

Interner Bericht
DESY D3-56
September 1985

SYNCHROTRONSTRAHLUNG IM HERA-TUNNEL

H. Dinter

Eigentum der Property of	DESY	Bibliothek library
Zugang: Accessions:	0 4. NOV. 1985	
Leihfrist: Loan period:	7	Tage days

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

**“Die Verantwortung für den Inhalt dieses
Internen Berichtes liegt ausschließlich beim Verfasser“**

Interner Bericht
DESY D3-56
September 1985

SYNCHROTRONSTRAHLUNG IM HERA-TUNNEL

H. Dinter

ABSTRACT

Dose values due to synchrotron radiation were calculated for a series of positions in the HERA tunnel. The spectrum and angular distribution of multiply scattered synchrotron radiation were determined for each position. Using these spectra and angular distributions the efficiency of local shielding was calculated.

INHALT

1.0	EINLEITUNG	1
2.0	BEMERKUNGEN ZU DEN RECHNUNGEN	2
2.1	Das Programm EGS	2
2.2	Dosisberechnung	5
2.3	Lokale Abschirmung	6
2.4	Genauigkeit der Rechenergebnisse	7
3.0	ERGEBNISSE	8
3.1	Dosiswerte	8
3.2	Spektren und Winkelverteilungen	12
3.3	Lokale Abschirmungen	16
4.0	ZUSAMMENFASSUNG	23
5.0	LITERATUR	24

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung	1. Querschnitt durch den HERA-Tunnel	3
Abbildung	2. Querschnitt durch den Elektronendipol	4
Abbildung	3. Positionen für die Dosisberechnung	6
Abbildung	4. Tabelle 1: Dosiswerte im gebogenen HERA-Tunnel	9
Abbildung	5. Jahresdosen bei 30 GeV	10
Abbildung	6. Ausbreitung der Photonen in der Mitte des Elektronendipols	11
Abbildung	7. Ausbreitung der Photonen im geraden Stück der Vakuumkammer	12
Abbildung	8. Spektren vielfachgestreuter Photonen bei 30 GeV	13
Abbildung	9. Photonenspektren bei verschiedenen Strahlenergien	15
Abbildung	10. Winkelverteilungen	17
Abbildung	11. Absorption in Blei	18
Abbildung	12. Spektren hinter Bleiabsorber	19
Abbildung	13. Absorption in verschiedenen Materialien	20
Abbildung	14. Tabelle 2: Dosiswerte im Elektronikkanal	22

1.0 EINLEITUNG

Bei der Beschleunigung hochenergetischer Elektronen wird Synchrotronstrahlung erzeugt, die im Beschleunigerraum hohe Strahlungsdosen hervorruft. Durch Absorption dieser Strahlung können die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Komponenten des Beschleunigers verändert werden (Strahlungsschäden). Für die Beurteilung der Funktionsfähigkeit solcher Komponenten ist die Kenntnis der Strahlungsdosen deshalb von großem Interesse.

In einem früheren Bericht wurden bereits die Dosen im HERA-Tunnel berechnet (Lit. 1). Dabei wurde von Annahmen ausgegangen, die der Situation Anfang 1983 entsprachen, insbesondere wurde mit einem Tunneldurchmesser von 3,2 m gerechnet. Diese Rechnungen wurden jetzt wiederholt mit der Geometrie im gebogenen Tunnelteil, wie sie im März 1985 bekannt war. Gleichzeitig wurden die Rechnungen auf 40 und 50 GeV Strahlenergie erweitert und die Spektren und Winkelverteilungen der gestreuten Synchrotronstrahlung an verschiedenen Stellen des Tunnelquerschnitts berechnet. Die Wirkung von lokaler Abschirmung wurde eingehend untersucht und wird mit größerer Genauigkeit als in Lit. 1 angegeben.

Analoge Rechnungen wurden auch für PETRA durchgeführt und mit Messungen verglichen (Lit. 2). Im Rahmen der (statistischen) Unsicherheiten der Rechnungen und der Streuungen der Messwerte waren die Übereinstimmungen gut, d.h. etwa innerhalb eines Faktors 2. Da die Rechenmethoden im Falle des HERA-Tunnels die gleichen sind, wird angenommen, daß sich die Voraussagen dieses Berichts im gleichen Rahmen bestätigen werden.

Im HERA-Tunnel ist die Synchrotronstrahlung nicht die einzige Komponente, die zum Strahlungspegel beiträgt. Während des Speicherbetriebs geht auch ein Teil der Protonen verloren, die eine Reihe von Teilchen produzieren, von denen die Neutronen wegen ihrer hohen Durchdringungsfähigkeit am meisten zur protoneninduzierten Dosis beitragen. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß die Neutronenkomponente im Tunnelbogen im Normalfall etwa zwei Größenordnungen unter der der Synchrotronstrahlung bei 30 GeV liegt (Lit. 3).

Hochenergetische Strahlung tritt vor allem während des Einschusses und in der Gegend der Injektionselemente auf. Im Tunnelbogen spielt sie insbesondere während des normalen Speicherbetriebs keine Rolle gegenüber der Synchrotronstrahlung.

2.0 BEMERKUNGEN ZU DEN RECHNUNGEN

2.1 DAS PROGRAMM EGS

Die im folgenden beschriebenen Rechnungen wurden mit dem Monte Carlo-Programm EGS (Version 3) durchgeführt (Lit. 4).

Dem Programm muß ein Benutzerteil zugefügt werden, in dem unter anderem die Definitionen der primären Teilchen (Quelle) und der Geometrie, in der die Teilchen transportiert werden, erfolgen.

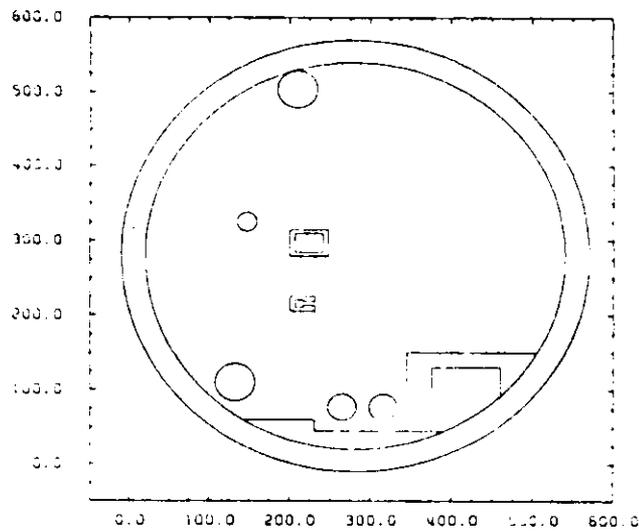
Als Quelle werden Photonen benutzt, die in einer bestimmten, durch die Krümmung des HERA-Ringes gegebenen Richtung auf die Innenwand der Vakuumkammer fallen. Die Energie jedes primären Photons wird "gewürfelt", so daß die Gesamtheit aller einfallenden Photonen ein Spektrum aufweist, das dem der Synchrotronstrahlung nahe kommt.

Die Geometrie, in der die Teilchen verfolgt werden, muß einerseits die realen Verhältnisse möglichst gut wiedergeben, darf jedoch andererseits nicht zu kompliziert sein, da die Rechenzeit, die man benötigt, um statistisch brauchbare Ergebnisse zu erhalten, sehr stark von der Geometrie bestimmt wird. Wie in allen früheren Fällen (Lit. 1, 2), wurde die Geometrie des Beschleunigertunnels durch Ebenen angenähert, die in geeigneter Weise parallel oder rechtwinklig zueinander angeordnet sind, aber so, daß alle parallel zur Strahlrichtung verlaufen (Lit. 5). Die zwischen den Schnittlinien der Ebenen entstehenden, quaderförmigen Zonen werden dann mit den entsprechenden Materialien "angefüllt". Auf diese Weise genügt es, die Geometrie zweidimensional zu definieren, während sie in der dritten Dimension (Strahlrichtung) undefiniert ist.

