Elektronen zur Erzeugung sekundärer Strahlung in Form elektromagnetischer Wellen vom fernen Infrarot bis zur Gammastrahlung sowie von Positronen und Neutronen dienen. Freie Elektronen Laser (FEL) sollen elektromagnetische Strahlung hoher Brillanz im mittleren (MIR:  $5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 30 \mu\text{m}$ ) und im fernen Infrarotbereich (FIR:  $30 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 150 \mu\text{m}$ ) erzeugen. Abb. 1 zeigt den schematischen Grundriss der Beschleunigerhalle.

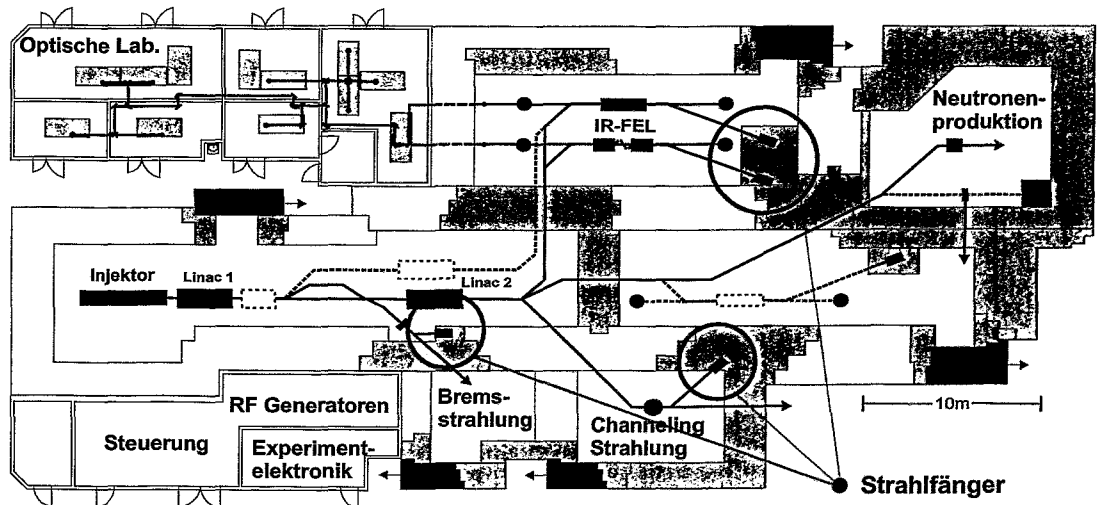


Abbildung 1: Grundriss der Beschleunigerhalle

Die Strahlführung sowie die Anordnung der Strahlführungskomponenten und der Experimentierplätze in den unterschiedlichen Labors bedingen den Einbau mehrerer Strahlfänger. An den in Abb. 1 mit einem Kreis gekennzeichneten Standorten werden Strahlfänger eines Typs zum Einsatz kommen.

Ziel dieser Arbeit ist die Berechnung des von den Strahlfängern während des Strahlbetriebs emittierten Strahlungsuntergrundes. Darauf aufbauend können speziell für jeden einzelnen Standort Festlegungen für die notwendige Abschirmung dieser Strahlung getroffen werden. Die unterschiedlichen Strahlparameter an den einzelnen Experimentierplätzen sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Messplatz	Energie $E_0$	Strom $I$	Leistung $P$
FIR-FEL	50 MeV	1 mA	50 kW
MIR-FEL	50 MeV	1 mA	50 kW
Channeling Strahlung	50 MeV	0,2 mA	10 kW
Bremsstrahlung	20 MeV	0,5 mA	10 kW

Tabelle 1: Strahlparameter an den einzelnen Messplätzen von ELBE

Abb.2 zeigt in einer schematischen Darstellung die prinzipielle Konstruktion eines Strahlfängers. Der Absorber im Strahlfänger besteht aus Reinstgraphit [FZR-267][FZR-319], welcher in einen wassergekühlten doppelwandigen Kühlmantel aus Edelstahl und eine kompakte Eisenabschirmung (Wandstärken seitlich 10 cm und in Strahlrichtung 30 cm) eingebettet ist. Um die thermische Belastung des Absorbers zu verringern, wird der Strahl vor dem Eintritt in den Strahlfänger strahlenoptisch aufgeweitet und durch Steerer großflächig gerastert. Das Hochvakuum im Beschleunigerrohr wird durch ein Beryllium-Fenster (500  $\mu\text{m}$  dicke Folie) vom Vorvakuum im Strahlfänger-Gehäuse getrennt.

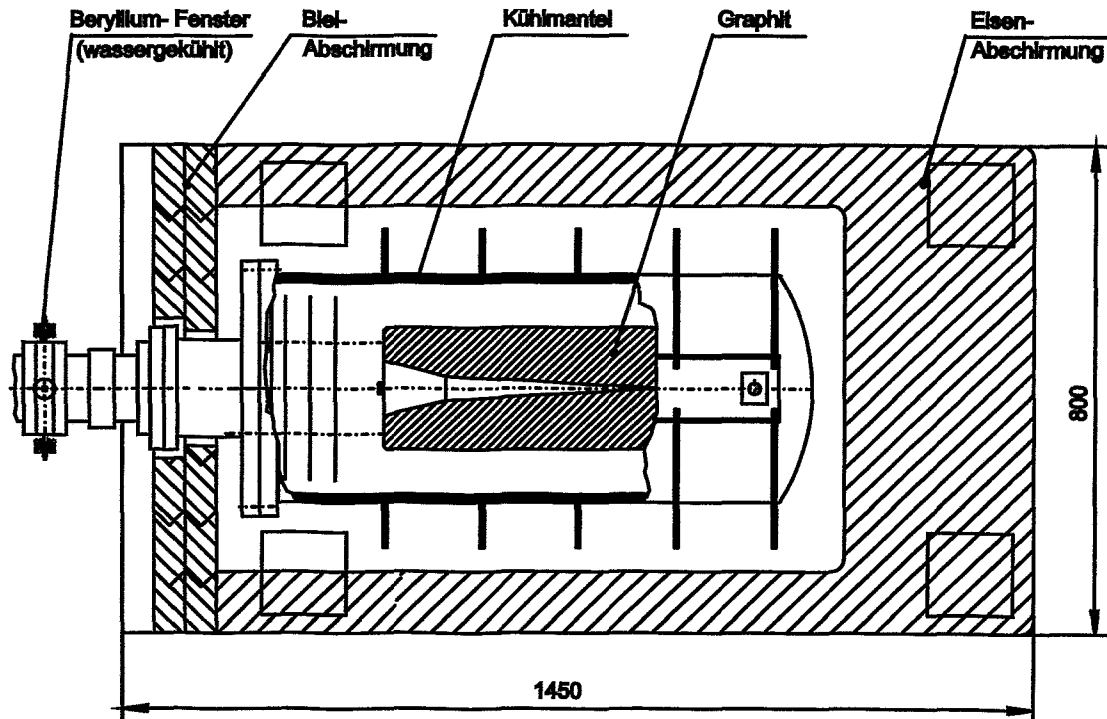


Abbildung 2: schematischer Aufbau des Strahlfängers

Die Untergrundstrahlung aus dem Strahlfänger wurde in der direkten Umgebung des Kühlmantels bestimmt. Die Fluenzspektren der aus dem Kühlmantel emittierten Photonen, Neutronen und Elektronen wurden in radial und transversal segmentierten Flächenelementen mit dem Teilchentransport-Programm FLUKA [FLUKA][Fas97] berechnet. Die Eisen- und die Bleiabschirmungen wurden in den Rechnungen nicht berücksichtigt (s. Kapitel 3). Die Flußspektren wurden unter Berücksichtigung einer

maximalen Stromstärke von 1 mA aus den Fluenzspektren berechnet. Die Nutzung von Konversionsfaktoren ermöglicht danach die Berechnung der energieabhängigen Verteilungen der Äquivalentdosisleistungen um den Strahlfänger (s. Kapitel 4). Entsprechend den Strahlanforderungen an den einzelnen Experimentierplätzen (s. Tab. 1) wurden die Rechnungen für Strahlenergien von  $E_0 = 20$  MeV und  $E_0 = 50$  MeV durchgeführt. Die Energiebilanzen sowie die Verteilungen der Energiedosisleistung in der gesamten Anordnung des Strahlfängers aus Graphit-Absorber und Kühlmantel werden in Kapitel 5 präsentiert.

Die Energieschwelle für den Transport von Photonen und Elektronen beträgt 100 keV. Der Elektronenstrahl wurde als Parallelstrahl mit einem Durchmesser von 8 cm modelliert und in einem Abstand von 5 cm vor dem Graphit-Kern auf den Strahlfänger gerichtet gestartet. Die Strahlrichtung entspricht der Richtung der z-Achse. Die den Rechnungen zugrunde gelegte Geometrie wird im Kapitel 2 beschrieben.

Die Rechnungen wurden am Linux-Cluster des Instituts für Kern- und Hadronenphysik des FZ Rossendorf durchgeführt.



## 2 Geometrie und Materialparameter

Der in Abb.2 schematisch dargestellte Strahlfänger bildet die Grundlage für ein geometrisches Modell, welches den Teilchentransport-Rechnungen zugrunde gelegt wurde. Der Koordinatenursprung (0,0,0) wurde an der Kante des Graphit-Absorbers auf der Strahlachse festgelegt.

Folgende Parameter beschreiben die in den Rechnungen berücksichtigten Komponenten des Strahlfängers :

### 1) Graphit-Absorber:

- Zylinder aus Reinstgraphit (Dichte  $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ );
- Radius  $r = 10 \text{ cm}$  und Länge  $l = 60 \text{ cm}$ ;
- zweistufige kegelförmige Aussparung ( $r_1 = 4,5 \text{ cm}$  bei  $z_1 = 0 \text{ cm}$  und  $r_2 = 2 \text{ cm}$  bei  $z_2 = 10 \text{ cm}$ );
- die Kegelspitze im Inneren des Zylinders befindet sich bei  $z = 45 \text{ cm}$ .

### 2) wassergekühlter doppelwandiger Kühlmantel aus Edelstahl :

- zwei 4 mm dicke Edelstahlwände aus nichtrostendem austenitischen Chrom-Nickel-Stahl X6 (Kurzname X 6 CrNiTi 18 10, Dichte  $\rho = 7,587 \text{ g/cm}^3$ , [FZR-267]);
- die inneren Radien der Wände betragen  $R_1 = 17,5 \text{ cm}$  und  $R_2 = 18,4 \text{ cm}$ ;
- auf der Strahlachse befinden sich die inneren Wände bei den Koordinaten  $Z_1 = 65 \text{ cm}$  und  $Z_2 = 65,9 \text{ cm}$ ;
- zwischen den Wänden befindet sich eine 5 mm dicke Schicht Kühlwasser.

Zur Bestimmung der ortsabhängigen Fluenzspektren wurde das den Kühlmantel umgebende Volumen in radiale und transversale Abschnitte eingeteilt. Berechnet wurden die Fluenzen für Photonen, Neutronen und Elektronen pro Inzidenzteilchen, welche aus dem Kühlmantel in Richtung Eisenabschirmung emittiert werden.

Jeweils 9 radiale Abschnitte wurden in zwei xy-Ebenen festgelegt. Die Ebenen liegen bei  $z = -15,5 \text{ cm}$  (Registrierung der vom Strahlfänger zurückgestreuten Teilchen) und bei  $z = 66,8 \text{ cm}$  (Registrierung der Teilchen in Strahlrichtung nach Durchdringen des Graphit-Absorbers und des Kühlmantels). In Abb. 3 werden die radialen Abschnitte bei  $z = -15,2 \text{ cm}$  gezeigt. Die geometrischen Parameter der radialen Abschnitte sind in der Tab. 2 zusammengestellt, es sind jeweils die inneren ( $r_i$ ) und die äußeren ( $r_a$ ) Radien angegeben.

In transversaler Richtung wurden über der Kühlmantelfläche 17 Teilabschnitte festgelegt, welche durch die linke ( $z_l$ ) bzw. rechte ( $z_r$ ) Koordinate auf der Strahlachse beschrieben werden (s. Tab. 3). Der Graphit-Absorber mit Kühlmantel und die transversalen Teilabschnitte sind in Abb. 4 dargestellt.