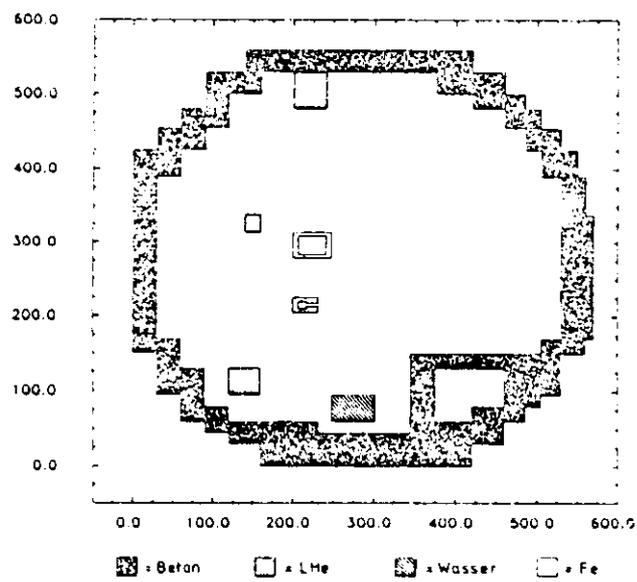
Die Abbildung 1 auf Seite 3 zeigt im oberen Teil den HERA-Tunnelquerschnitt mit den für die Ausbreitung der Synchrotronstrahlung relevanten Komponenten und im unteren Teil dazu die rechtwinklige Näherung, wie sie für die Rechnungen verwendet wurde.

Der Protonenmagnet wurde durch einen einfachen Kasten aus Eisen dargestellt, der mit seiner Masse etwa dem Joch des Magneten in Lit. 6 entspricht. Der Elektronendipol ist nur angedeutet; er ist in Abbildung 2 auf Seite 4 in Details dargestellt.

Im Gegensatz zur Wirklichkeit treffen die primären Photonen punktförmig auf die Innenseite der Vakuumkammer. Da ihr Spektrum bekannt ist, kann die gesamte einfallende Energie normiert werden auf die Energie, die ein umlaufendes Elektron pro Längeneinheit (z.B. 1 Meter) abstrahlt. Das



(a)



(b)

Abbildung 1. Querschnitt durch den HERA-Tunnel:

a) mit den für den Teilchentransport relevanten Komponenten,

b) rechtwinklige Näherung für den Transport durch das Rechenprogramm.

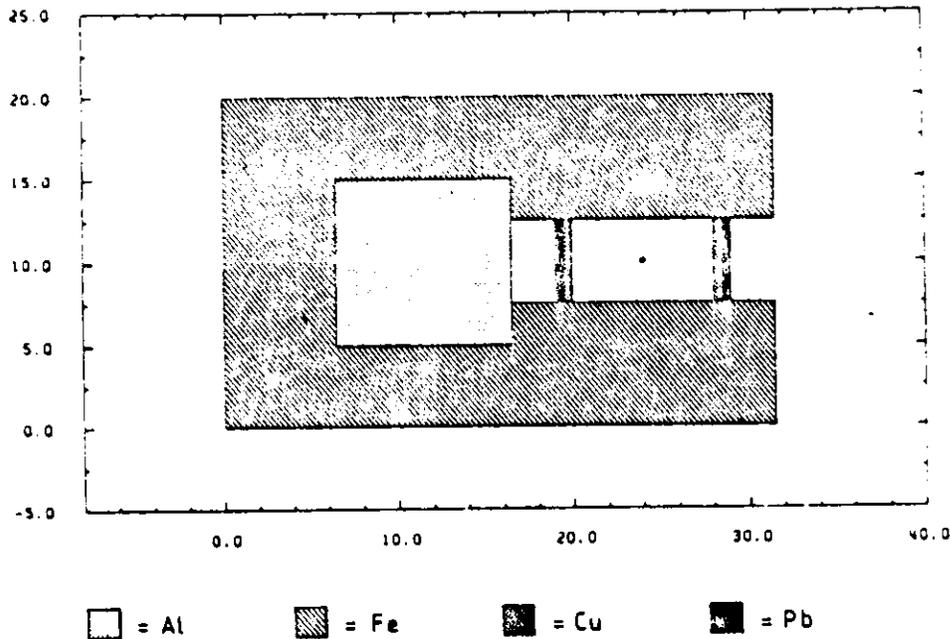


Abbildung 2. Querschnitt durch den Elektronendipol: Rechtwinklige Näherung für die Rechnungen.

heißt, man faßt die Synchrotronstrahlung, die ein Elektron pro Meter abstrahlt zusammen und läßt sie punktförmig auf die Kammerwand treffen. Die Folgeteilchen werden jetzt dreidimensional transportiert, wobei die Geometrie in Strahlrichtung unendlich ausgedehnt ist.

Zur Berechnung von Fluenzen (und damit Dosen) benötigt man jedoch eine endliche Fläche, senkrecht zur Flugrichtung der Photonen. Im Idealfall wird zur Bestimmung von Fluenzen eine Kugel verwendet, die senkrecht zu allen Einfallrichtungen der Teilchen die gleiche Fläche bietet. Bei der hier vorliegenden rechtwinkligen Geometrie ist das nicht erfüllt. Man rechnet deshalb mit einer Fläche, deren eine Seite (senkrecht zur Richtung des Elektronenstrahls) durch die Geometrie und die Winkelverteilung der Photonen gegeben ist (s. Abschnitt "Spektren und Winkelverteilungen" auf Seite 12), und die in Strahlrichtung gleich der oben erwähnten Längeneinheit von 1 Meter ist. Dabei wird angenommen, daß alle Photonen, die aus diesem Längenbereich hinaus transportiert wurden im statistischen Mittel von solchen ersetzt werden, die einen Meter vorher (oder nachher) produziert wurden.

Die approximierte Rechengeometrie der Abbildung 1 auf Seite 3 ist damit am besten in der Mitte eines Elektronendipols realisiert. Um die Ausbreitung der Synchrotronstrahlung zu studieren, die zwischen 2 Dipolen, also im geraden Teil der Vakuumkammer auf die Wand trifft, wurde das Eisen des Dipols entfernt und die Kammer allseitig mit Blei umgeben.

Die Abmessungen der Magnete und der Vakuumkammer entsprechen denen aus Lit. 6. Wenn nichts anderes angegeben ist, wurde für die Dicke der Vakuumkammer 4 mm Kupfer und für die Dicke der Abschirmung der Kammer 5 mm Blei angenommen.

2.2 DOSISBERECHNUNG

Im Tunnelquerschnitt wurden eine Reihe von Positionen definiert, für die Dosis, Spektrum und Winkelverteilung der Photonen berechnet wurden (Abbildung 3 auf Seite 6).

Durch die Struktur der Geometrie ist jede Position von einem rechtwinkligen Bereich umgeben. Aus der Energie der Photonen, die einen solchen Bereich "betreten", kann mit Hilfe der Massen-Energie-Absorptionskoeffizienten eines bestimmten Materials der Energiebetrag berechnet werden, den das Photon in einer Masseneinheit des Materials erzeugt (=KERMA). Wenn Gleichgewicht der Sekundärelektronen herrscht (was wir annehmen), dann ist diese Energieabgabe pro Masse gleich der absorbierten Dosis.

Als Absorptionsmaterial wählt man z.B. Radiophotolumineszenz-Glas (RPL-Glas), das später direkt zur Dosismessung verwendet werden kann. Wenn nichts anderes angegeben ist, sind die Dosen für dieses Glas berechnet. Aus dem Spektrum der Photonen kann jedoch die Dosis auch für jedes andere Material berechnet werden (s. Abschnitt "Spektren und Winkelverteilungen" auf Seite 12).

Die Dosen sind im allgemeinen auf eine umlaufende Ladung von 0.1 Ah normiert. Diese Ladung wird bei einem mittleren Strom von 25 mA in 4 Stunden erreicht. In vielen Fällen ist die Dosis interessanter, die in einem Jahr aufsummiert wird. Für die angegebenen Dosen pro Jahr bei 30 GeV wurden 4000 Betriebsstunden und ein mittlerer Strom von 25 mA zugrunde gelegt. Dann unterscheiden sich die Dosen pro 0,1 Ah und die Dosen pro Jahr gerade um einen Faktor 10^3 .

Alle Rechnungen wurden für 30, 40 und 50 GeV Strahlenergie durchgeführt.

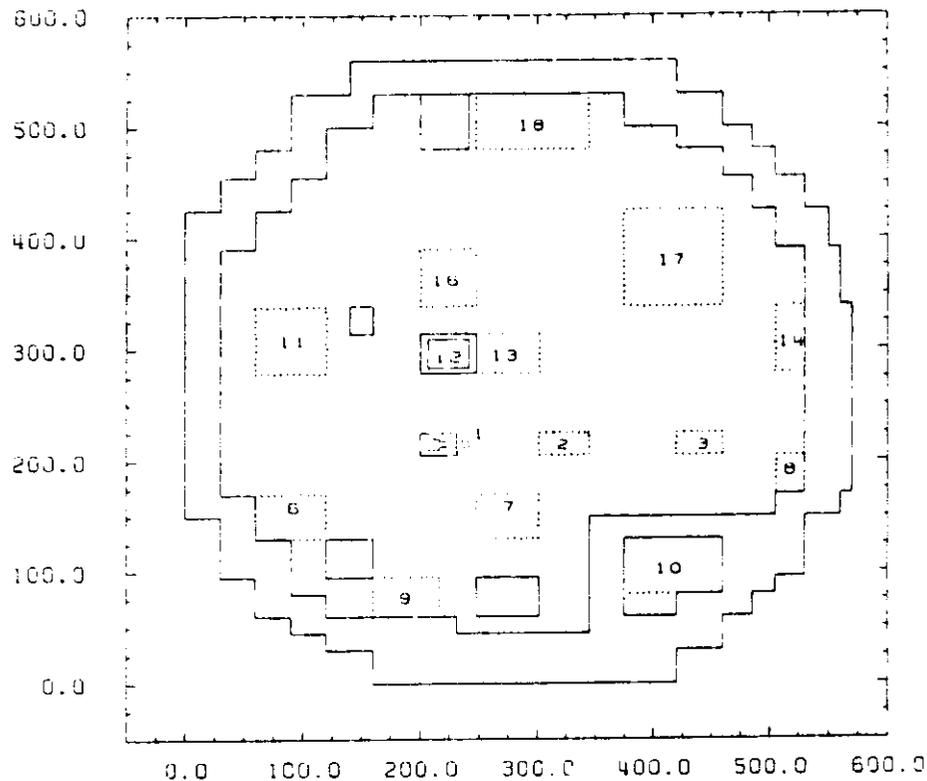


Abbildung 3. Positionen für die Dosisberechnung: Gestrichelt eingetragen sind die Ausdehnungen der Bereiche, die zur Dosis einer Position beitragen.

2.3 LOKALE ABSCHIRMUNG

Wenn eine Vielzahl von Photonen durch Vielfachstreuung in der Geometrie der Abbildung 1 auf Seite 3 an entlegene Stellen transportiert werden und dann dort zusätzlich Abschirmung durchdringen soll, um Dosis dahinter zu berechnen, ist die Grenze des sinnvollen Einsatzes des Programms überschritten. Dennoch ist die Wirkung von lokaler Abschirmung von großem Interesse. Um das Problem zu lösen, wurde (in einem anderen Programm) eine einfache Geometrie gewählt (Scheibengeometrie oder die Geometrie des Elektronikkanals), auf die ein Photonenstrahl einfällt, der die spektrale Zusammensetzung und Winkelverteilung hat, die den Photonen an einer bestimmten Tunnelposition entsprechen. Auf diese Weise können in einem zweiten Schritt mit relativ geringem Aufwand an

Rechenzeit, Dosen und Spektren hinter Absorbern verschiedener Dicke berechnet werden.

2.4 GENAUGKEIT DER RECHENERGEBNISSE

Systematische Fehler und solche, die durch unzureichende Wiedergabe der wirklichen Geometrie zustande kommen, lassen sich erst angeben, wenn entsprechende Messungen vorliegen.

Infolge des statistischen Charakters der Streu- und Transportvorgänge erhält man bei jedem Monte-Carlo-Spiel (Run) andere Dosiswerte. Um eine Aussage über die statistische Streuung der Dosiswerte zu erhalten, wurden die Ergebnisse von einer Anzahl von Runs gemittelt und die Standardabweichung vom Mittelwert für jede Position bestimmt. Diese Standardabweichungen sind als "Genauigkeit" den Ergebnissen beigelegt. Bei Standardabweichungen über 100% wurde die Genauigkeit als "Faktor" angegeben, um negative Werte zu vermeiden.

3.0 ERGEBNISSE

3.1 DOSISWERTE

Die Ergebnisse der Berechnungen der Dosen im HERA-Tunnel sind für die Strahlenergie 30 GeV in Abbildung 4 auf Seite 9 zusammengestellt.

Die Orte, für die die jeweiligen Dosen gelten, entsprechen den Positionen der Abbildung 3 auf Seite 6. Die Positionen 4, 5 und 15 sind dort nicht dargestellt; es sind Positionen hinter 5 mm Blei, 20 bzw. 10 cm Beton lokaler Abschirmung. Diese Werte werden im Abschnitt "Lokale Abschirmungen" auf Seite 16 diskutiert. In den Spalten 3 und 4 der Tabelle sind Dosen und ihre Genauigkeit aufgeführt, wie sie für einen unendlich langen Dipol berechnet werden, und zum Vergleich sind in den Spalten 5 und 6 die entsprechenden Werte angegeben, die im geraden Stück zwischen den Magneten erwartet werden. Man kann die Werte als Dosis in rad (oder cGy) pro 0,1 Ah umlaufender Ladung lesen oder als Jahresdosis in Einheiten von 10^3 rad/Jahr.

Man findet für die Dipolgeometrie (wie erwartet) hohe Dosiswerte vor dem Dipol, die in Strahlhöhe etwa mit $1/r$ zur Wand hin weniger werden. Außerhalb der Elektronenstrahl-Höhe, und ohne zusätzliche Abschirmung, sind die Werte untereinander nicht sonderlich verschieden. Die durch Vielfachstreuung zustande gekommenen Dosen unterscheiden sich grob nur um einen Faktor 2, unabhängig davon, ob sie für Positionen vor oder hinter dem Elektronendipol berechnet wurden. Man kann das deutlich in der Darstellung der (gerundeten) Jahresdosen in Abbildung 5 auf Seite 10 erkennen.¹

Diese Dosisverteilung ist auch zu verstehen, wenn man die Spuren einiger Photonen im Tunnelquerschnitt verfolgt, wie es in Abbildung 6 auf Seite 11 geschehen ist.

Die Dosisverteilung, die von Photonen herrührt, die im Geraden Stück die Vakuumkammer-Wand treffen, sieht dagegen ganz anders aus. Da die Abschirm- und Reflektionswirkung des Dipoleisens fehlt, wird an den bisher hinter dem Dipol liegenden Positionen (6, 9, 11) eine ca. 10 mal höhere Dosis registriert, während die Position 1, direkt an der Dipolöffnung, nur noch etwa die Hälfte der bisherigen Dosis feststellt. Für alle Positionen

¹ Zum Vergleich: bei PETRA beträgt die Jahresdosis bei 21,8 GeV und einem mittleren Strom von 7 mA (beide Strahlen) und 4000 Betriebsstunden pro Jahr an einer Position 50 cm unter Strahlhöhe, nahe am Dipolmagnet ca. $6 \cdot 10^5$ rad, also etwa die Hälfte einer vergleichbaren HERA-Position (s. Lit. 2).

Pos. Nr.	Position	Dipol Mitte		Gerades Stuck		DN
		Dosis	ΔD	Dosis	ΔD	CS
1	Vor der e- Magnet Öffnung	$5,8 \cdot 10^4$	0,55	$3,2 \cdot 10^4$	0,40	0,8
2	E- Hohe; Tunnelmitte	$1,1 \cdot 10^4$	0,55	$3,4 \cdot 10^4$	0,80	3,
3	E- Hohe; über Elektronikkanal	$7,5 \cdot 10^3$	0,70	$1,3 \cdot 10^4$	0,80	2,
4	E- Hohe; Wand innen; hinter 5 mm Blei	$6, \cdot 10^2$	* 3	$2, \cdot 10^2$	* 2	0,3
5	E- Hohe; Wand innen; hinter 20 cm Beton	$2, \cdot 10^2$	* 2	$5, \cdot 10^1$	* 2	0,2
6	Hinter e- Magnet; Fußboden	$7, \cdot 10^2$	* 2	$8,5 \cdot 10^3$	0,30	10,
7	Vor e- Magnet; Fußboden	$2,2 \cdot 10^3$	0,55	$5,9 \cdot 10^3$	0,20	2,7
8	Unter und über e- Hohe; Wand innen	$1,9 \cdot 10^3$	0,35	$2,1 \cdot 10^3$	0,55	1,1
9	Unter e- Magnet; unter Fußboden	$9, \cdot 10^2$	* 3	$5,2 \cdot 10^3$	0,65	6,
10	Elektronikkanal	$5, \cdot 10^0$	* 2	$5,0 \cdot 10^1$	0,80	10,
11	Hinter p- Magnet; Wand außen	$9, \cdot 10^2$	* 3	$8,4 \cdot 10^3$	0,30	9,
12	Im p-Magnet	$2, \cdot 10^1$	* 3	$5, \cdot 10^2$	* 2	25,
13	P- Hohe; Tunnelmitte	$4,7 \cdot 10^3$	0,50	$7,3 \cdot 10^3$	0,35	1,5
14	P- Hohe; Wand innen	$2,1 \cdot 10^3$	0,50	$1,9 \cdot 10^3$	0,40	0,9
15	P- Hohe; Wand innen; hinter 10 cm Beton	$1,7 \cdot 10^2$	0,60	$3, \cdot 10^2$	* 3	2,
16	Oberhalb des p- Magnets	$1, \cdot 10^3$	* 3	$3,4 \cdot 10^3$	0,50	3,
17	Gehweg; Kopfhöhe	$1,8 \cdot 10^3$	0,65	$3,0 \cdot 10^3$	0,30	1,7
18	Tunneldecke; Tunnelmitte	$7, \cdot 10^2$	* 2	$1,6 \cdot 10^3$	0,40	2,

Abbildung 4. Tabelle 1: Dosiswerte im gebogenen HERA-Tunnel:

Strahlenergie = 30 GeV

Dosiseinheiten:

- rad/0,1 Ah oder
- cGy/0,1 Ah oder
- 10^3 rad/Jahr (4000 Betriebsstunden und I = 25 mA).