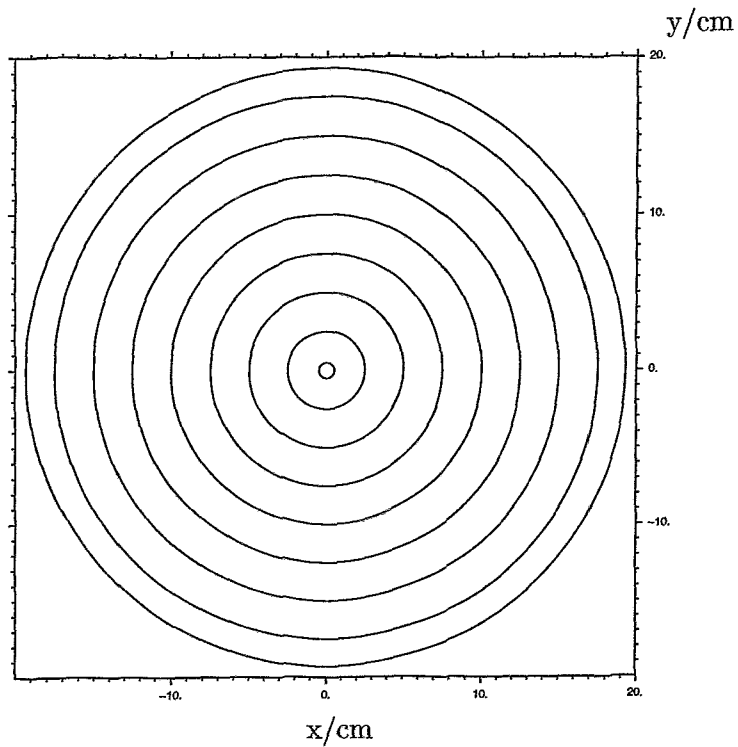


Abbildung 3: geometrisches Modell des Strahlfängers in der xy-Ebene mit Schnitt bei  $z = -15,2$  cm

Nr.	$z$ [cm]	$r_i$ [cm]	$r_a$ [cm]	Fläche [cm <sup>2</sup> ]
1	-15,5	0,0	0,5	0,79
2	-15,5	0,5	2,5	18,85
3	-15,5	2,5	5,0	58,91
4	-15,5	5,0	7,5	98,17
5	-15,5	7,5	10,0	137,45
6	-15,5	10,0	12,5	176,72
7	-15,5	12,5	15,0	215,99
8	-15,5	15,0	17,5	255,25
9	-15,5	17,5	19,3	268,73
10	66,8	0,0	0,5	0,79
11	66,8	0,5	2,5	18,85
12	66,8	2,5	5,0	58,91
13	66,8	5,0	7,5	98,17
14	66,8	7,5	10,0	137,45
15	66,8	10,0	12,5	176,72
16	66,8	12,5	15,0	215,99
17	66,8	15,0	17,5	255,25
18	66,8	17,5	19,3	268,73

Tabelle 2: Parameter der radialen Abschnitte in zwei Ebenen

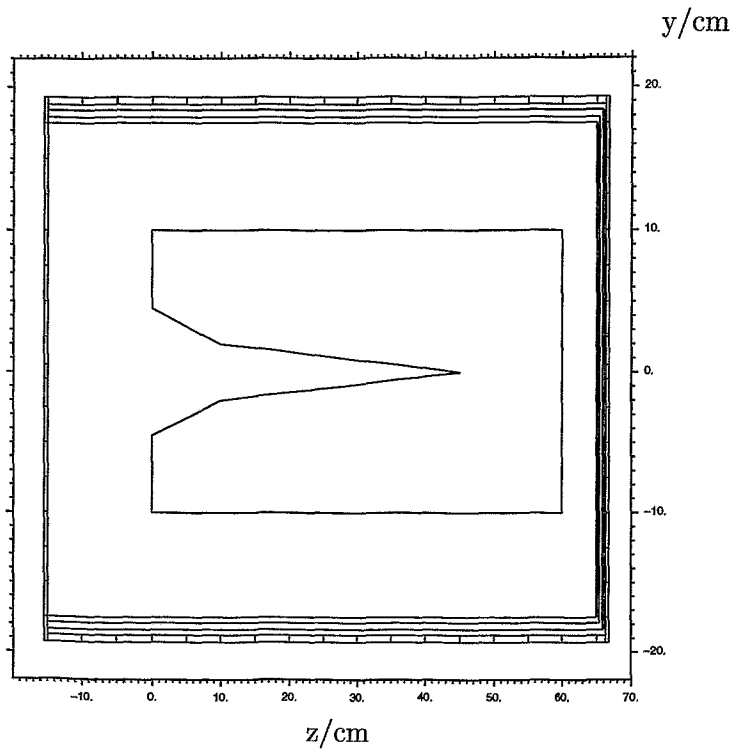


Abbildung 4: geometrisches Modell des Strahlfängers in der zy-Ebene mit Schnitt bei  $x = 0$  cm

Nr.	$z_l$ [cm]	$z_r$ [cm]	Fläche [cm <sup>2</sup> ]
19	-15,0	-10,0	606,33
20	-10,0	-5,0	606,33
21	-5,0	0,0	606,33
22	0,0	5,0	606,33
23	5,0	10,0	606,33
24	10,0	15,0	606,33
25	15,0	20,0	606,33
26	20,0	25,0	606,33
27	25,0	30,0	606,33
28	30,0	35,0	606,33
29	35,0	40,0	606,33
30	40,0	45,0	606,33
31	45,0	50,0	606,33
32	50,0	55,0	606,33
33	55,0	60,0	606,33
34	60,0	65,0	606,33
35	65,0	66,3	157,65

Tabelle 3: Parameter der transversalen Abschnitte bei  $r = 19,3$  cm

### 3 Ortsverteilungen der Fluenzen

Die Ortsverteilungen der Fluenzen um den Strahlfänger wurden entsprechend der in Kapitel 2 beschriebenen Geometrie bestimmt. Für Photonen, Neutronen und Elektronen wurden die Fluenzspektren durch die, die Teilabschnitte begrenzenden Flächen in Richtung Eisenabschirmung berechnet. Es wird über alle Winkel integriert. Das Kapitel 3.1 beinhaltet die Ergebnisse für eine Strahlenergie von  $E_0 = 20$  MeV und das Kapitel 3.2 für  $E_0 = 50$  MeV.

#### 3.1 Fluenzspektren bei Strahlenergie $E_0 = 20$ MeV

Die Verteilungen der Teilchenfluenzspektren wurden bei  $E_0 = 20$  MeV für jeden Teilabschnitt berechnet. Die integralen Teilchenfluenzen wurden durch Integration über die Energie bestimmt und werden in Abhängigkeit von der Position der Teilabschnitte in Abb. 5 zusammengestellt. Die Abszissen der drei Graphiken wurden entlang der, die radialen und transversalen Abschnitte begrenzenden Flächen gewählt. Links sind die Ergebnisse für die radialen Abschnitte bei  $z = -15,5$  cm dargestellt. In der Mitte sind die Ergebnisse für die transversalen Teilabschnitte über der Strahlrichtung  $z$  abgetragen; der Graphit-Absorber befindet sich zwischen  $0 \text{ cm} \leq z \leq 60$  cm. Rechts sind die Ergebnisse für die radialen Abschnitte bei  $z = 66,8$  cm dargestellt; die Werte der Abszisse sind hier fallend. Diese Darstellungsart wird für die Präsentation der integralen Größen in den einzelnen Teilabschnitten in Abhängigkeit von deren geometrischer Position im gesamten Bericht beibehalten.

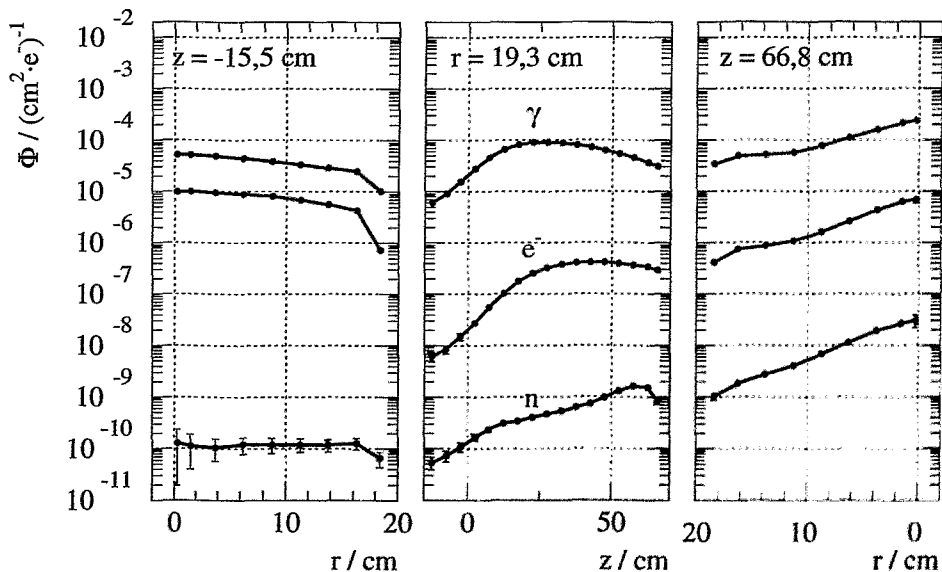


Abbildung 5: Verteilung der Fluenzen bei  $E_0 = 20$  MeV in Abhängigkeit von der Position der Teilabschnitte für  $E_\gamma \geq 100$  keV,  $E_e \geq 100$  keV und den gesamten Neutronenenergiebereich.

Die einzelnen Fluenzspektren sind für Neutronen in den Abb. 6 und 7, für Photonen in den Abb. 8 und 9 und für Elektronen in den Abb. 10 und 11 dargestellt.

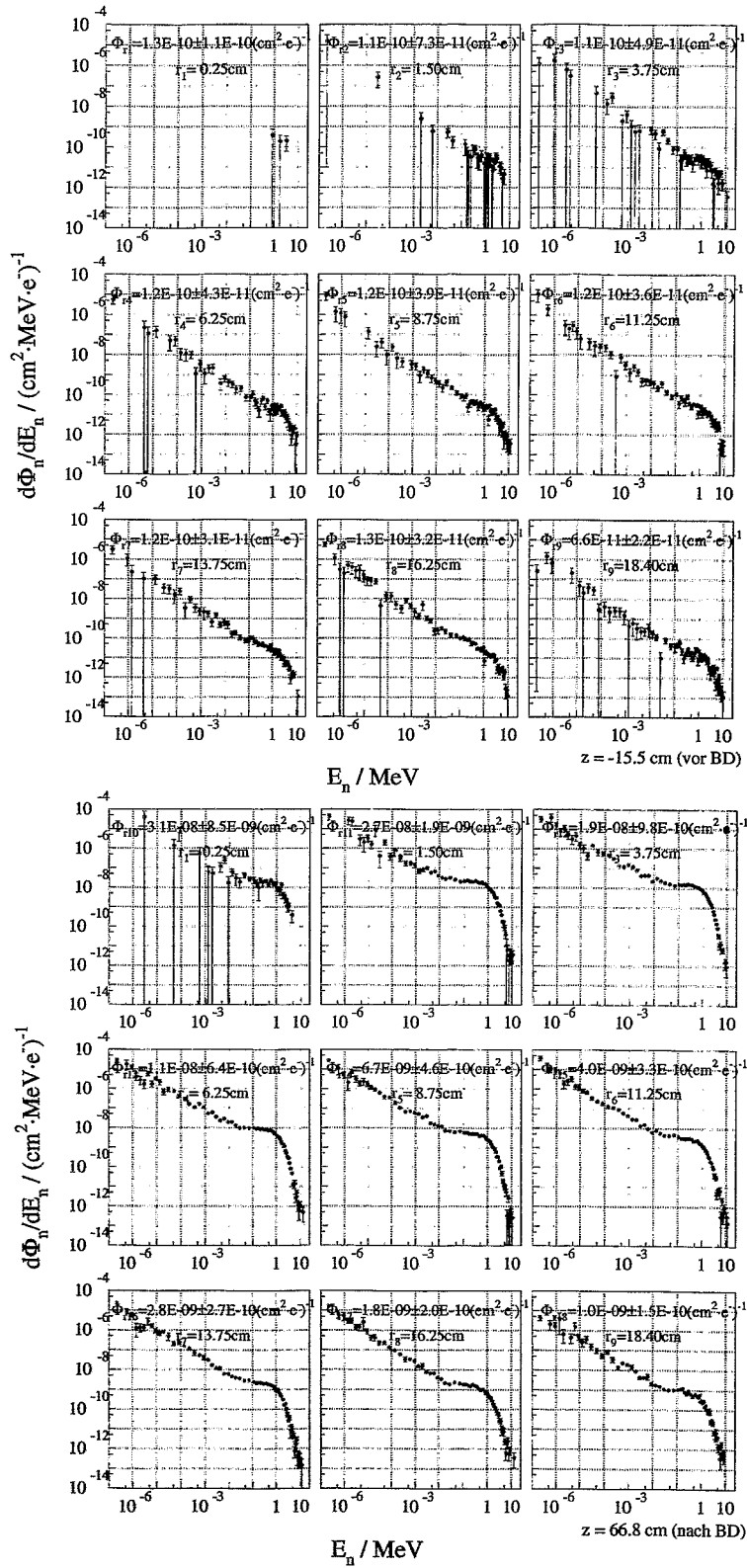


Abbildung 6: Fluenzspektren für Neutronen bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$ ; radiale Abschnitte