(außer 1), die "direkte Sicht" auf die Dipolöffnung hatten, sind die Werte ungefähr gleich geblieben. Bei Positionen, die hinter zusätzlicher Abschirmung liegen (insbesondere Pos. 10 und 12), und die bisher keine direkte Sicht zur Quelle hatten, sind die Dosiswerte stark angestiegen (Faktor 10 bis 20), da sie jetzt von Teilchen aus der Quelle direkt getroffen werden können. Die Verteilung der Spuren ist in Abbildung 7 auf Seite 12 dargestellt.

Der Vergleich mit der oberen Abbildung verdeutlicht die geschilderten Rechenergebnisse.

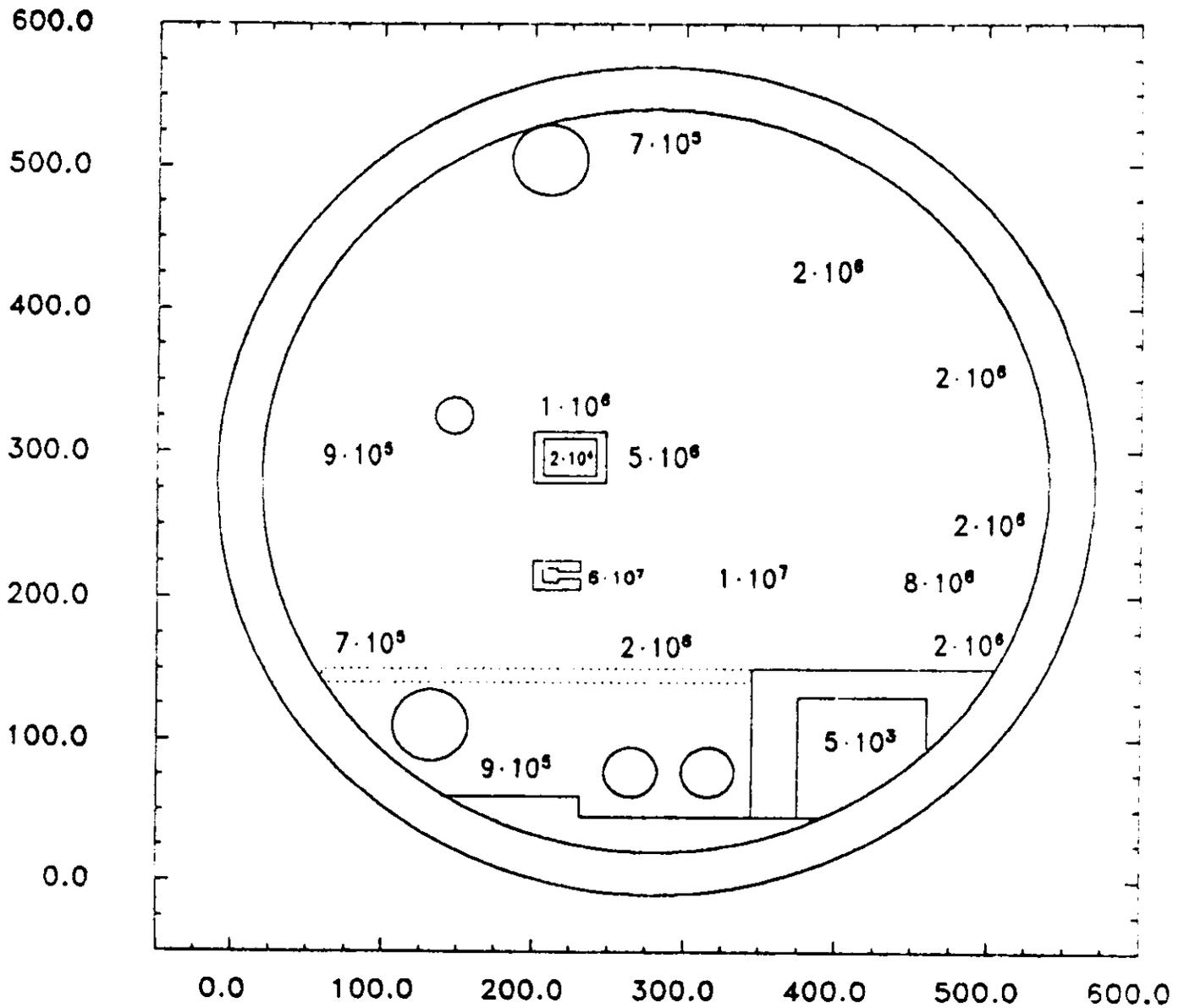


Abbildung 5. Jahresdosen bei 30 GeV:

Einheiten: rad oder cGy;
 mittlerer Strom = 25 mA;
 Betriebsdauer = 4000 h/Jahr.

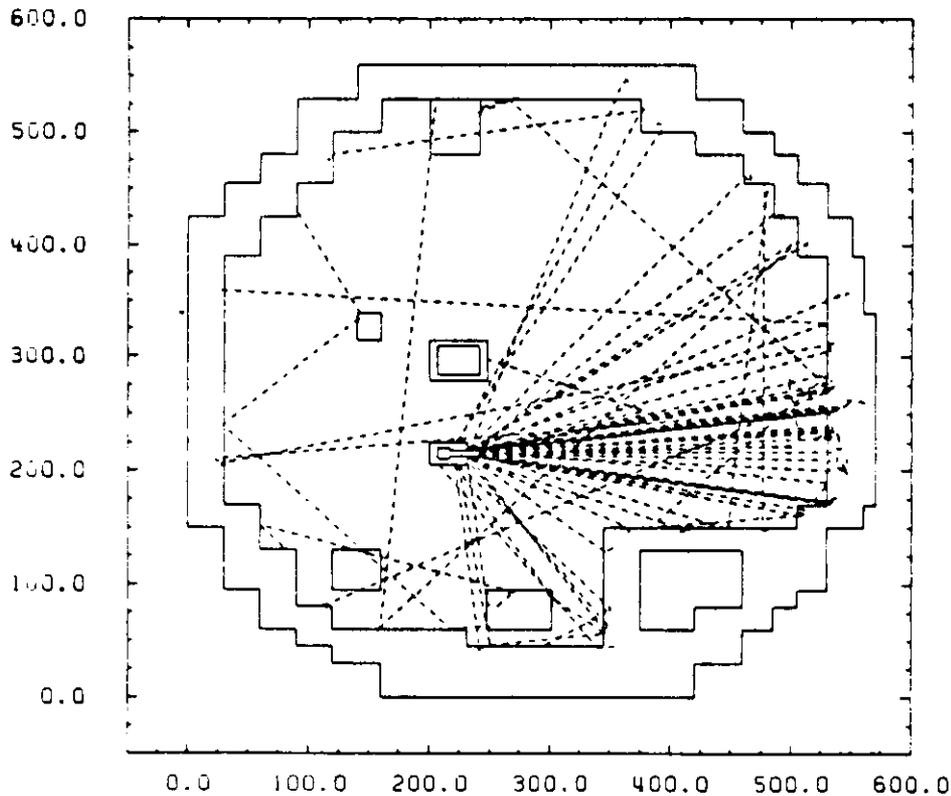


Abbildung 6. Ausbreitung der Photonen in der Mitte des Elektronendipols: Strahlenergie = 30 GeV.

Um die Wichtigkeit einer vollständigen und perfekten Bleiabschirmung zwischen den Magneten zu demonstrieren, wurden die Rechnungen im Geraden Stück ohne Blei wiederholt. Dabei zeigte sich eine Erhöhung der Dosen um einem Faktor bis 40 für Positionen hinter zusätzlicher Abschirmung und um etwa einen Faktor 100 für alle anderen Positionen.