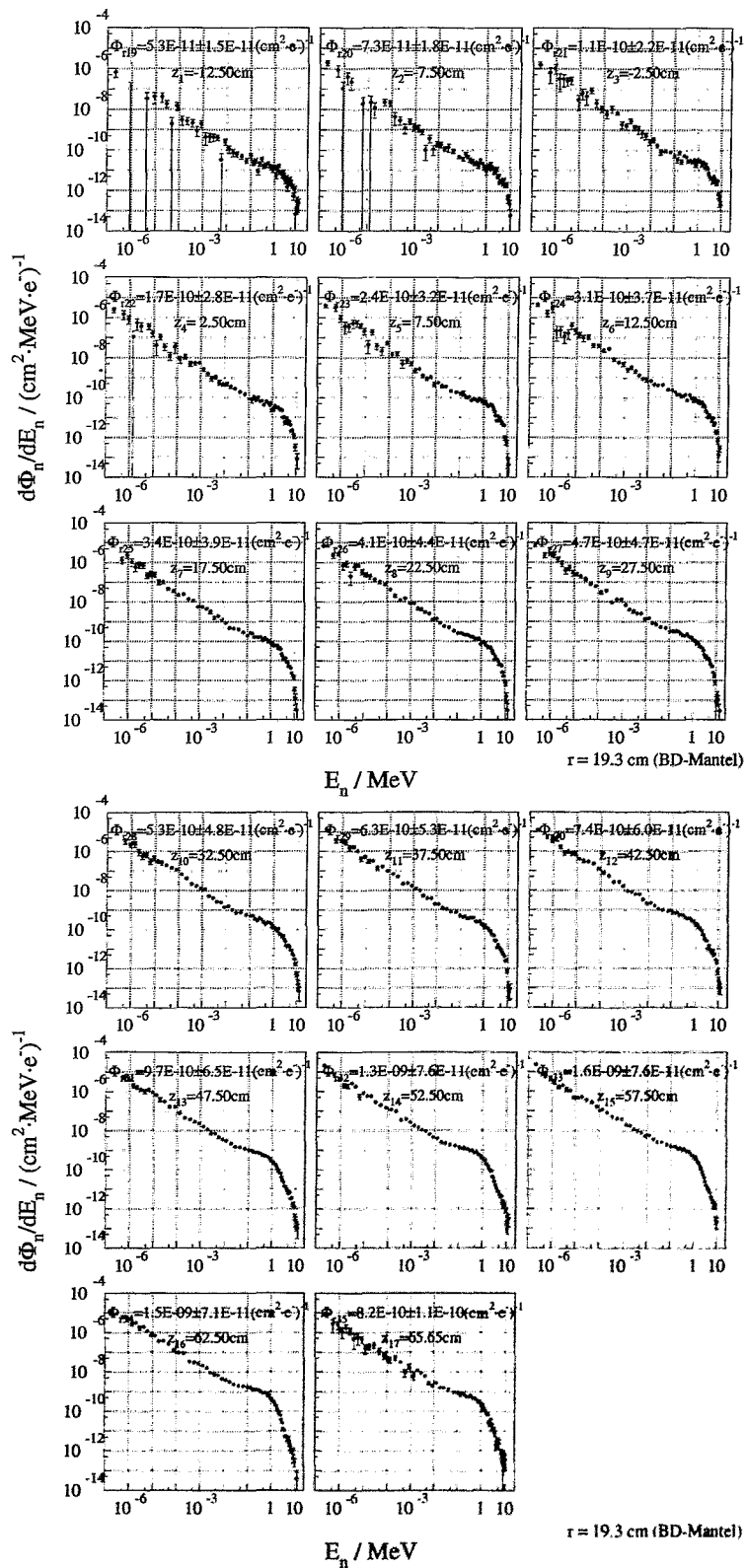


Abbildung 7: Fluenzspektren für Neutronen bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$ ; transversale Abschnitte

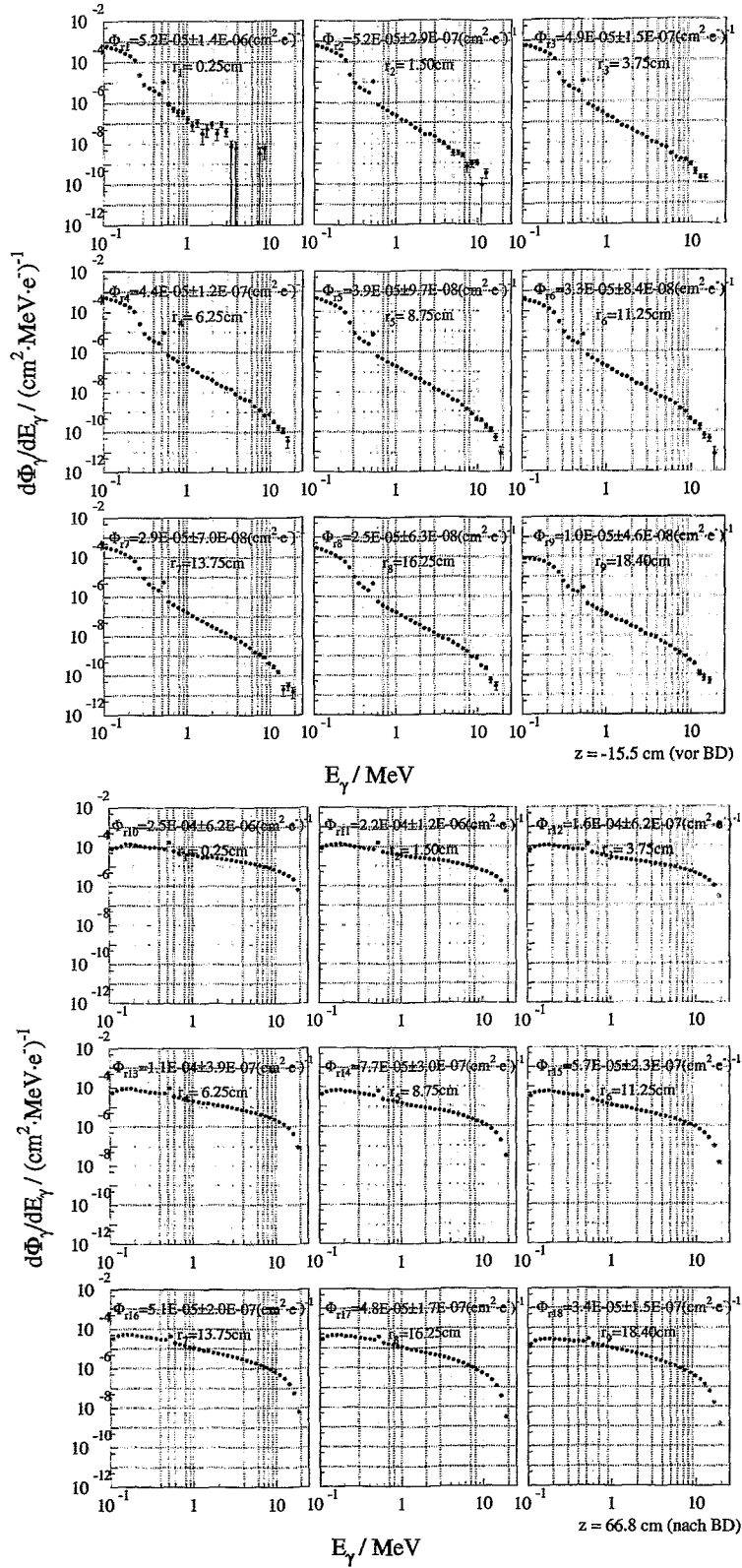


Abbildung 8: Fluenzspektren für Photonen bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$ ; radiale Abschnitte

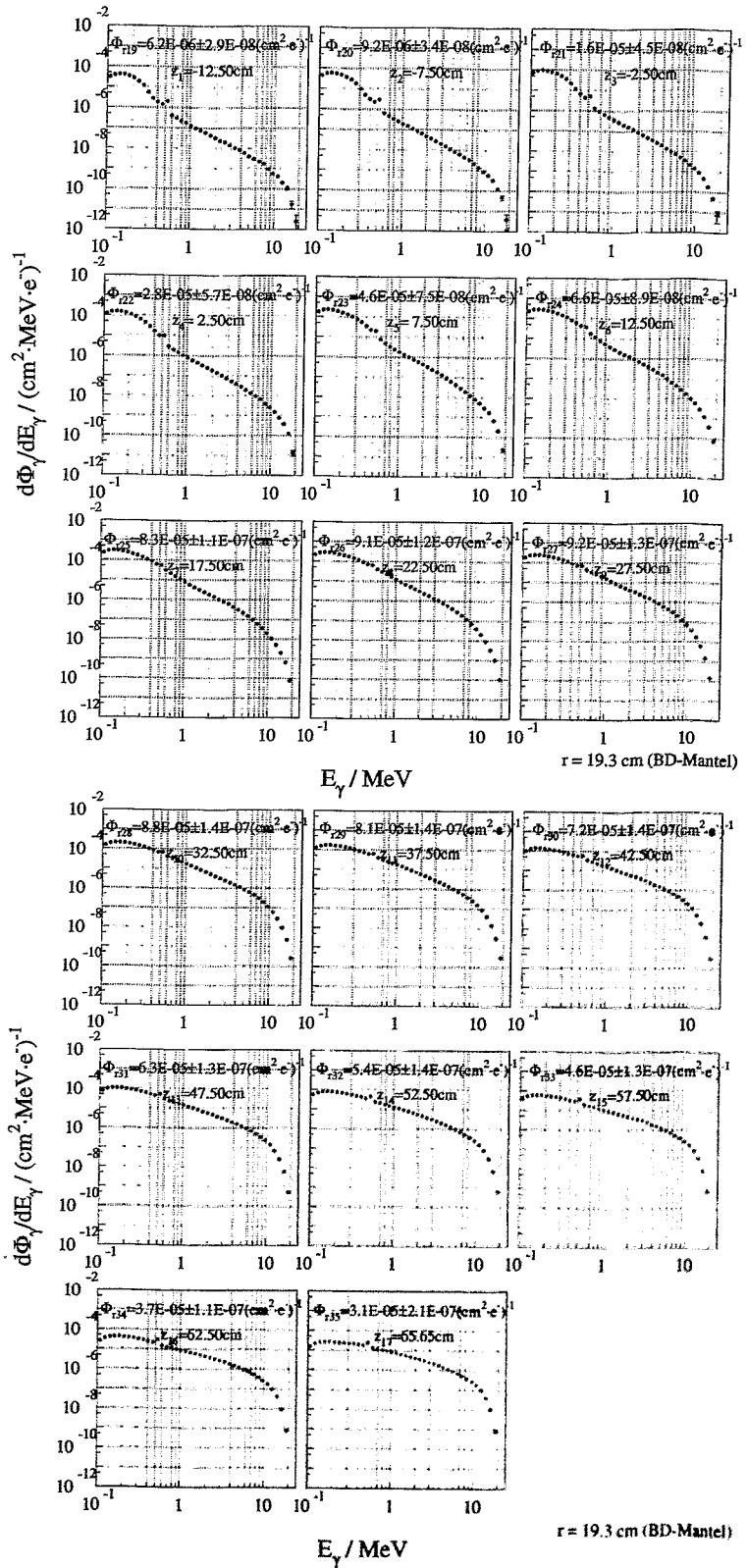


Abbildung 9: Fluenzspektren für Photonen bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$ ; transversale Abschnitte