Die Dosiswerte der Geometrie mit Dipolmagnet wurden auch für 40 und 50 GeV berechnet. Dabei ergaben sich Erhöhungen der Werte um durchschnittlich einen Faktor 15 ($\pm 30\%$) wenn die Energie von 30 auf 40 GeV ansteigt, und um einen Faktor 75 ($\pm 30\%$) wenn man die Strahlenergie von 30 auf 50 GeV erhöht. Die Skalierung der Jahresdosen mit diesen Faktoren ist sicher unzulässig, da der mittlere Strom bei jeder Energie anders sein wird.

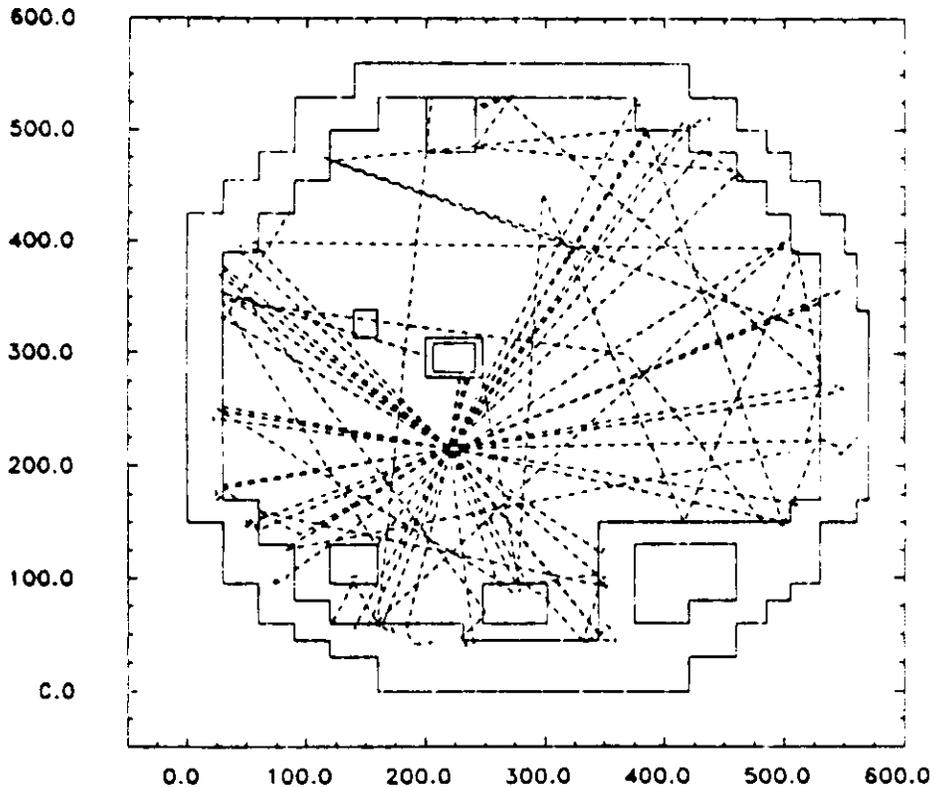


Abbildung 7. Ausbreitung der Photonen im geraden Stück der Vakuummkammer: Strahlenergie = 30 GeV.

3.2 SPEKTREN UND WINKELVERTEILUNGEN

Für alle Positionen, die in der Abbildung 4 auf Seite 9 aufgeführt sind, wurden die Spektren und Winkelverteilungen berechnet.

In der Abbildung 8 auf Seite 13 ist das Spektrum der Position 2 (Tunnelmitte, in e-Strahlhöhe) bei 30 GeV dargestellt. Es ist typisch für alle Positionen, die für Photonen ohne Streuung vom Dipolgap aus erreichbar sind.

Die Vielfachstreuung geht auf Kosten der höheren Photonenenergien. Positionen, die nur über eine oder mehrere zusätzliche Streuungen erreichbar sind, haben deshalb Spektren, ähnlich wie es für den Fall der Position 6 (hinter dem e-Magnet, auf dem Fußboden) in der gleichen Abbildung dargestellt ist.

Bei höheren Strahlenergien liegen die Punkte insgesamt höher; bei niedrigen Photonenenergien ist die Form der Spektren dabei ganz ähnlich, bei hohen Energien dagegen sind die Werte stark erhöht. Das ist am Beispiel

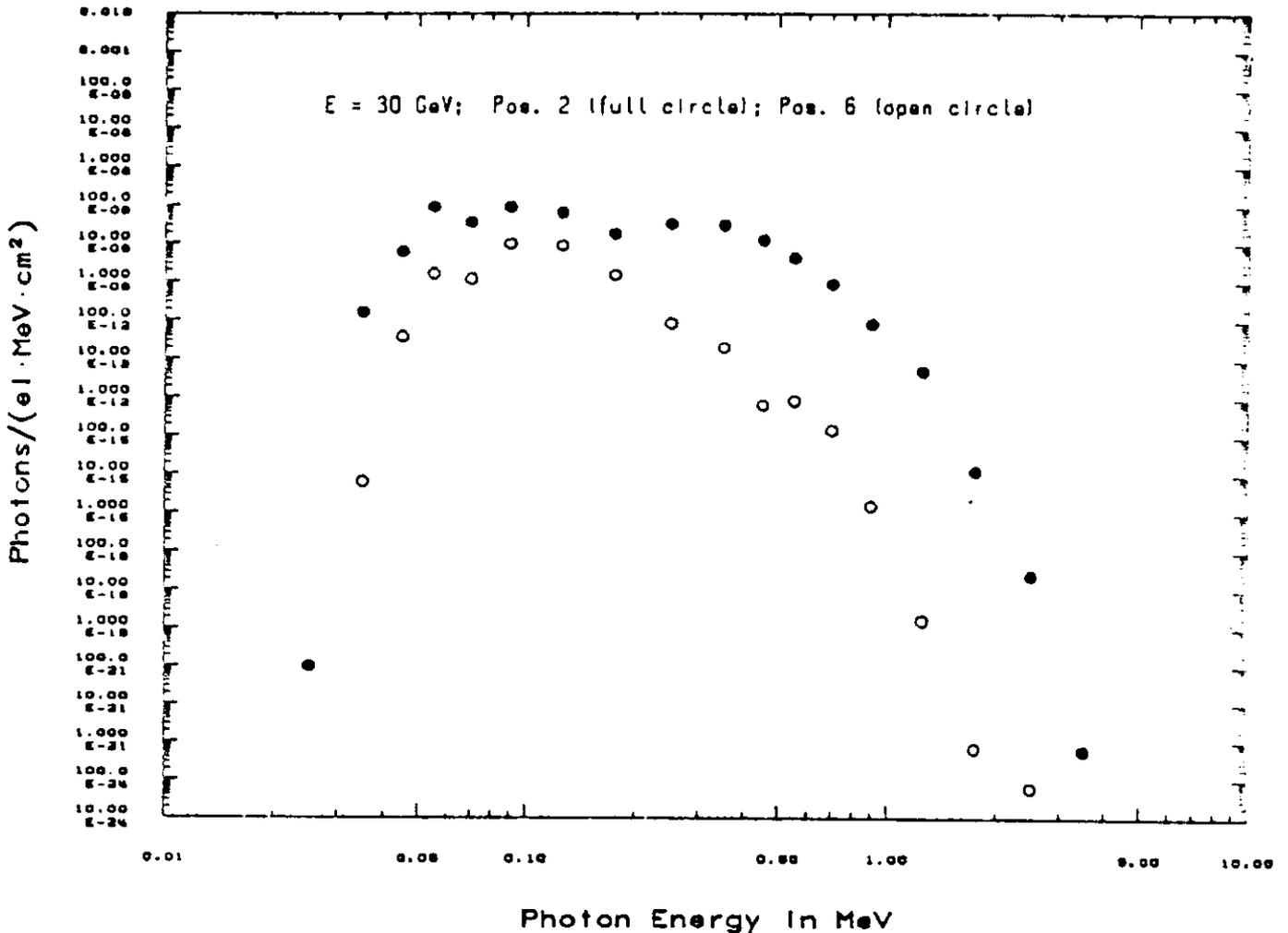


Abbildung 8. Spektren vielfachgestreuter Photonen bei 30 GeV:

Position 2: Tunnelmitte, in e-Strahlhöhe;
 Position 6: Hinter dem e-Magnet, auf dem Fußboden.

der Position 2 in der Abbildung 9 auf Seite 15 für 30, 40 und 50 GeV dargestellt.

Zusätzliche Abschirmung geht in erster Linie auf Kosten der niedrigen Photonenenergien. Solche Spektren werden noch im Abschnitt "Lokale Abschirmungen" auf Seite 16 diskutiert.

Aus den Spektren (= Fluenzen als Funktion der Photonenenergie) können, wie im Abschnitt "Dosisberechnung" auf Seite 5 angedeutet, Dosen berechnet werden, wie sie in beliebigen Materialien erzeugt werden:

$$D = C \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot \Delta E_i \cdot E_i \cdot \left(\frac{\eta}{\rho}\right)_i$$

Dabei ist

Φ_i die Anzahl der Photonen pro MeV und cm^2 im Energiebin i ("Spektrum"),

ΔE_i , E_i die Breite, bzw. der Mittelwert des Energiebins i ,

$(\eta/\rho)_i$ der Massen-Energie-Absorptionskoeffizient des Materials, in dem die Dosis berechnet werden soll, bei der Energie E_i und

C eine Konstante ($= 1,6 \cdot 10^{-8}$ rad/(MeV/g) oder $1,6 \cdot 10^{-10}$ Gy/(MeV/g)), die die spezifische Energiedeposition in Dosisseinheiten umrechnet.

Die Verschiedenartigkeit der Dosen in verschiedenen Materialien wird vom Absorptionswirkungsquerschnitt, also von (η/ρ) bewirkt. Oberhalb 1 MeV unterscheiden sich die Wirkungsquerschnitte verschiedener Absorber nur wenig, wohingegen sie bei kleineren Energien um Zehnerpotenzen differieren. Dementsprechend sollten sich Dosen in verschiedenen Materialien und an Positionen mit direkter Sicht zur Quelle (an denen die Dosis von hohen Photonenenergien bestimmt wird) wenig unterscheiden. Die Dosen an Positionen mit nur indirekter Sicht (bei denen niedrige Energien eine relativ größere Rolle spielen) sollten dagegen stärker differieren.

Die Dosiswerte der Abbildung 4 auf Seite 9 sind für RPL-Glas angegeben. Das Absorptionsverhalten dieses Materials ($A = 19$ g/mol; $Z = 10$; $\rho = 2,6$ g/cm³) ist ähnlich wie das von Aluminium. In vielen Fällen interessiert jedoch die Dosis in leichten Materialien wie Kunststoffen, die wegen ihrer molekularen Struktur stark zu Strahlenschäden neigen. Deshalb wurden die Dosen an den verschiedenen Positionen mit Hilfe der Spektren für das Material CH₂ berechnet. Das Ergebnis ist, daß die CH₂-Dosen für Positionen mit direkter Sicht zur Dipolöffnung im Mittel etwa das 0,8 ($\pm 0,1$) fache der Glasdosis und für Positionen ohne direkte Sicht zur Dipolöffnung

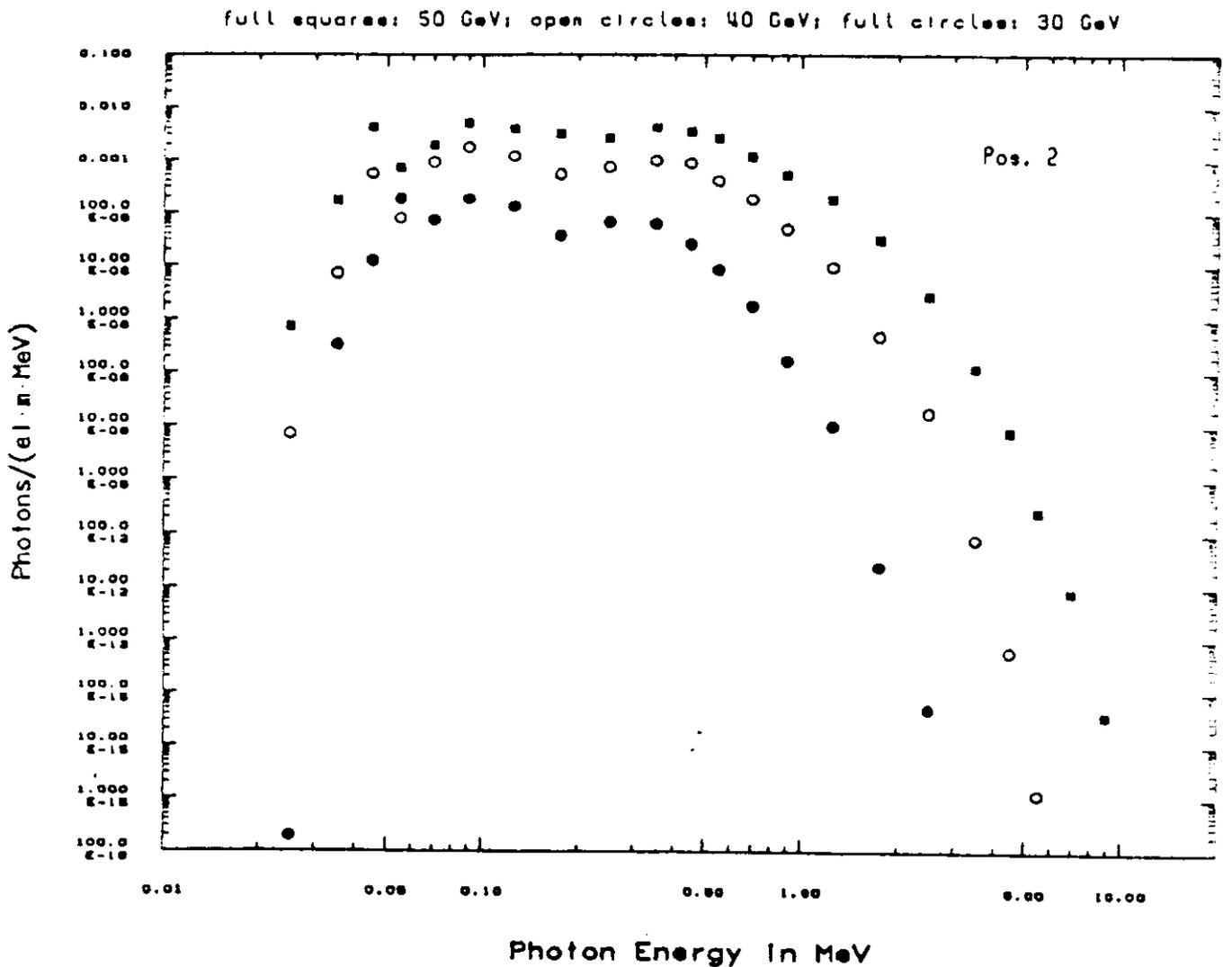


Abbildung 9. Photonenspektren bei verschiedenen Strahlenergien: Position 2 bei 30, 40 und 50 GeV.

im Mittel etwa das 0,5 ($\pm 0,1$) fache betragen. Das ist im Einklang mit der obigen Überlegung. Innerhalb der Fehlergrenzen gelten diese Werte auch für 40 und 50 GeV Strahlenergie.

Für jede Position wurde die Winkelverteilung der Photonen berechnet, die in den zur Position gehörenden Bereich (siehe Abbildung 3 auf Seite 6) einfliegen. Die Kenntnis der Winkelverteilung ist notwendig, einmal um die

Fläche bestimmen zu können, senkrecht zu der die Mehrheit der Teilchen einfliegt (vgl. Abschnitt "Das Programm EGS" auf Seite 2), und zum andern, um die Wirkung lokaler Abschirmungen möglichst realistisch berechnen zu können (siehe Abschnitt "Lokale Abschirmungen").

Aus Gründen der Statistik wurden die Winkelverteilungen nur in relativ groben Winkelbins berechnet. Für jedes Photon, das den Bereich einer Position "betritt", wurde die Flugrichtung registriert und das Teilchen in den entsprechenden Winkelbin eingeordnet. Dabei wurde so verfahren, als ob alle Photonen einer Position durch deren Zentrum fliegen.

In der Abbildung 10 auf Seite 17 sind solche Winkelverteilungen für 2 Positionen dargestellt, von denen die eine "direkte Sicht" zur Dipolöffnung hat (Pos. 2), während die andere hinter dem Dipol liegt (Pos. 6).

Alle Photonen, die das Dipolgap verlassen, haben bereits eine oder mehrere Streuungen hinter sich. Deshalb ist die Vorwärtsrichtung nicht stark ausgeprägt. (Die primären Photonen fliegen unter einem Winkel von 0,7 Grad auf die Wand der Vakuumkammer). Die Mehrheit der gestreuten Photonen fliegt unter dem Winkel $\vartheta = 30$ bis 90° zum Strahl, unabhängig von der Position (siehe Abbildung 10 auf Seite 17, oben). Der Azimutwinkel φ ist so definiert, daß $\varphi=0$ nach oben zeigt und im Uhrzeigersinn gezählt wird. Im unteren Teil der Abbildung 10 auf Seite 17 erkennt man, wie die meisten Photonen der Position 2 unter 90° einfallen, während die Mehrheit der Position 6 genau entgegengesetzt, also unter 270° in den Bereich einfliegt, wie man es erwartet.