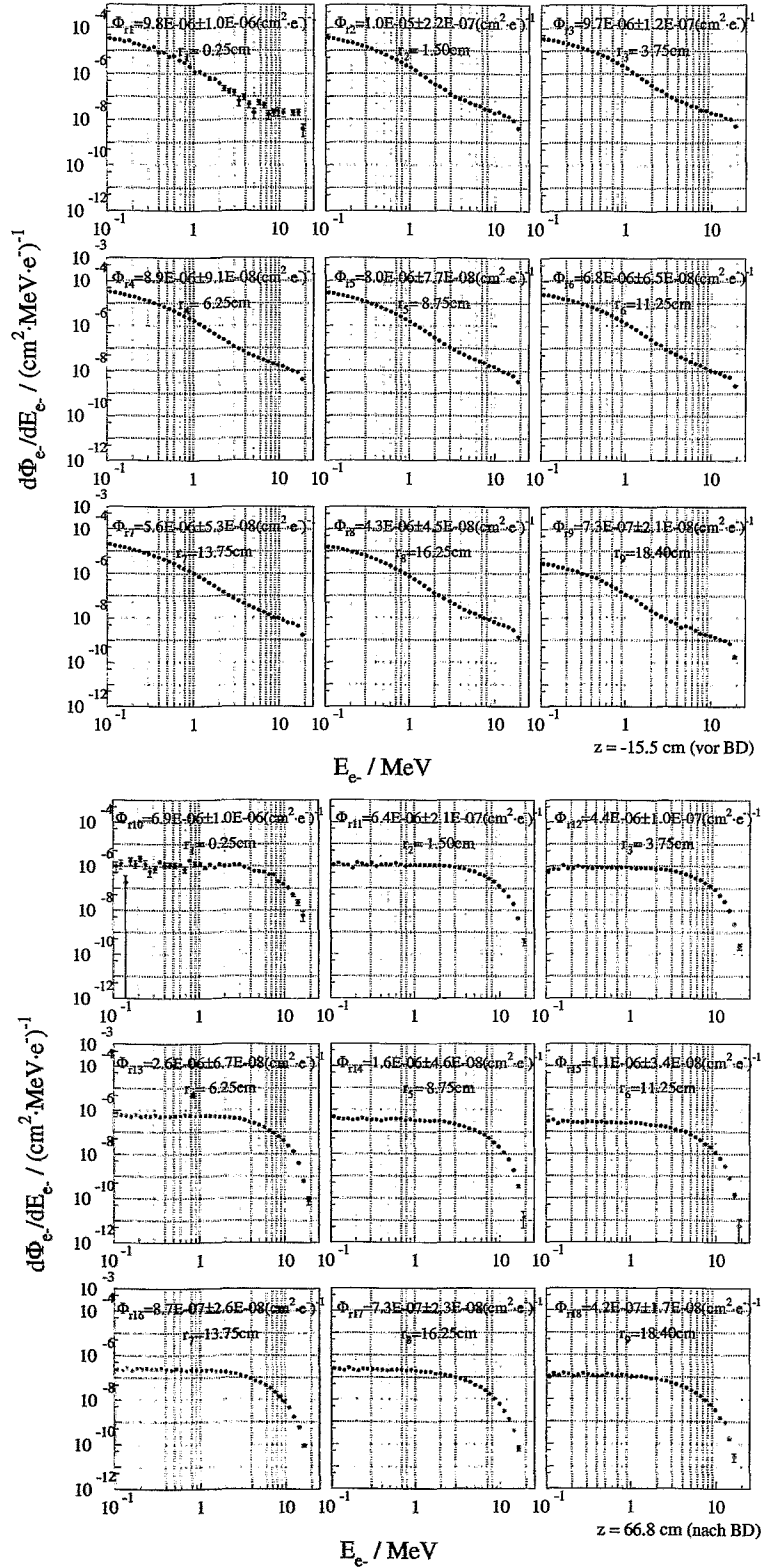


Abbildung 10: Fluenzspektren für Elektronen bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$ ; radiale Abschnitte

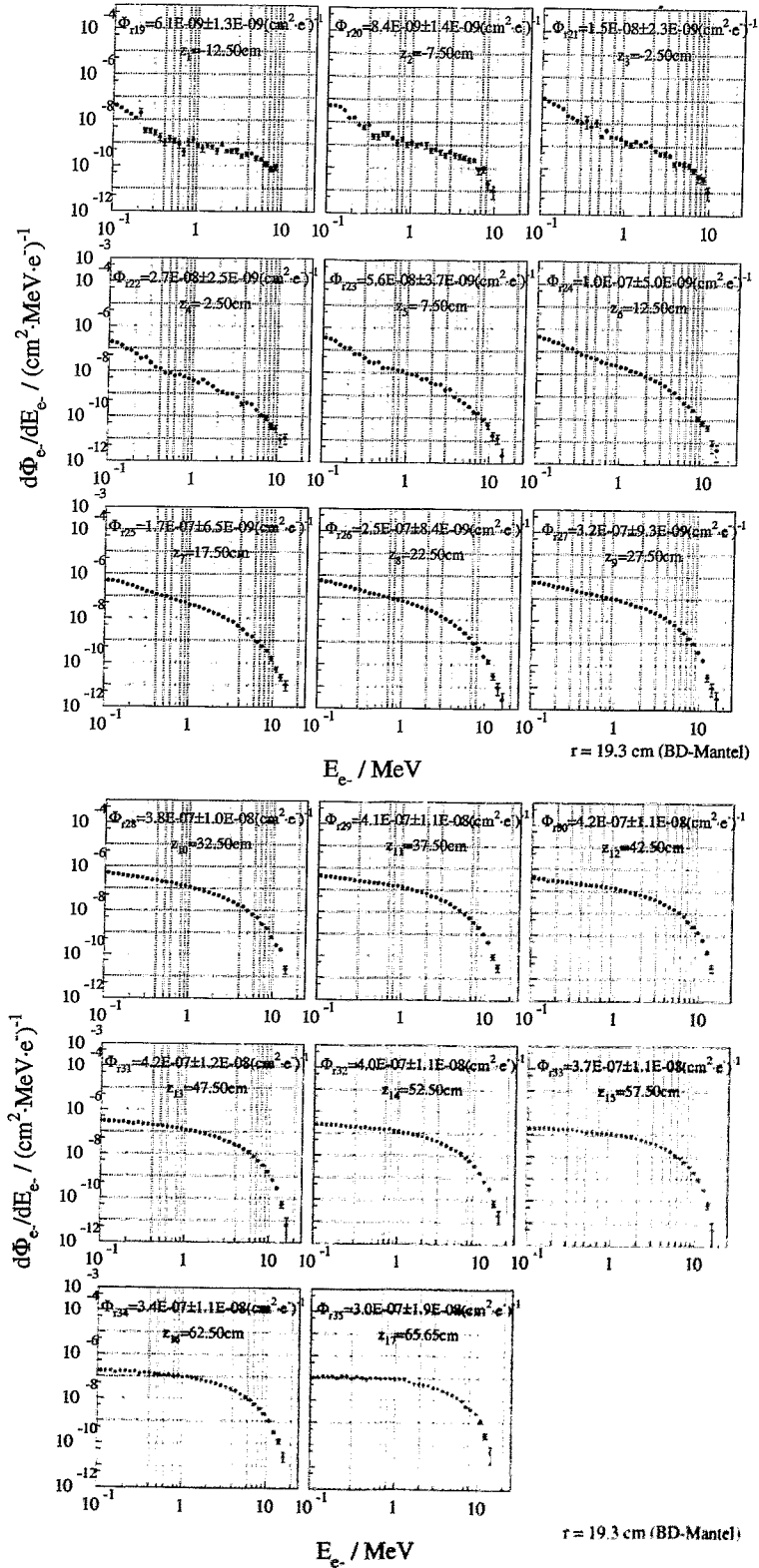


Abbildung 11: Fluenzspektren für Elektronen bei  $E_0 = 20$  MeV; transversale Abschnitte

### 3.2 Fluenzspektren bei Strahlenergie $E_0 = 50 \text{ MeV}$

Berechnet wurden entsprechend Kapitel 3.1 die Fluenzspektren aus den radialen und transversalen Abschnitten in Richtung Eisenabschirmung bei 50 MeV Strahlenergie. Die integralen Teilchenfluenzen wurden durch Integration über die Energie bestimmt und werden in Abhängigkeit von der Position der Teilabschnitte in Abb. 12 zusammengestellt. Die drei Graphiken entsprechen der in Kapitel 3.1 eingeführten Präsentationsform und beschreiben die Ortsverteilung der Fluenzen entlang der gewählten radialen und transversalen Teilflächen.

Die größeren Wirkungsquerschnitte der Photoneutron-Reaktion im Energiebereich bis 50 MeV bewirken deutlich größere Neutronenfluenzen im Vergleich zu den Rechnungen bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$  (s. Abb. 5).

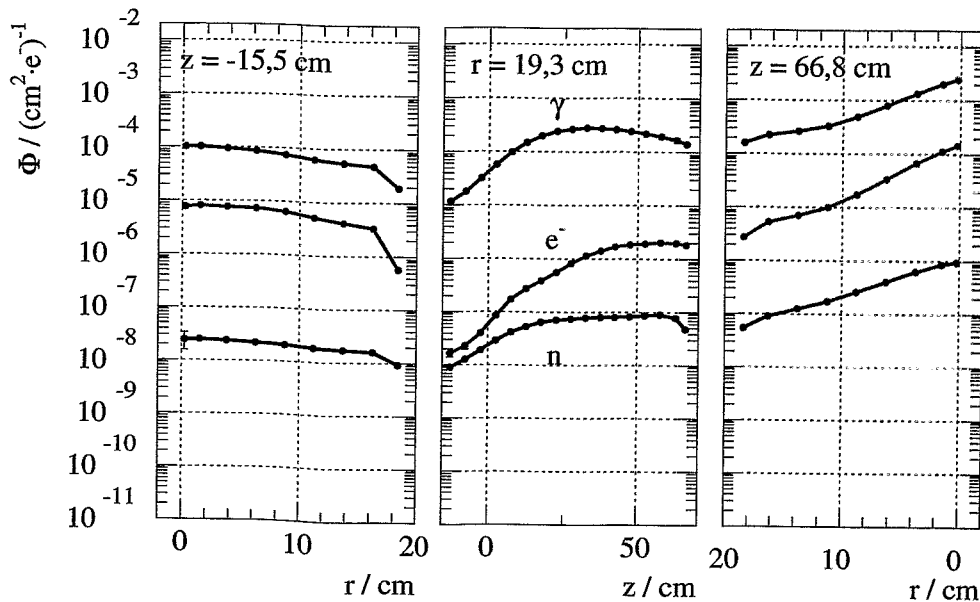


Abbildung 12: Verteilung der Fluenzen bei  $E_0 = 50 \text{ MeV}$  in Abhängigkeit von der Position der Teilabschnitte für  $E_\gamma \geq 100 \text{ keV}$ ,  $E_e \geq 100 \text{ keV}$  und den gesamten Neutronenenergiebereich.

Die Fluenzspektren der einzelnen Teilabschnitte sind für Neutronen in den Abb. 13 und 14, für Photonen in den Abb. 15 und 16 und für Elektronen in den Abb. 17 und 18 dargestellt. Die integralen Fluenzen sowie die Position der Abschnitte sind in den Spektren eingetragen worden.

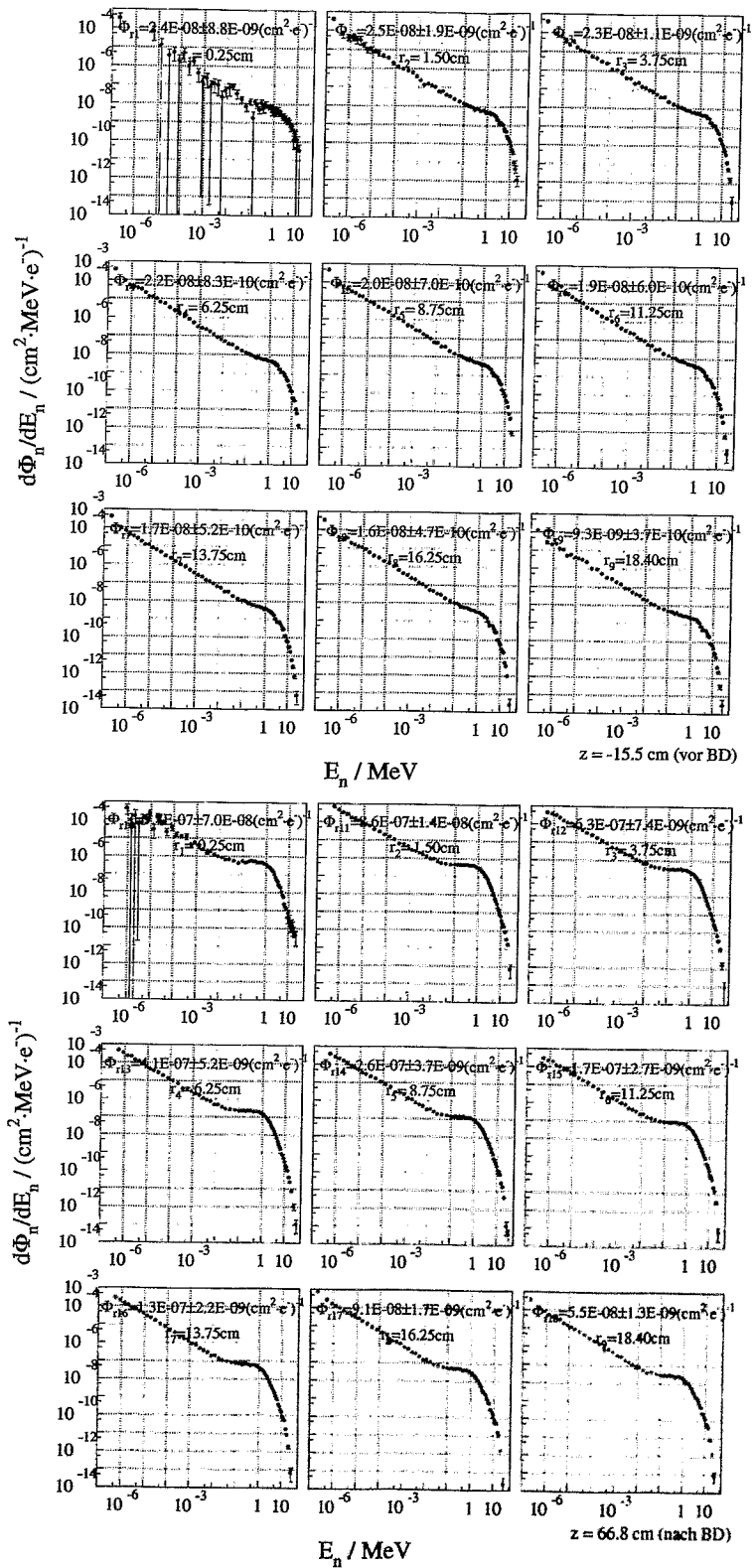


Abbildung 13: Fluenzspektren für Neutronen bei  $E_0 = 50 \text{ MeV}$ ; radiale Abschnitte