3.3 LOKALE ABSCHIRMUNGEN

In der Geometrie der Abbildung 1 auf Seite 3, unten, sind an einigen Stellen Positionen eingebaut, an denen Dosis hinter Absorbern bestimmt werden soll (siehe Abbildung 4 auf Seite 9: Position 4, 5, 15, aber auch Position 10 und 12). Die Ergebnisse sind trotz großen Rechenaufwands mit beträchtlichen Fehlern behaftet. Deshalb wurden Absorptionskurven für eine einfache Scheibengeometrie berechnet, wobei Photonenstrahlen mit der spektralen Zusammensetzung und der Winkelverteilung der jeweiligen Position, auf die Absorber fallen. Alle Photonen kommen dabei aus einer punktförmigen Quelle. In der Abbildung 11 auf Seite 18 sind Absorptionskurven in Blei für 30 GeV an einigen typischen Positionen aufgezeichnet.

Da die Positionen mit direkter Sicht zur Dipolöffnung sehr ähnliche Spektren aufweisen, zeigen sie auch sehr ähnliches Absorptionsverhalten. Diese Kurven sind deshalb in der Abbildung 11 auf Seite 18 in einem Band zusammengefaßt. Die Dosen an Positionen mit weicheren Spektren sind

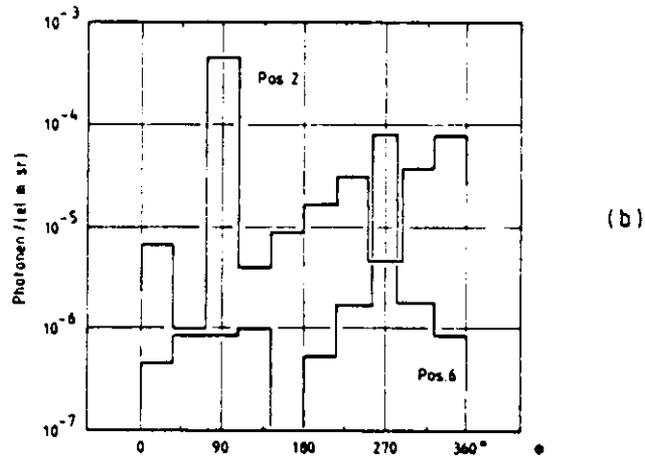
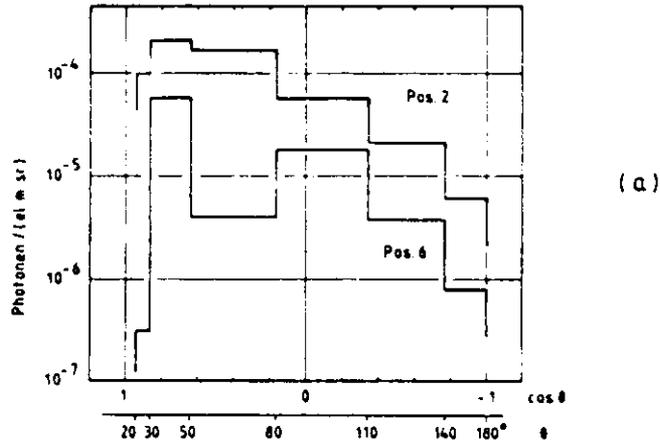


Abbildung 10. Winkelverteilungen: Photonen der Positionen 2 und 6, deren Spektren in Abbildung 8 auf Seite 13 dargestellt sind, bei 30 GeV.

durch Blei entsprechend leichter abschirmbar, wie am Beispiel der Positionen 6 und 18 gezeigt ist.

Die Abschirmwirkung geht zunächst auf Kosten der niederenergetischen Photonen des einfallenden Spektrums. Das wird in Abbildung 12 auf Seite 19 bestätigt. Dort wird das Spektrum, wie es an der Position 3 (e-Strahlhöhe; über dem Elektronikkanal) bei 30 GeV Strahlenergie ange-

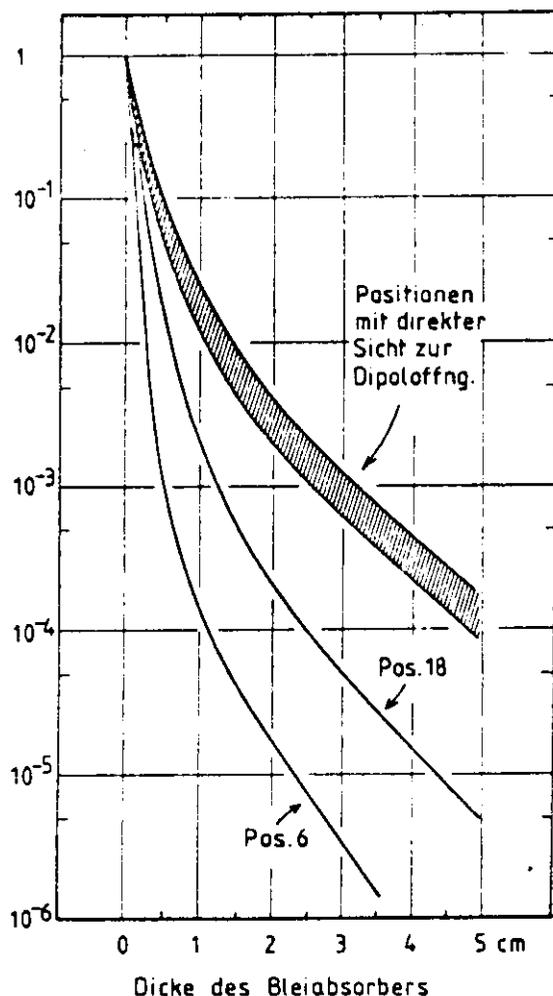


Abbildung 11. Absorption in Blei: Schwächung vielfachgestreuter Photonen bei 30 GeV.

troffen wird, und wie es auf die Absorberscheiben fällt, verglichen mit dem Spektrum hinter nur 5 mm Blei. Man sieht nahezu keine Wirkung auf Photonen über 1 MeV, jedoch eine Reduktion um mehrere Zehnerpotenzen der Photonenzahl unter 500 keV.

In der Abbildung 13 auf Seite 20 ist die Abschirmwirkung der Materialien Blei, Eisen und Beton ($\rho = 2,4 \text{ g/cm}^3$) bei einer Strahlenergie von 30 GeV verglichen. Als einfallendes Photonenpektrum wurde das der Position 7 (vor dem e-Magnet; auf dem Fußboden) gewählt, weil es als einfallendes Spektrum für den Elektronikkanal angenommen werden kann.