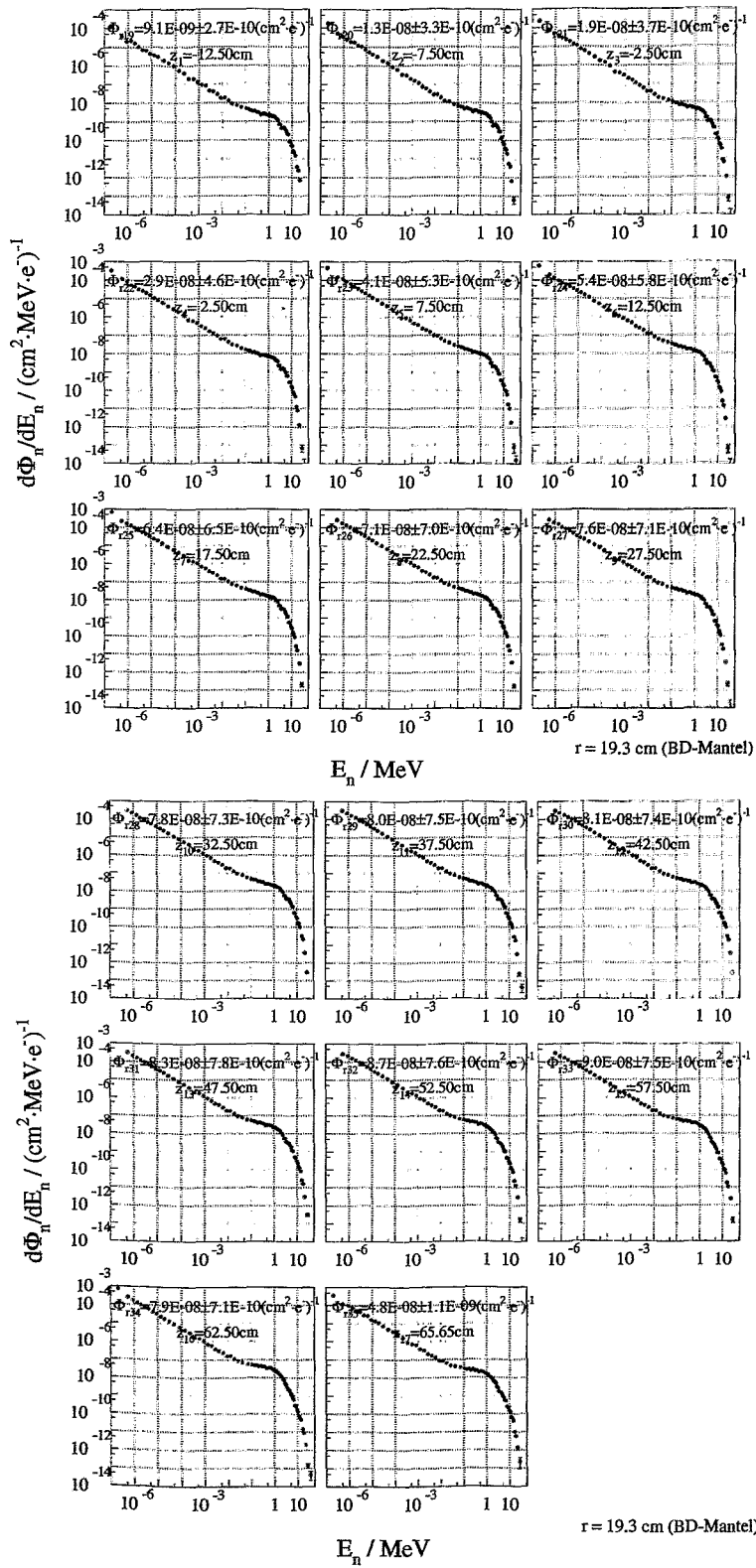


Abbildung 14: Fluenzspektren für Neutronen bei  $E_0 = 50 \text{ MeV}$ ; transversale Abschnitte

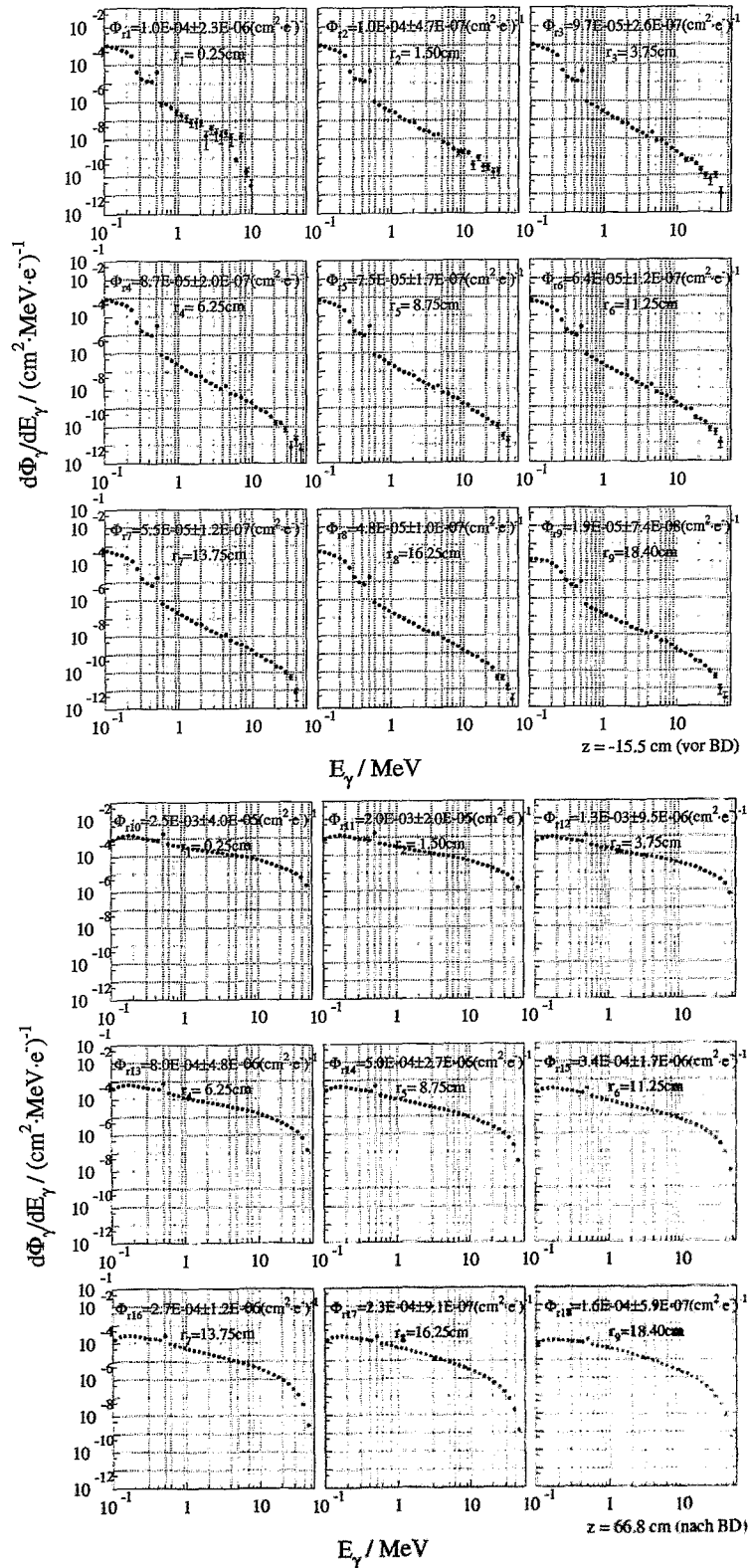


Abbildung 15: Fluenzspektren für Photonen bei  $E_0 = 50 \text{ MeV}$ ; radiale Abschnitte

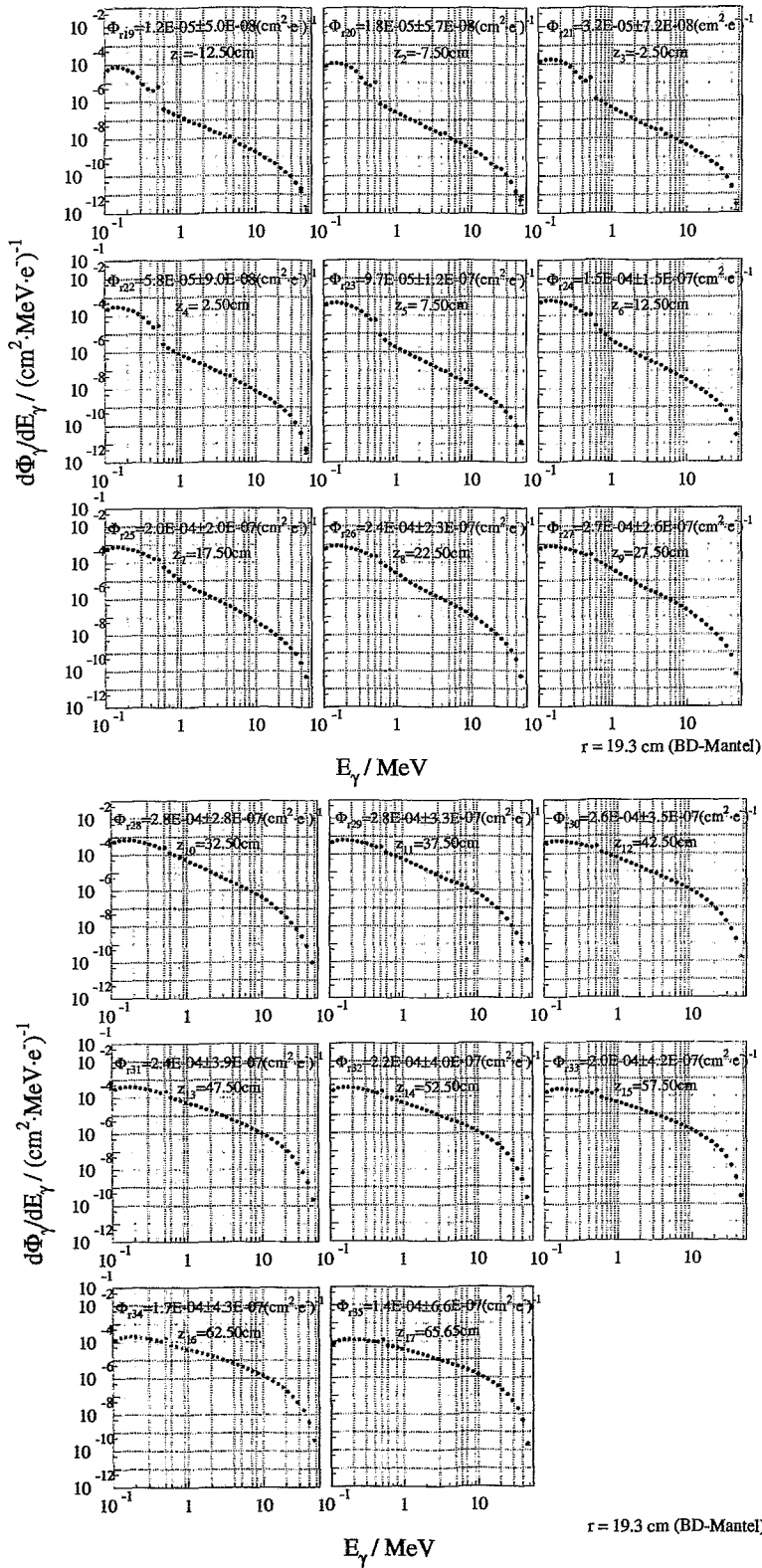


Abbildung 16: Fluenzspektren für Photonen bei  $E_0 = 50 \text{ MeV}$ ; transversale Abschnitte

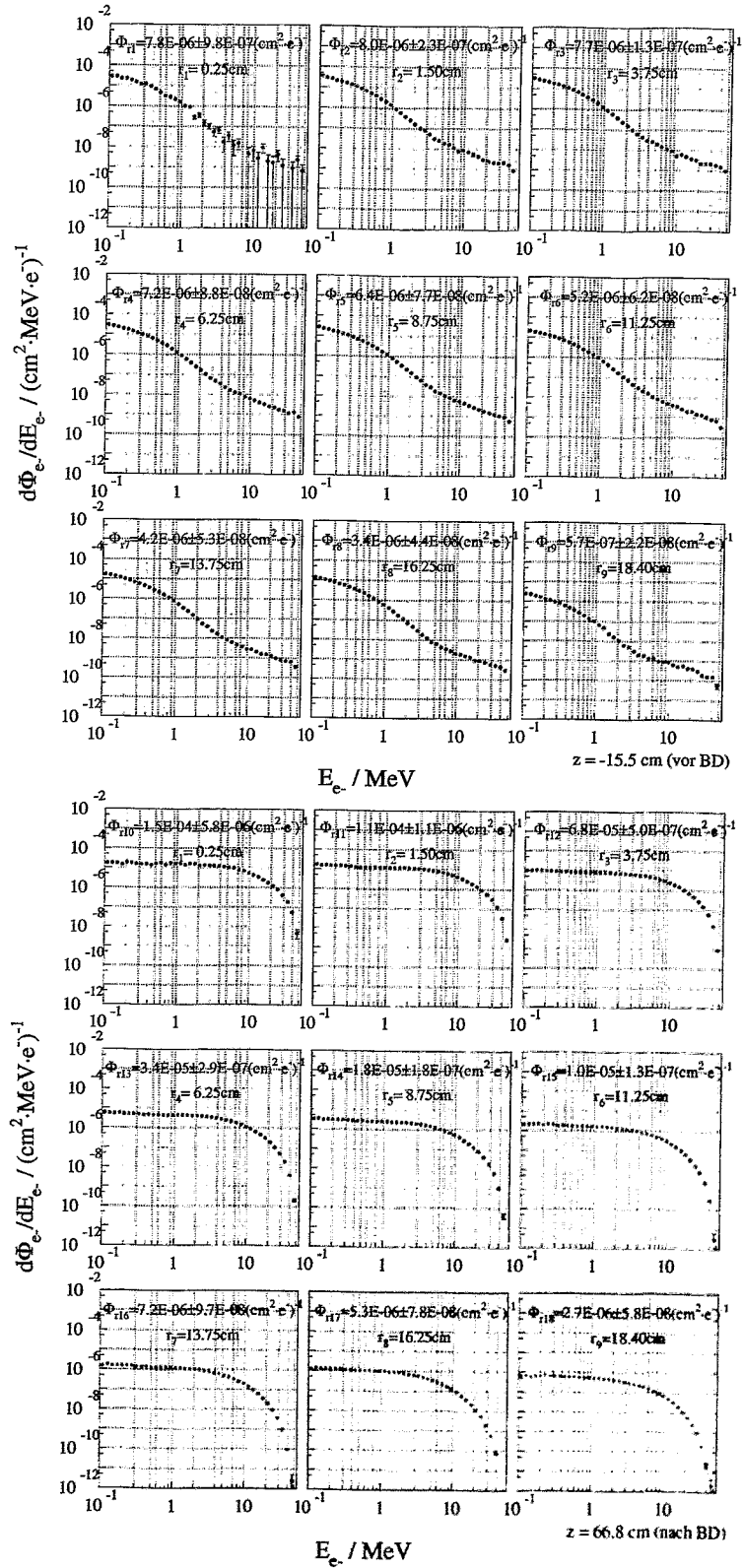


Abbildung 17: Fluenzspektren für Elektronen bei  $E_0 = 50$  MeV; radiale Abschnitte



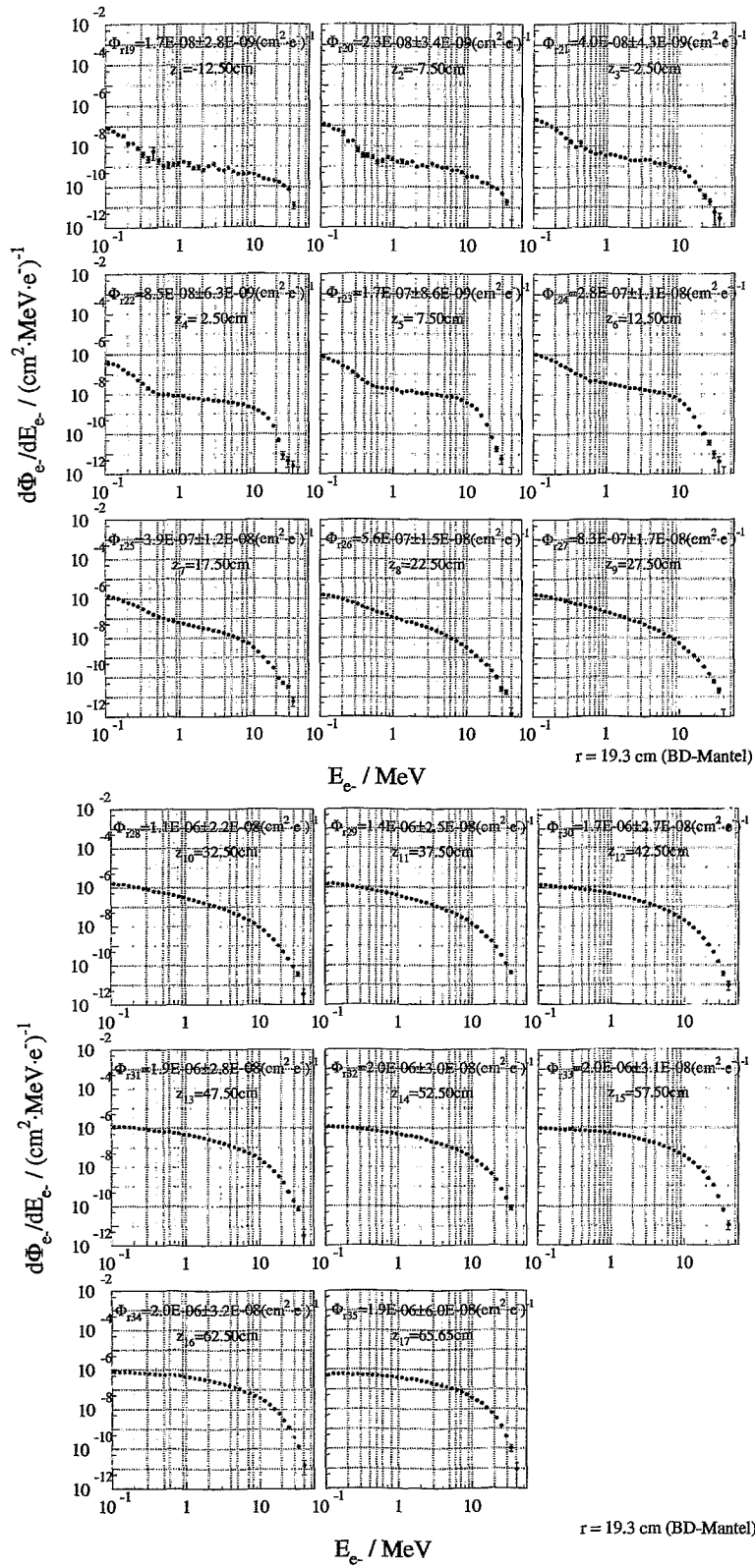


Abbildung 18: Fluenzspektren für Elektronen bei  $E_0 = 50$  MeV; transversale Abschnitte

## 4 Flussdichten und Äquivalentdosisleistungen

### 4.1 Verteilungen der Teilchenflussdichten

Die Teilchenflussdichte berechnet sich aus der Teilchenfluenz durch Multiplikation mit der gegebenen Stromstärke, welche an den verschiedenen Experimentierplätzen der Strahlungsquelle ELBE unterschiedlich sein wird (s. Tab. 1). Für die Bestimmung der abzuschirmenden Dosis um die Strahlfänger wurde in den Rechnungen von der an ELBE geplanten maximalen Stromstärke von

$$I_{\max} = 1 \text{ mA} \equiv 0.624 \cdot 10^{16} \frac{e^-}{s}, \quad (4.1)$$

ausgegangen. Die ortsabhängigen Flussdichtespektren der vom Strahlfänger emittierten Teilchen wurden aus den Fluenzspektren für eine Strahlenergie von 20 MeV (s. Abb. 6 bis 11) bzw. für eine Energie von 50 MeV (s. Abb. 13 bis 18) bei  $I_{\max}$  berechnet. In den Abb. 19 und 20 sind die über die Energie integrierten Flussdichten für jeden geometrischen Teilabschnitt, getrennt nach Teilchensorten, für die beiden Strahlenergien 20 MeV und 50 MeV zusammengestellt. Die drei Graphiken entsprechen wieder der in Kapitel 3.1 eingeführten Präsentationsform und beschreiben die Ortsverteilung der Flussdichten entlang der gewählten Teilflächen.

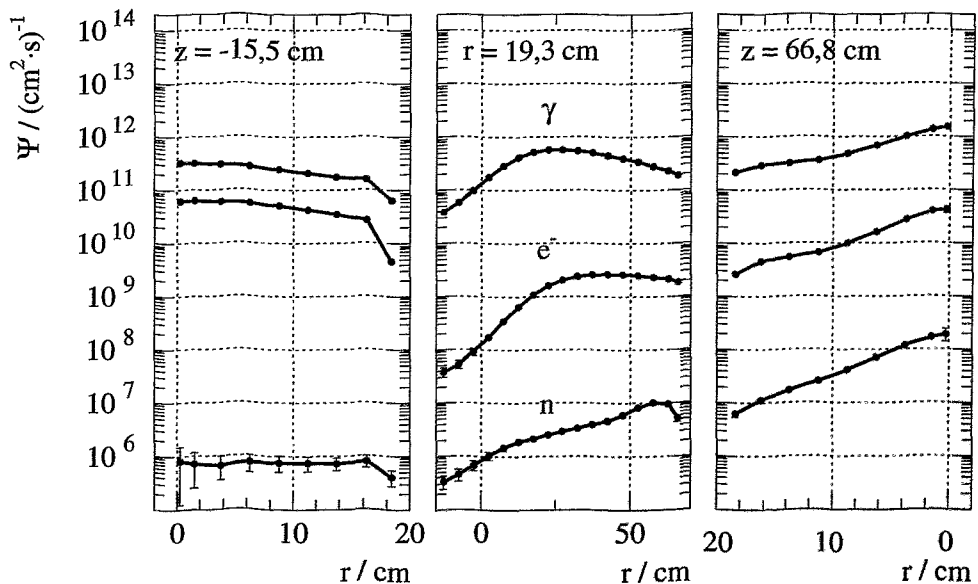


Abbildung 19: Verteilung der Teilchenflussdichten bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$  und  $I = 1 \text{ mA}$  in Abhängigkeit von der Position der Teilabschnitte für  $E_\gamma \geq 100 \text{ keV}$ ,  $E_e \geq 100 \text{ keV}$  und den gesamten Neutronenenergiebereich.

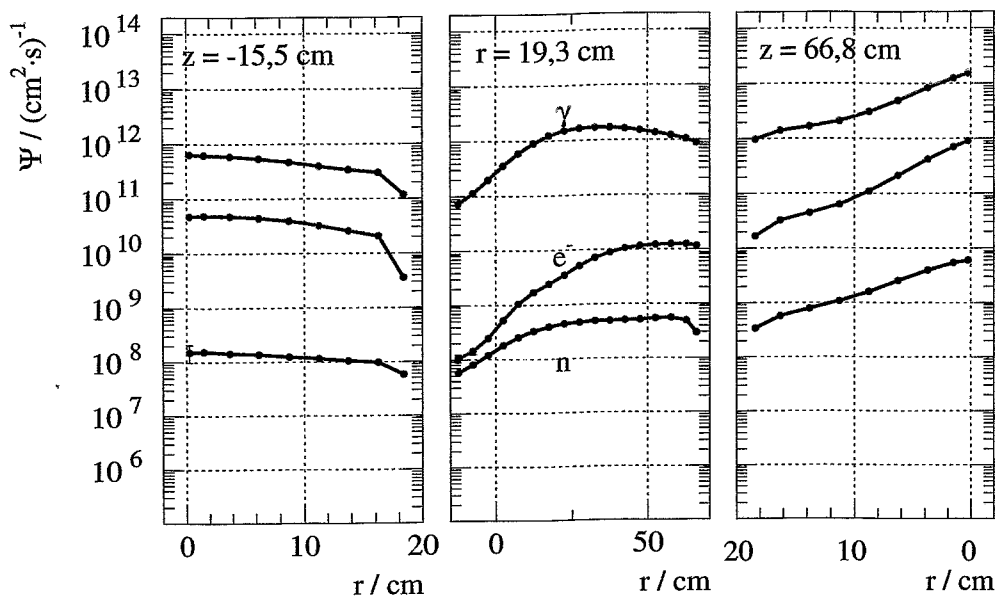


Abbildung 20: Verteilung der Teilchenflussdichten bei  $E_0 = 50$  MeV und  $I = 1$  mA in Abhängigkeit von der Position der Teilabschnitte für  $E_\gamma \geq 100$  keV,  $E_e \geq 100$  keV und den gesamten Neutronenenergiebereich.