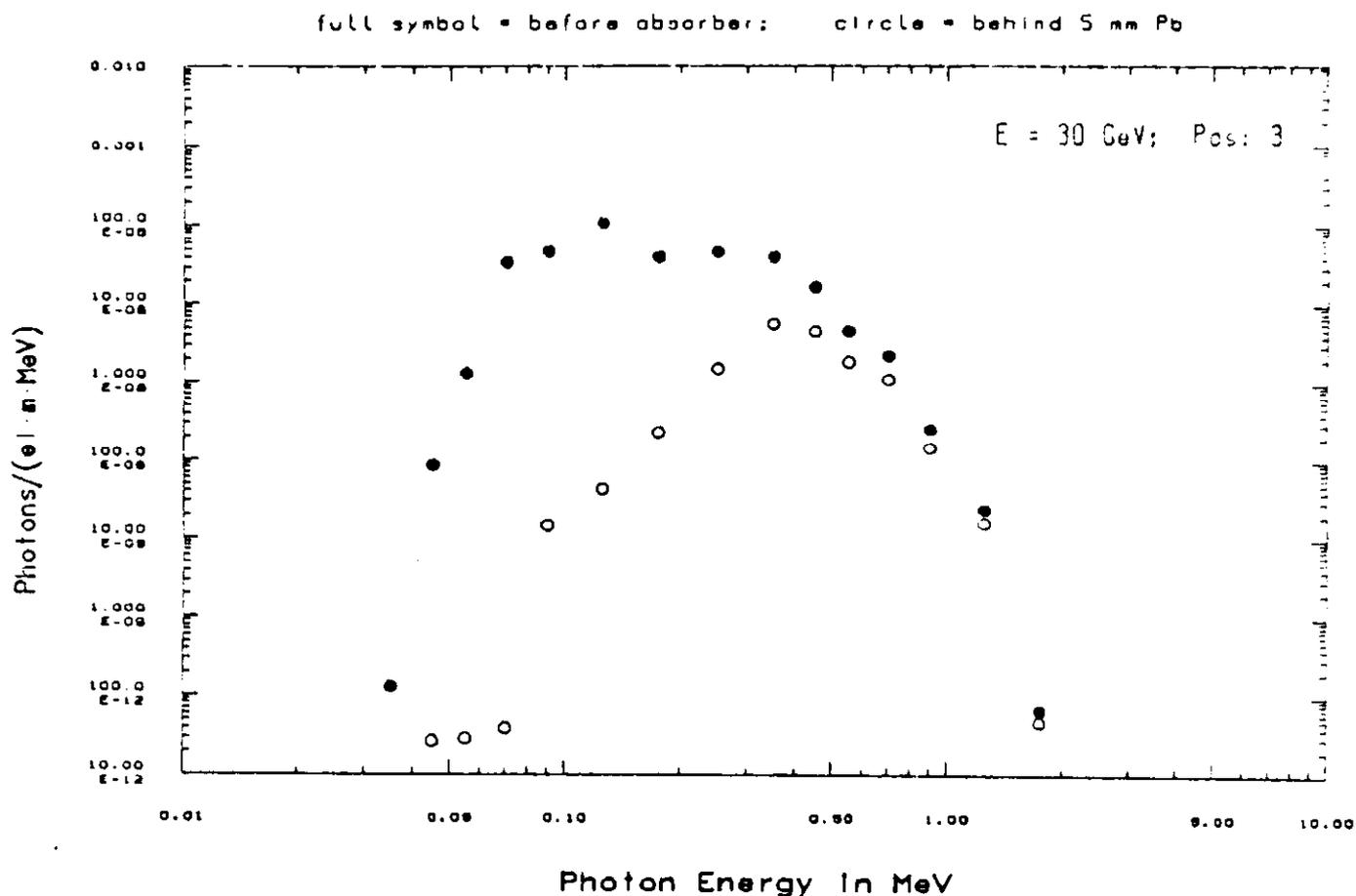


Abbildung 12. Spektren hinter Bleiabsorber: Einfluß von 5 mm Blei auf das Spektrum der Position 3 (e-Höhe; über Elektronikkanal). Strahlenergie 30 GeV.

Eine Reihe von Rechnungen wurde durchgeführt, um eine optimale Abschirmung von Elektronik im Kanal Position 10 (siehe Abbildung 2 auf Seite 6), zu finden. Dabei wurden Photonen betrachtet, die von einem Punkt vor dem Gap des Elektronendipols aus auf den Kanal einwirken (Abbildung 1 auf Seite 3, rechts unten), wobei das Spektrum dem der Position 7 entspricht. Die Abdeckung des Kanals wurde variiert (Material und Dicke), und zusätzlich wurde die Abdeckung innen und die Seitenwand innen mit Blei ausgekleidet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 auf Seite 22 zusammengefaßt. Die Dosis der ersten Zeile wird bei offenem Kanal (oder ungenügender Abdeckung) erzeugt; die der zweiten Zeile entspricht einem offenen Kanal, aber mit einer Abdeckung der Elektronik mit einer

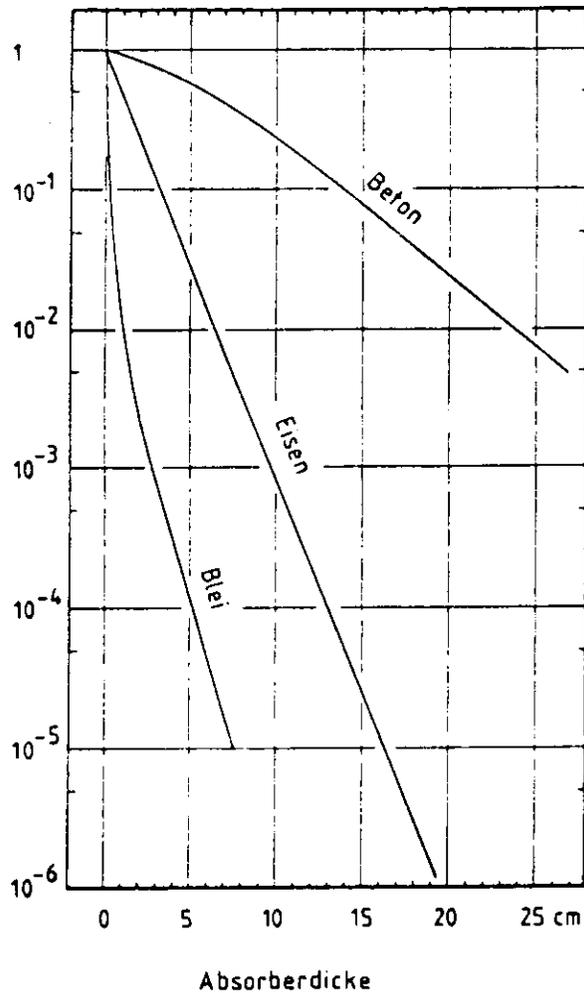


Abbildung 13. Absorption in verschiedenen Materialien: Schwächung der Photonen an Position 7 (vor dem Elektronendipol; auf dem Fußboden) in Blei, Eisen und Beton, für 30 GeV.

Haube aus 5 mm Blei. Für die Dosisrechnungen des Abschnitts "Dosiswerte" auf Seite 8 wurde der Elektronikkanal mit 20 cm Beton, ohne zusätzliche Auskleidung abgedeckt. Das Ergebnis war 5 rad/0,1 Ah bei einer Ungewißheit von etwa einem Faktor 2 (siehe Abbildung 4 auf Seite 9). Jetzt erhält man 8,0 rad/0,1 Ah. Alle Werte der Abbildung 14 auf Seite 22 haben eine statistische Unsicherheit von etwa 50% (außer Zeile 1).

Abdeckung		Auskleidung Bleidicke (cm)		Dosis
Material	Dicke in cm	Abdeckg.	Seite	
----- Beton	0.	0.	0.	1100.
		0,5	0,5	33.
	10.	0.	0.	90.
		0,5	0.	7.
		0,5	0,5	3.
		1,0	1,0	1,5
	20.	0.	0.	8.
		0,5	0.	2.
0,5		0,5	1	
Eisen	5.	0.	0.	18.
		0,5	0.	12.
		0,5	0,5	5.
	10.	0.	0.	4.
		0,5	0.	3.
		0,5	0,5	2.

Abbildung 14. Tabelle 2: Dosiswerte im Elektronikkanal:

Strahlenergie = 30 GeV

Dosiseinheiten:

- rad/0,1 Ah oder
- cGy/0,1 Ah oder
- 10^3 rad/Jahr (4000 Betriebsstunden und $I = 25$ mA)

Statistische Unsicherheit: etwa 50%.

4.0 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegenden Rechnungen haben gezeigt, daß man im gebogenen Teil des HERA-Tunnels, außerhalb der Ebene zwischen Elektronendipol und Innenwand, mit Jahresdosen von etwa $1 \cdot 10^6$ rad rechnen muß. Durch zusätzliche 5 mm Bleiabschirmung kann diese Dosis um 1 bis 2 Größenordnungen reduziert werden. Im Elektronikkanal wird es möglich sein, unter 1 bis $2 \cdot 10^3$ rad/Jahr zu bleiben. Alle diese Zahlen gelten für eine Strahlenergie von 30 GeV, einem mittleren Strom von 25 mA und 4000 Betriebsstunden pro Jahr. Nach unseren Erfahrungen bei PETRA sollten sie innerhalb eines Faktors 2 mit der Realität übereinstimmen.

5.0 LITERATUR

1. H. Dinter: Strahlungs Dosen im HERA-Tunnel durch Synchrotronstrahlung
Interner Bericht DESY D3-47 (1982)
2. H. Dinter: Absorbed Doses due to Synchrotronstrahlung Radiation in
the Tunnel of the Storage Ring PETRA.
Nucl. Instr. Meth., accepted for publication
3. K. Tesch: Neutronenfluenzen und Neutronendosen im HERA-Tunnel.
Laborbericht DESY D3-32 (1984)
4. R.L. Ford, W.R. Nelson: The EGS Code System: Computer Programs
for the Monte Carlo Simulation of Electromagnetic
Cascade Showers (Version 3).
SLAC Report SLAC-210 (1978)
5. C. Yamaguchi: A Manual for EGS3 User Codes at DESY for
Synchrotron Radiation Problems.
Internal Report DESY D3-39 (1981)
6. HERA - A Proposal for a Large Electron - Proton Colliding Beam
Facility at DESY.
DESY HERA 81/10 (1981)