## 4.2 Verteilungen der Äquivalentdosisleistungen

Für die Bewertung der Strahlenexposition des Menschen ist die Größe der Äquivalentdosis von wesentlicher Bedeutung. Die Internationale Kommission für Strahlenschutz ICRP [ICRP] legt für die Berechnung der Äquivalentdosis aus dem Teilchenfluss Konversionsfaktoren für Photonen und Neutronen fest. In den Faktoren für Neutronen sind die Qualitätsfaktoren berücksichtigt. Da die Faktoren für Photonen nur bis zu einer Energie von 10 MeV von der ICRP festgelegt worden sind, wurde für den sich anschließenden Bereich bis 50 MeV auf Faktoren in einer Originalarbeit [Fer96] zurückgegriffen.

Die energieabhängigen Äquivalentdosisleistungen wurden aus den Photonen- und Neutronen-Flussdichtespektren der einzelnen geometrischen Teilabschnitte unter Anwendung der Konversionsfaktoren berechnet. Die energieabhängigen Konversionsfaktoren für Photonen und Neutronen sind in Abb. 21 dargestellt. Die Energieschwelle für den Transport der Photonen wurde in den vorliegenden Rechnungen mit dem Teilchentransport-Programm FLUKA bei 100 keV festgelegt.

Die Verteilungen der integralen Äquivalentdosisleistungen um den Strahlfänger sind für 20 MeV Einschussenergie in Abb. 22 und für 50 MeV in Abb. 23 dargestellt. In Kapitel 5 werden die Verteilungen der Energiedosisleistung in der Strahlfänger-Anordnung präsentiert, welche sich aus den Verteilungen der deponierten Energie ergeben.

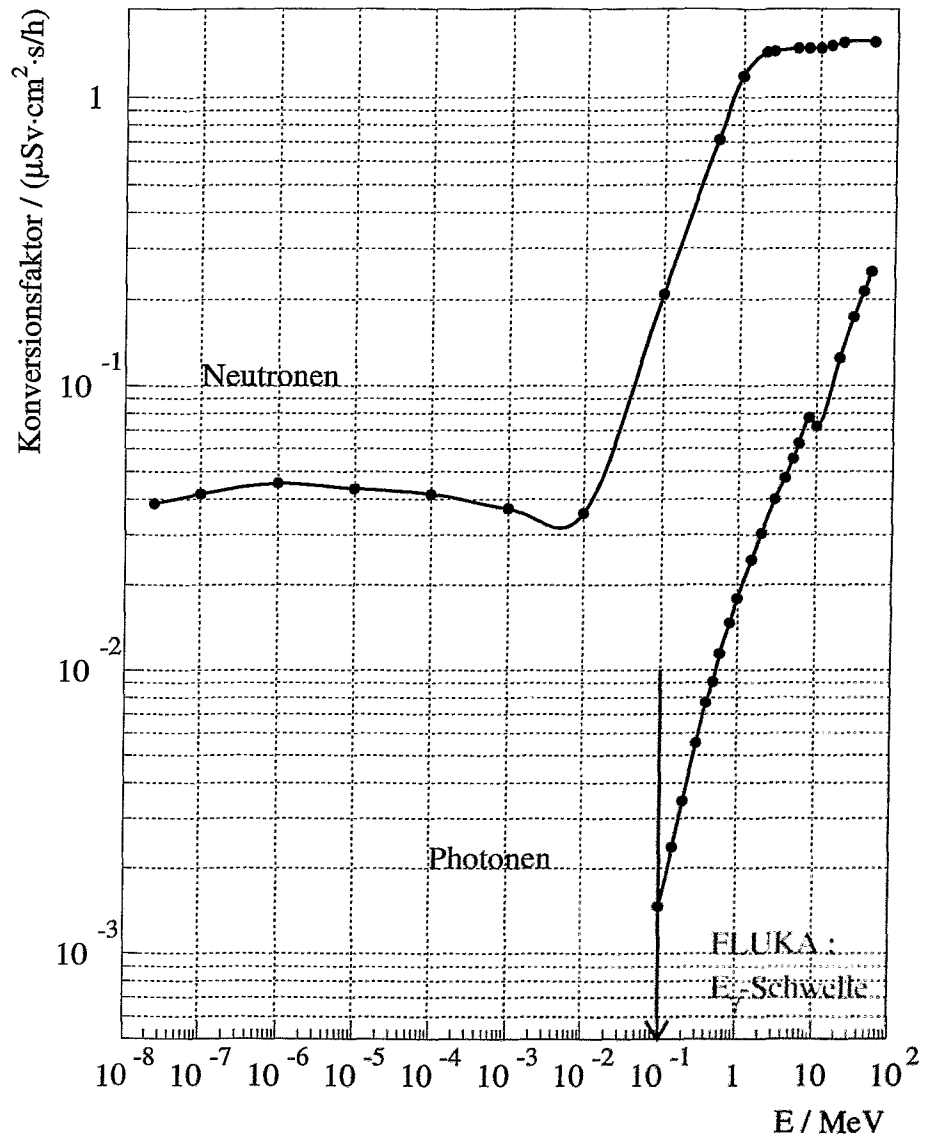


Abbildung 21: Konversionsfaktoren für Neutronen und Photonen von der Flussdichte  $[(\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$  zur Äquivalentdosisleistung  $[\mu\text{Sv} / \text{h}]$  aus [ICRP]. Die Energieschwelle für den Transport der Photonen beträgt im Teilchentransport-Programm FLUKA 100 keV.

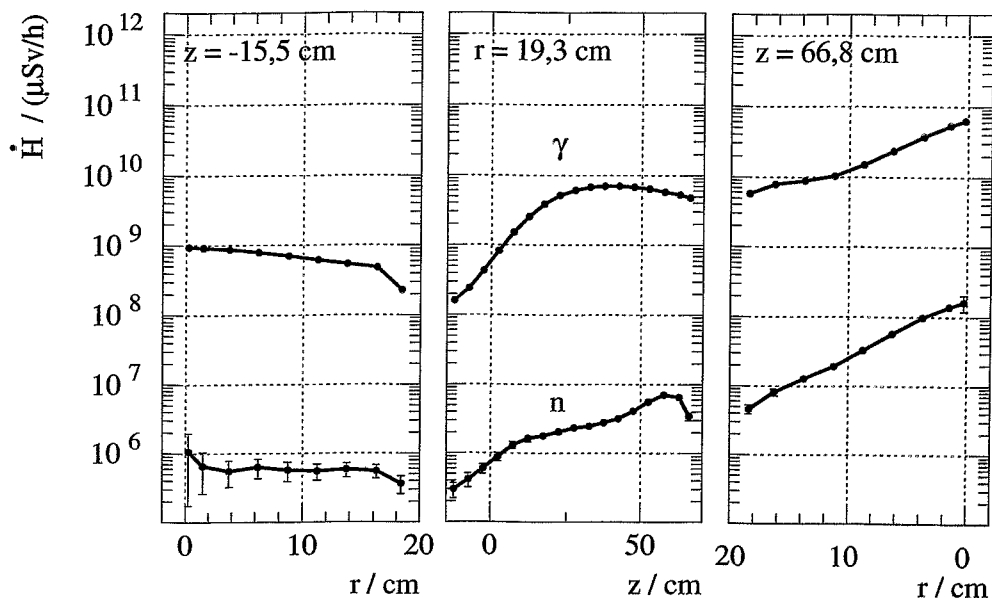


Abbildung 22: Verteilung der Äquivalentdosisleistung um den Strahlfänger bei  $E_0 = 20 \text{ MeV}$  und  $I = 1 \text{ mA}$  für  $E_\gamma \geq 100 \text{ keV}$ ,  $E_e \geq 100 \text{ keV}$  und den gesamten Neutronenenergiebereich.

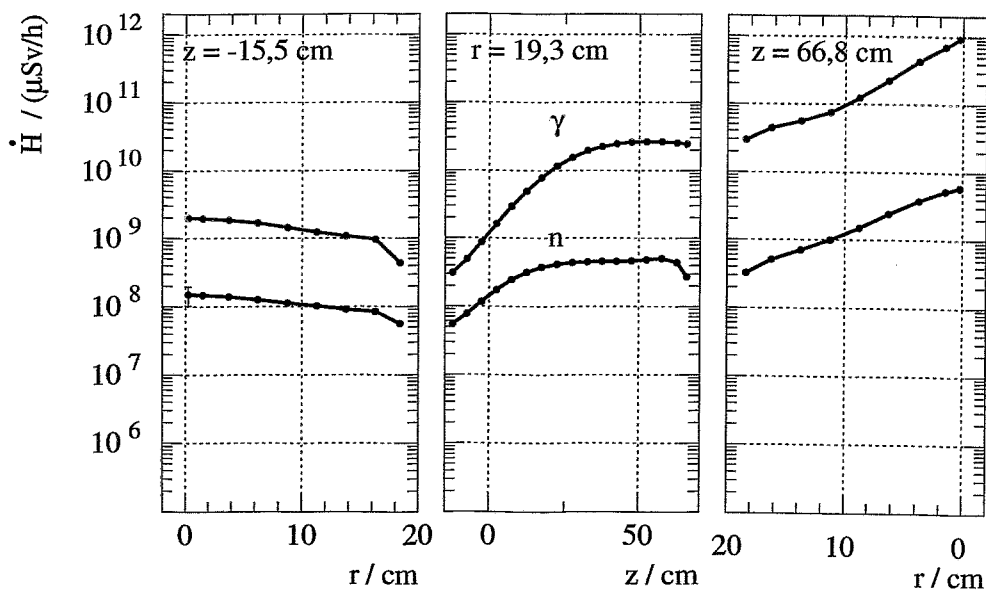


Abbildung 23: Verteilung der Äquivalentdosisleistung um den Strahlfänger bei  $E_0 = 50 \text{ MeV}$  und  $I = 1 \text{ mA}$  für  $E_\gamma \geq 100 \text{ keV}$ ,  $E_e \geq 100 \text{ keV}$  und den gesamten Neutronenenergiebereich.

# 5 Energiebilanzen und Energiedosisleistungen im Strahlfänger

## 5.1 Energiebilanzen

In diesem Kapitel werden die Energiebilanzen für die Strahlenergien  $E_0 = 20 \text{ MeV}$  und  $E_0 = 50 \text{ MeV}$  vorgestellt. Die Werte werden jeweils auf ein Inzidentteilchen bezogen. In Tab. 4 sind i) die im gesamten Graphit-Absorber, in den Edelstahlwänden und im Kühlwasser deponierte Energie, ii) die integralen Energie-Anteile der das System verlassenden Teilchen ("Restenergie") und iii) die Energiebilanzen zusammengestellt. Die in den betrachteten Strahlfänger-Komponenten deponierte Energie wird direkt mit der Monte-Carlo Methode aus dem Teilchentransport ermittelt. Die in der Tabelle angegebenen Werte für die "Restenergie", welche von den Photonen und den Elektronen emittiert wird, basieren auf der Berechnung der Teilchenstromspektren, welche für jeden Teilabschnitt bestimmt wurden.

Komponente	$E_0 = 20 \text{ MeV}$		$E_0 = 50 \text{ MeV}$	
	$\Delta E \text{ [MeV]}$	$\Delta E/E_0 \text{ [%]}$	$\Delta E \text{ [MeV]}$	$\Delta E/E_0 \text{ [%]}$
Graphit	19,348	96,740	45,815	91,630
Edelstahlwand innen (4 mm)	0,085	0,425	0,415	0,830
Kühlwasser (5 mm)	0,012	0,060	0,065	0,130
Edelstahlwand außen (4 mm)	0,063	0,315	0,328	0,656
Restenergie pro Elektron	0,492	2,460	3,346	6,692
$\gamma$ (z = -15,5 cm)	0,005		0,012	
(z = 66,8 cm)	0,209		2,250	
(r = 19,3 cm)	0,268		0,974	
$e^-$ (z = -15,5 cm)	0,004		0,003	
(z = 66,8 cm)	0,004		0,090	
(r = 19,3 cm)	0,002		0,016	
Summe $\Delta E + \text{Restenergie}$	20,000	100,000	49,969	99,938

Tabelle 4: Energiebilanzen im Strahlfänger bei 20 MeV und 50 MeV, jeweils bezogen auf ein Inzidentteilchen;  
 oben : Anteile der in den Materialien deponierten Energie,  
 Mitte : Anteile der von den Sekundärteilchen emittierten Energie und  
 unten : summarische Energiebilanzen.

## 5.2 Energiedosisleistungen im Strahlfänger basierend auf $\Delta E$

Zur Bestimmung der Verteilung der deponierten Energie bzw. der Energiedosis in der Strahlfänger-Anordnung aus Graphit-Absorber und Kühlmantel, wurden Rechnungen mit einer speziellen Geometrie durchgeführt, welche sich von der in Kapitel 2 beschriebenen unterscheidet. Betrachtet wird ein geometrisches Gitter in Zylinder-Geometrie, welches über die Strahlfänger-Anordnung aus Abb. 4 gelegt wird. Das Gitter besteht aus 20 radialen ( $0 \text{ cm} \leq r \leq 20 \text{ cm}$ ) und 83 transversalen ( $-16 \text{ cm} \leq z \leq 67 \text{ cm}$ ) Abschnitten mit Schrittweiten von je 1 cm. Mit den Gittergrenzen werden Ringsegmente beschrieben. Die Materialgrenzen der Anordnung stimmen zum Teil nicht mit den Gittergrenzen überein. Es wird berechnet, wieviel Energie in jedem Ringsegment beim Teilchentransport deponiert wird, wobei nicht unterschieden wird, welche Teilchenart die Energie deponiert hat.

Aus den Verteilungen der deponierten Energie in der gesamten Strahlfänger-Anlage, wurden die Verteilungen der Energiedosis bestimmt. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Materialdichten in jedem Ringsegment des Gitters, wird die Energiedosis pro Inzidenzteilchen nach Gleichung 5.1 berechnet. In Segmenten, welche aufgrund der vorgegebenen Geometrie des Gitters mehrere Materialien enthalten, wird die Dosis entsprechend gemittelt.

$$D [\text{Gy}/e^-] = \Delta E [\text{GeV}/(e^- \cdot \text{cm}^3)] \cdot \frac{1,60219 \cdot 10^{-10} [\text{J/GeV}] \cdot 10^3 [\text{g/kg}]}{\rho [\text{g/cm}^3]} \quad (5.1)$$

Wird die an ELBE vorgesehene maximale Stromstärke von 1 mA zugrunde gelegt, kann die Energiedosisleistung mit Gleichung 5.4 berechnet werden.

Mit

$$\frac{1}{e^-} = 2,25 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{mA} \cdot \text{h}} \quad (5.2)$$

ergibt sich

$$\dot{D} \left[ \frac{\mu\text{Gy}}{\text{mA} \cdot \text{h}} \right] = D \left[ \frac{\text{Gy}}{e^-} \right] \cdot 2,25 \cdot 10^{19} \left[ \frac{e^-}{\text{mA} \cdot \text{h}} \right] \cdot 10^6 \left[ \frac{\mu\text{Gy}}{\text{Gy}} \right] \quad (5.3)$$

$$\dot{D} \left[ \frac{\mu\text{Gy}}{\text{mA} \cdot \text{h}} \right] = 2,25 \cdot 10^{25} \cdot D \left[ \frac{\text{Gy}}{e^-} \right]. \quad (5.4)$$

Die räumlichen Verteilungen der Energiedosisleistung für Strahlenergien von 20 MeV und 50 MeV sind in den Abb. 24 und 25 dargestellt. Die Bedingungen für die Durchführung der Teilchentransport-Rechnungen mit FLUKA entsprechen den in Kapitel 1 beschriebenen. Die Elektronen starten bei  $z = -5 \text{ cm}$  und werden als Parallelstrahl mit einem Durchmesser von 8 cm auf den Graphit-Absorber gerichtet.

Die Verteilungen der thermischen Leistungsdichte im Strahlfänger bilden die Grundlage für die Berechnung der thermischen Materialbelastung sowie der Auslegung des Kühlsystems.

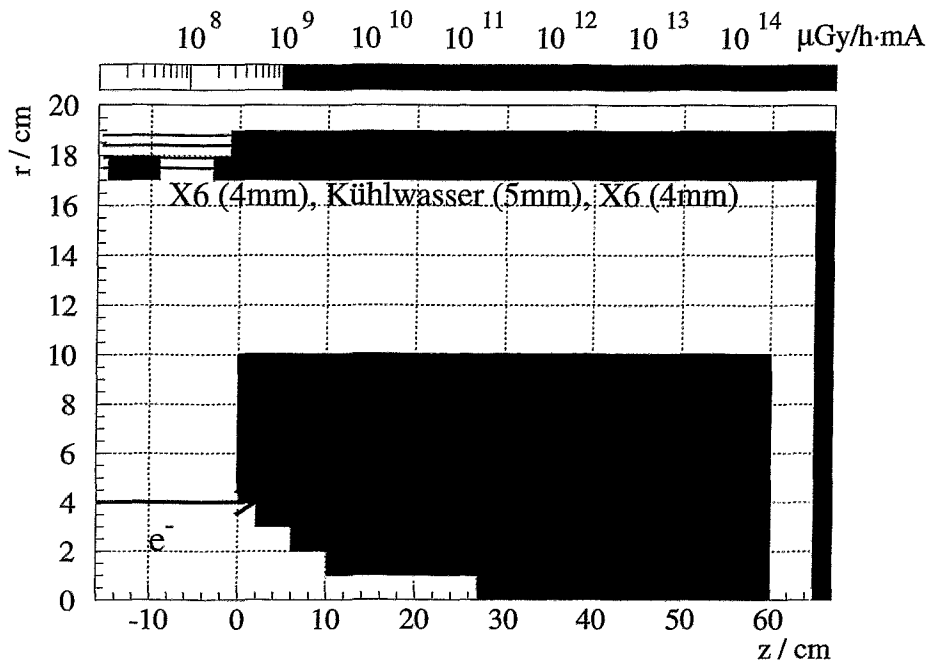


Abbildung 24: Energiedosisleistung im Strahlfänger bei  $E_0 = 20$  MeV; Unterteilung der Anordnung in Ringsegmente mit  $\Delta r = 1$  cm und  $\Delta z = 1$  cm.

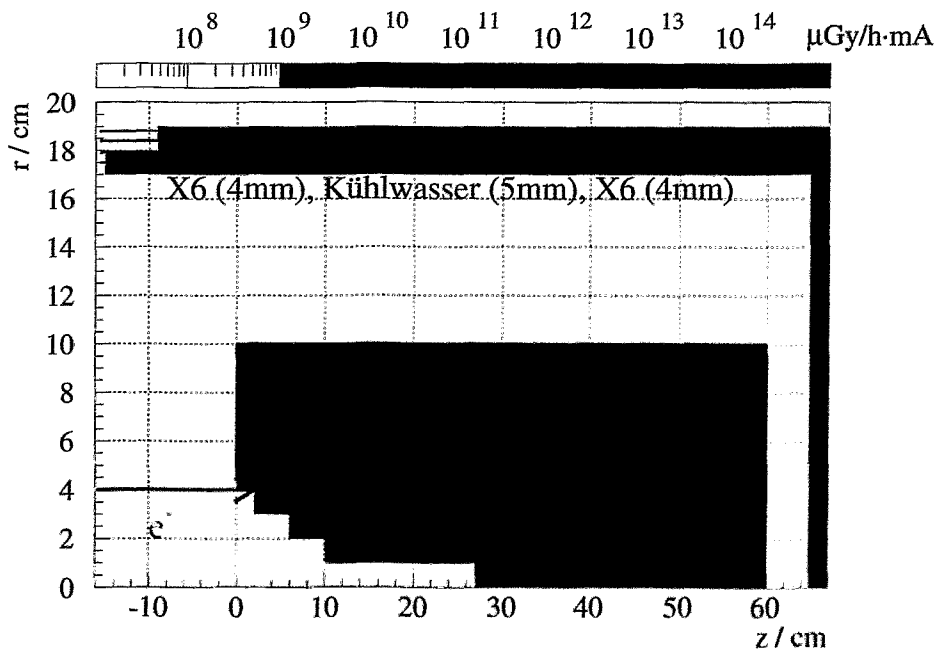


Abbildung 25: Energiedosisleistung im Strahlfänger bei  $E_0 = 50$  MeV; Unterteilung der Anordnung in Ringsegmente mit  $\Delta r = 1$  cm und  $\Delta z = 1$  cm.



## 6 Zusammenfassung

Für den an der Strahlungsquelle ELBE zum Einsatz kommenden Typ eines Strahlfängers auf der Basis von Reinstgraphit, wurden Rechnungen zur Bestimmung der Untergrundstrahlung bei Energien des Elektronenstrahls von 20 MeV und 50 MeV durchgeführt. Die in dieser Arbeit vorgestellten ortsabhängigen Verteilungen der Äquivalentdosisleistungen für Photonen und Neutronen um den Kühlmantel des Strahlfängers, sind die Grundlage zur Berechnung der Dimensionierung der notwendigen Abschirmung für die einzelnen Experimentierplätze. Die berechneten Verteilungen der Energiedosisleistung im Strahlfänger dienen der Beurteilung der thermischen Materialbelastung und der Auslegung des Kühlsystems.

*Ich danke Herrn Prof. Klaus Seidel für viele wertvolle Hinweise bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit. Herrn Dr. Matthias Schlett danke ich für die rechentechnische Unterstützung bei der Durchführung der Simulationsrechnungen am Linux-Cluster des Instituts für Kern- und Hadronenphysik.*

## Literatur

- [Fas97] Fasso A. et al., *Total Giant Resonance Photonuclear cross-section for light Nuclei : A Database for the FLUKA Monte Carlo Transport Code*, Proceedings of the III Specialists Meeting on shielding aspects of accelerators, targets and irradiation facilities, Sendai, Japan, 12-13 May 1997.
- [Fer96] Ferrari A. et al., *Fluence to effective dose and effective dose equivalent conversion coefficients for photons from 50 keV to 10 GeV*, Radiation Protection Dosimetry 67 (1996) 245.
- [FLUKA] Fasso A., Ferrari A. and Sala P.R., *Proc. of the Monte Carlo 2000 Conference*, Lisbon, 23-26 October 2000, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [FZR-267] Naumann B. et al., *Entwicklung von Strahlfängern für maximale Elektronenenergie am Beschleuniger ELBE*, FZ Rossendorf, Wissenschaftlich-Technischer Bericht FZR-267 (1999).
- [FZR-319] Naumann B. and Werner M., *Calculations of power dissipation and the temperature distribution in beam dumps at ELBE*, FZ Rossendorf, Wissenschaftlich-Technischer Bericht FZR-319 (2001) 23.
- [ICRP] International Commission on Radiological Protection, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Publication 60, Ann. ICRP 21 (1991).

# Abbildungsverzeichnis

1	Grundriss der Beschleunigerhalle . . . . .	3
2	schematischer Aufbau des Strahlfängers . . . . .	4
3	geometrisches Modell des Strahlfängers in der xy-Ebene . . . . .	7
4	geometrisches Modell des Strahlfängers in der zy-Ebene . . . . .	8
5	Verteilung der Fluenzen bei $E_0 = 20$ MeV . . . . .	9
6	Fluenzspektren für Neutronen bei $E_0 = 20$ MeV (radial) . . . . .	10
7	Fluenzspektren für Neutronen bei $E_0 = 20$ MeV (transversal) . . . . .	11
8	Fluenzspektren für Photonen bei $E_0 = 20$ MeV (radial) . . . . .	12
9	Fluenzspektren für Photonen bei $E_0 = 20$ MeV (transversal) . . . . .	13
10	Fluenzspektren für Elektronen bei $E_0 = 20$ MeV (radial) . . . . .	14
11	Fluenzspektren für Elektronen bei $E_0 = 20$ MeV (transversal) . . . . .	15
12	Verteilung der Fluenzen bei $E_0 = 50$ MeV . . . . .	16
13	Fluenzspektren für Neutronen bei $E_0 = 50$ MeV (radial) . . . . .	17
14	Fluenzspektren für Neutronen bei $E_0 = 50$ MeV (transversal) . . . . .	18
15	Fluenzspektren für Photonen bei $E_0 = 50$ MeV (radial) . . . . .	19
16	Fluenzspektren für Photonen bei $E_0 = 50$ MeV (transversal) . . . . .	20
17	Fluenzspektren für Elektronen bei $E_0 = 50$ MeV (radial) . . . . .	21
18	Fluenzspektren für Elektronen bei $E_0 = 50$ MeV (transversal) . . . . .	22
19	Verteilung der Teilchenflussdichten bei $E_0 = 20$ MeV . . . . .	23
20	Verteilung der Teilchenflussdichten bei $E_0 = 50$ MeV . . . . .	24
21	Konversionsfaktoren von der Flussdichte zur Äquivalentdosisleistung . . . . .	25
22	Äquivalentdosisleistung um den Strahlfänger bei $E_0 = 20$ MeV . . . . .	26
23	Äquivalentdosisleistung um den Strahlfänger bei $E_0 = 50$ MeV . . . . .	26
24	Energiedosisleistung im Strahlfänger bei $E_0 = 20$ MeV . . . . .	29
25	Energiedosisleistung im Strahlfänger bei $E_0 = 50$ MeV . . . . .	29

# Tabellenverzeichnis

1	Strahlparameter an den Messplätzen von ELBE . . . . .	4
2	Parameter der radialen Abschnitte . . . . .	7
3	Parameter der transversale Abschnitte . . . . .	8
4	Energiebilanzen im Strahlfänger bezogen auf ein Inzidenzteilchen . . . . .	27